



**UNIVERSIDADE DE  
BRASÍLIA**



**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL  
E AMBIENTAL**

## **PROJETO DE PESQUISA**

**Análise da cadeia produtiva do setor de mineração de rochas para produção de agregados no Estado de Goiás, com vistas ao aproveitamento dos resíduos em aplicações geotécnicas**

**Apoio Financeiro:** Secretária de Geologia, Mineração e Transformação Mineral

**Convênio:** 4800002987/2006-27

## **Relatório Final de Atividades**

**Coordenador: Prof. Luís Fernando Martins Ribeiro**

Outubro 2008

## SUMÁRIO

1.	TÍTULO DO PROJETO.....	4
2.	INTRODUÇÃO.....	4
3.	PRINCIPAIS OBJETIVOS DO PROJETO.....	7
4.	PRINCIPAIS ETAPAS EXECUTADAS.....	8
4.1.	Primeira Etapa.....	8
4.1.1.	Mapeamento das empresas.....	8
4.1.2.	Cadastramento e criação de banco de dados.....	8
4.1.3.	Caracterização dos Maciços.....	9
4.1.4.	Estudo para proposta de alteração nos planos de lavra.....	9
4.2.	Segunda Etapa.....	9
4.2.1.	Caracterização dos resíduos.....	9
4.2.2.	Análise dos Resíduos para Aplicação em Pavimentação.....	10
4.2.3.	Análise dos Resíduos para Aplicação em Fundações.....	10
4.2.4.	Análise de Custo.....	10
5.	ASPECTOS DA ÁREA DE ESTUDO.....	10
5.1.	Localização e acesso.....	10
5.2.	Aspectos Sócio-econômicos.....	12
5.3.	Clima, Fisiografia, Geomorfologia e Hidrografia.....	12
5.4.	Geologia.....	14
5.4.1.	Complexo granulítico anapolis-itaçu.....	14
5.4.2.	Complexos Indiferenciados - Associação Ortognáissica-Migmatítica.....	14
5.4.3.	Seqüências Metavulcano-sedimentar.....	15
5.4.4.	Unidade Metavulcânica.....	15
5.4.5.	Unidade Metassedimentar/Mista.....	15
5.4.6.	Grupo Araxá.....	15
5.4.7.	Granitos Sintectônicos - Granitóides Gama 3 (G3).....	16
5.4.8.	Cobertura terciária quaternária.....	16
5.4.9.	Cobertura Quaternária.....	17
6.	LEVANTAMENTO POR IMAGENS DE SATÉLITE.....	17
7.	VERIFICAÇÃO E VISITA ÀS PEDREIRAS.....	25
8.	CARACTERIZAÇÃO DO MACIÇO.....	25
9.	PROPOSTAS PARA PLANO DE FOGO.....	28
10.	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS PRODUZIDOS PELAS PEDREIRAS.....	30
11.	USO DE RESÍDUOS DE MINERAÇÃO EM PAVIMENTAÇÃO.....	31
11.1.	Metodologia utilizada nesta etapa.....	34
12.	USO DE RESÍDUOS DE MINERAÇÃO EM CONCRETO.....	46
12.1.	Adições Minerais para Concreto.....	47
12.2.	Efeitos das Adições Minerais nas Propriedades do Concreto.....	48
12.2.1.	Concreto no Estado Fresco.....	48
12.2.2.	Concreto no Estado Endurecido.....	49
12.3.	Concreto Auto-Adensável.....	51
12.3.1.	Método de Dosagem.....	52
12.3.2.	Princípios do método.....	53
12.3.3.	Definição da composição da pasta.....	53
12.3.4.	Determinação do esqueleto granular.....	55
12.3.5.	Otimização do volume de pasta no concreto.....	56
12.4.	Materiais e Métodos nesta etapa do trabalho.....	59
12.4.1.	Procedimento Experimental.....	59
12.4.2.	Seleção e caracterização dos materiais.....	60

12.4.3.	Estudos na pasta .....	64
12.4.4.	Teor de Finos .....	65
12.4.5.	Saturação do aditivo .....	66
12.4.6.	Estudo em Argamassas .....	67
12.4.7.	Esqueleto granular .....	68
12.4.8.	Produção do concreto .....	69
12.4.9.	Determinação das Propriedades Mecânicas do CAA no Estado Endurecido .....	72
<b>12.5.</b>	<b>Aplicação do Concreto Auto-adensável em estacas – Simulação .....</b>	<b>72</b>
<b>13.</b>	<b>ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS PRINCIPAIS RESULTADOS .....</b>	<b>73</b>
<b>13.1.</b>	<b>Elaboração das Cartas Temáticas .....</b>	<b>73</b>
<b>13.2.</b>	<b>Distribuição de Pedreiras .....</b>	<b>74</b>
<b>13.3.</b>	<b>Características das pedreiras .....</b>	<b>75</b>
<b>13.4.</b>	<b>Classificação de maciços e ensaios de laboratório .....</b>	<b>78</b>
<b>13.5.</b>	<b>Banco de dados georreferenciado .....</b>	<b>84</b>
<b>13.6.</b>	<b>Apresentação pedreiras cadastradas .....</b>	<b>85</b>
<b>13.7.</b>	<b>Ensaio nos materiais coletados nas pedreiras .....</b>	<b>86</b>
<b>13.8.</b>	<b>Resultados da Aplicação dos Resíduos na Pavimentação .....</b>	<b>89</b>
13.8.1.	Caracterização física dos rejeitos .....	89
13.8.2.	Caracterização física das amostras de solo natural e das misturas .....	92
13.8.3.	Caracterização química e mineralógica do rejeito e dos solos naturais .....	97
13.8.4.	Compactação, CBR e Expansão .....	99
13.8.5.	Ensaio de Sucção .....	104
13.8.6.	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) .....	107
13.8.7.	Módulo de Resiliência .....	110
13.8.8.	Ensaio de Campo .....	111
a)	Controle de Compactação .....	111
b)	Viga Benkelman .....	112
c)	Rigidez e Módulo de Elasticidade .....	114
d)	Análise da viabilidade econômica da adição do rejeito à camada de base .....	115
<b>13.9.</b>	<b>Resultados da Aplicação dos Resíduos Finos de Pedreira em Fundações .....</b>	<b>119</b>
13.9.1.	Dosagem do Concreto Auto-Adensável (CAA) .....	120
13.9.2.	Estudos para ajuste das pastas .....	120
13.9.3.	Estudos em argamassas .....	123
13.9.4.	Estudos em Concreto .....	125
<b>14.</b>	<b>PRINCIPAIS CONCLUSÕES .....</b>	<b>129</b>
<b>14.1.</b>	<b>Quanto ao mapeamento, cadastramento e caracterização das pedreiras .....</b>	<b>129</b>
<b>14.2.</b>	<b>Quanto à aplicação em pavimentação .....</b>	<b>130</b>
<b>14.3.</b>	<b>Quanto à aplicação em Concreto Auto-adensável .....</b>	<b>130</b>
<b>15.</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>131</b>

## 1. TÍTULO DO PROJETO

**Análise da cadeia produtiva do setor de mineração de rochas para produção de agregados no Estado de Goiás, com vistas ao aproveitamento dos resíduos em aplicações geotécnicas.**

## 2. INTRODUÇÃO

Este relatório apresenta as principais atividades desenvolvidas no Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia, da Universidade de Brasília (UnB), durante os meses de dezembro de 2006 a agosto de 2008, referentes ao Projeto de Pesquisa apoiado pela Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral (Convênio 4800002987/2006-27). Esta pesquisa deu continuidade ao trabalho que vem sendo desenvolvido no Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da UnB, dentro da linha de pesquisa "Geotecnia Aplicada à Mineração".

A mineração é um dos setores básicos da economia do país, contribuindo de forma decisiva para o bem estar e a melhoria da qualidade de vida das presentes e futuras gerações. Esta atividade é fundamental importância para o desenvolvimento de uma sociedade, desde que seja operada com responsabilidade social, estando sempre presentes os preceitos do desenvolvimento sustentável.

O subsolo brasileiro possui importantes depósitos minerais. Partes dessas reservas são consideradas expressivas quando relacionadas mundialmente. O Brasil produz cerca de 70 substâncias, sendo 21 dos grupos de minerais metálicos, 45 dos não-metálicos e quatro dos energéticos. Em termos de participação no mercado mundial em 2000, ressalta-se a posição do nióbio (92%), minério de ferro (20%, segundo maior produtor mundial), tantalita (22%), manganês (19%), alumínio e amianto (11%), grafita (19%), magnesita (9%), caulim (8%) e, ainda, rochas ornamentais, talco e vermiculita, com cerca de 5% (Barreto, 2001). De acordo com o Anuário Mineral Brasileiro (DNPM, 2005), o setor mineral brasileiro é composto por 96% de pequenas e médias minerações, sendo as minas distribuídas regionalmente, com 4,5% na região norte, 8,9% no centro-oeste, 12,4% no nordeste, 28,5% no sul e 45,7% no sudeste, gerando 134.767 postos de trabalhos.

A participação dos tipos de rochas utilizadas na produção de pedra britada é a seguinte: granito e gnaise – 85%; calcário e dolomito – 10%; basalto e diabásio – 5%. O número de empresas que produzem pedra britada é da ordem de 660, sendo responsáveis por cerca de 20mil empregos diretos e 100mil indiretos. Do total das pedreiras, 60% produzem menos que 200mil

t/ano por unidade; 30% produzem entre 200mil t/ano e 500mil t/ano e 10% produzem mais que 500mil t/ano. A areia e a pedra britada caracterizam-se por grandes volumes produzidos relativamente ao consumo de outros insumos para as aplicações a que se destinam. No concreto, por exemplo, os agregados respondem por 80% do volume total. O transporte responde por cerca de 2/3 e 1/3 do preço final dos produtos, respectivamente, o que impõe a necessidade de produzi-los o mais próximo possível do mercado, que são os aglomerados urbanos já que por serem produtos de baixo valor unitário, o custo do transporte encarece o preço para o consumidor final. O maior problema para o aproveitamento das reservas existentes é a urbanização crescente que esteriliza importantes depósitos ou restringe a extração. (Agregados para Construção Civil, 2004).

No estado de Goiás, a história da mineração remonta do período do ciclo da mineração de ouro e outras pedras preciosas, que sustentavam a economia do estado, no início do século XVIII. Com o passar dos anos e com o esgotamento das minas, essa atividade entrou em declínio, cedendo o lugar de principal atividade econômica desenvolvida na região à agropecuária. Atualmente, embora não seja principal atividade econômica, a mineração no Estado continua tendo significativa representação. Bens como amianto, níquel, rocha fosfática, vermiculita, calcário, granito, dentre outros, são regularmente extraídos e/ou integram projetos públicos e privados de estímulo à atividade mineradora.

Segundo dados do DNPM (2006), o estado de Goiás, situado no Centro-Oeste brasileiro, teve uma produção beneficiada de 4.077.608 m<sup>3</sup> rochas britadas e cascalho. Quanto às reservas as maiores são de titânio, calcário e rochas ornamentais. As reservas de rochas britadas e cascalho apesar de sua importância econômica para o estado ainda não foram totalmente estimadas.

Para contribuir com o desenvolvimento sustentável do setor mineral do estado, faz-se necessária a realização de pesquisas que avaliem o potencial das empresas mineradoras, propondo melhorias que visem otimizar o processo produtivo. Tais melhorias tendem a influir diretamente na redução dos resíduos gerados pelo processo de britagem e nos custos relativos à sua destinação, bem como no aumento da eficiência da produção do minério.

Conforme Taveira (1997), a extensão e os impactos causados ao meio ambiente por uma atividade de mineração estão diretamente relacionados com o porte do empreendimento, a localização, as características sociais e ambientais do entorno, as propriedades da jazida e as tecnologias de lavras e tratamentos utilizados.

Em relação à exploração de agregados naturais para serem empregados na construção civil, depara-se hoje com a escassez cada vez mais crescente destes recursos, principalmente àqueles localizados próximos aos grandes centros consumidores. Além disto, a crescente exploração destas jazidas vem gerando a degradação do meio ambiente.

Uma tendência atual no Brasil, ditada pela necessidade do mercado consumidor e pela questão ambiental tem sido o consumo de materiais oriundos do processo de exploração de pedreiras (brita, areia artificial, filler) em substituição total ou parcial às fontes de materiais naturais (cascalho, areia natural, solo). Outro aspecto relevante relativo a esta substituição é a possibilidade de utilização de resíduos oriundos do beneficiamento dos materiais artificiais, proporcionando uma redução dos possíveis impactos ambientais gerados pela produção e estocagem destes materiais.

Segundo Nicholson (1996), as pilhas de resíduos em estoque normalmente geram obstruções visuais e tendem a interferir na paisagem preexistente através da inserção de uma massa de material anteriormente ausente. Silva (2000) em seus estudos sobre a exploração de pedreiras de quartzito na cidade de Pirenópolis (GO) aponta que o efeito da degradação visual é o impacto mais expressivo para as áreas daquela região. Mendes (1999) identifica os tipos de impactos ambientais associados à exploração de pedreiras devido à geração de finos:

- Poluição atmosférica através de emissão de materiais particulados presentes nos depósitos;
- Alterações no regime hidrológico promovendo turvamento, assoreamento e mudanças nas seções das calhas dos cursos de água; trazendo conseqüências praticamente irreversíveis à manutenção de um micro-sistema biológico, danificando o habitat das espécies que dependem deste meio;
- Ocupações indevidas de áreas devido à necessidade de estocagem de resíduos gerados. Muitas vezes, estas estocagens, tendem a esterilizar terrenos que poderiam servir a utilizações mais nobres ou até mesmo promover poluição do solo;
- Ruídos e vibrações gerados durante as explosões, trituração, esmagamento e transporte das rochas;
- Consumo excessivo de água para processar os agregados com perda em certos casos, de aproximadamente 80% do volume de água utilizado no processo.

Diante do exposto, constata-se que a utilização dos resíduos finos de pedreiras em outras atividades industriais propiciaria a redução ou eliminação de alguns dos impactos ambientais relatados por Mendes (1999), contribuindo também para uma maior eficiência do sistema produtivo industrial. Esta possibilidade de utilização tende a proporcionar a agregação do valor econômico pela comercialização do resíduo e reduzir custos energéticos.

Outras vertentes que muito contribuem para a valorização do uso de resíduos de pedreira como matéria prima agregada é comprovada nos trabalhos de Angelim (2000) e Sá (2004). Estes autores verificaram que adições de resíduos nas devidas proporções, em argamassas, concretos e

solos produziram melhorias no comportamento destes materiais, além de proporcionar redução de custo.

Na engenharia rodoviária inúmeras são as pesquisas que apontam as potencialidades do uso de resíduos de mineração e de outros processos industriais na produção de masticos de concreto betuminoso, de bases e sub-base, de concreto compactado a rolo, além da correção, estabilização e reforço de solos (Batalione, 2007).

A escassez de jazidas naturais (solos e agregados) cujas características não se enquadram nas especificações técnicas tradicionais para o uso em pavimentação, aliada a uma legislação ambiental mais austera quanto à concessão de licenças para a exploração de jazidas naturais são também fatores motivadores para a busca e utilização de materiais alternativos.

### **3. PRINCIPAIS OBJETIVOS DO PROJETO**

O presente projeto teve como objetivo principal atuar junto ao setor de mineração (pedreiras) situadas no entorno do município de Goiânia, estado de Goiás, mapeando jazidas, definindo suas potencialidades e propondo sugestões para melhor aproveitamento dos recursos minerais. Adicionalmente, contribuir para o estabelecimento de tecnologias e procedimentos de laboratório para reutilização e redução dos resíduos gerados, avaliando a viabilidade técnica de sua utilização em pavimentação e concreto auto-adensável para fundações.

O projeto tem grande relevância para o fortalecimento dos grupos de pesquisas da instituição de ensino envolvida, proporcionando a disseminação da tecnologia e sua aplicação pelas empresas parceiras do projeto. Ressalta-se, ainda o grande valor desta pesquisa no sentido de solucionar ou minimizar os efeitos da degradação ambiental e da poluição pela possibilidade de implementar um sistema produtivo mais eficiente com redução de custos energéticos e de matéria prima.

Os objetivos específicos da pesquisa foram:

- a) Mapear as empresas mineração (pedreiras) para produção de agregados do entorno da cidade de Goiânia/GO;
- b) Caracterização das jazidas;
- c) Caracterização dos resíduos produzidos pelas mineradoras;
- d) Propor alterações nos planos de lavra para melhorar a produção e reduzir o desperdício e o acúmulo de resíduos nas mineradoras;
- e) Avaliar o potencial dos rejeitos em aplicações geotécnicas, buscando alternativas econômicas para a produção de pavimentos e estacas escavadas.

## **4. PRINCIPAIS ETAPAS EXECUTADAS**

### **4.1. Primeira Etapa**

#### **4.1.1. Mapeamento das empresas**

Esta etapa consistiu do mapeamento das empresas mineradoras situadas no entorno da cidade de Goiânia, definindo seu raio de atuação. Este mapeamento foi realizado com base em levantamento por imagens de satélite, obtidas gratuitamente na internet, e no registro das empresas no Sindicato das Indústrias Extrativas de Pedreiras do Estado de Goiás – SINDIBRITA/GO. Nesta etapa foi de fundamental importância o apoio da Secretaria de Indústria e Comércio do Estado de Goiás, que viabilizou uma reunião realizada do dia 04/07/2007, em Goiânia, para exposição do projeto e apresentação da proposta de trabalho.

#### **4.1.2. Cadastramento e criação de banco de dados**

Com base nos dados de localização e influência foram realizadas visitas às empresas identificadas na etapa anterior para levantamento de dados e alimentação de um cadastro técnico multifuncional. O intuito deste cadastro foi avaliar o volume de produção, os prováveis consumidores e o potencial comercial dessas empresas.

A área de estudo localizou-se no Estado de Goiás, entre as coordenadas geográficas de 16°27'33" e 16°52'36" S de latitude sul e de 49°02'16" e 49°29'54" de longitude oeste.

Selecionou-se uma área aproximada de 2.040 km<sup>2</sup>, dentro de um raio de 37 km do centro da cidade de Goiânia, com a finalidade de mapear as jazidas existentes no entorno.

Foram interpretadas 4 imagens satélites CBERS-2, captadas pelo sensor CCD (Câmera Imageadora de Alta Resolução), que fornece imagens de uma faixa de 113 km de largura, a uma resolução de 20m, disponibilizadas na internet pelo INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais).

Para o processamento da informação foi utilizado o software SPRING versão 4.3.2, desenvolvido pelo INPE. Com o auxílio desse software a imagem foi então processada. Para a classificação supervisionada da imagem segmentada utilizou-se o algoritmo Iseog de classificação por região, disponível no SPRING 4.1. Com o treinamento foram mapeadas 9 (nove) jazidas com ajuda do programa GoogleEarth.

#### **4.1.3. Caracterização dos Maciços**

Realização da caracterização petrológica e do levantamento das características do maciço, para o conhecimento dos tipos de minerais presentes, grau de alteração, presença de falhas e descontinuidades, de modo a intervir nos planos de fogo, otimizar a produção e reduzir o volume de resíduos gerados.

Nesta etapa foram realizadas sondagens rotativas, além da coleta de amostras deformadas e indeformadas. Os materiais coletados foram ensaiados no Laboratório de Geotecnia da UnB. As análises por difração de RX foram realizadas no laboratório de Geologia da UnB.

#### **4.1.4. Estudo para proposta de alteração nos planos de lavra**

A partir da caracterização petrológica e das características do maciço, propôs-se inicialmente estudos de modo a intervir nos planos de fogo das pedreiras, de forma a otimizar a produção e reduzir o volume de resíduos gerados. A proposta do projeto era avaliar o plano de fogo das pedreiras e intervir de modo a otimizá-los quando necessário. Infelizmente, as empresas não se mostraram interessadas em implementar as sugestões. Desta forma, foram realizadas as sugestões, para três das pedreiras cadastradas, no entanto não foi possível verificar a sua eficácia.

### **4.2. Segunda Etapa**

Esta etapa refere-se ao estudo da viabilidade técnica e econômica da reutilização dos resíduos inevitavelmente gerados mesmo após as melhorias propostas na etapa anterior. Subdividiu-se em duas frentes de trabalho: uma responsável pelo estudo de utilização dos resíduos na pavimentação, e outra, utilizando-os como adições em argamassas e concretos para confecção de estacas escavadas.

#### **4.2.1. Caracterização dos resíduos**

Inicialmente realizou-se a caracterização dos resíduos, incluindo ensaios de físicos, químicos e mineralógicos. Estas análises foram realizadas nas amostras coletadas nas empresas selecionadas na etapa anterior, visando identificar sua homogeneidade e propriedades de interesse para as aplicações propostas.

#### **4.2.2. Análise dos Resíduos para Aplicação em Pavimentação**

Nesta etapa foram estudadas composições de solos finos lateríticos argilosos, solo granular e resíduo para serem utilizados em camadas de sub-base e base.

Foi executada ainda nesta etapa um trecho experimental, com a realização de ensaios de campo para avaliar o desempenho do material.

#### **4.2.3. Análise dos Resíduos para Aplicação em Fundações**

Nesta etapa procurou-se estabelecer dosagens ideais do resíduo para confecção de argamassas e concretos, avaliando suas propriedades no estado fresco e endurecido. A partir destes resultados, simulou-se numericamente o desempenho de estacas para diferentes faixas de carregamentos. Para estas simulações foi necessária a realização de ensaios de campo para a determinação de parâmetros do solo, tomando-se como referência o Campo Experimental de Fundações e Ensaios de Campo da UnB. Os ensaios escolhidos para esta etapa foram o SPT (sondagem à percussão) e o CPT (Ensaio de Cone).

#### **4.2.4. Análise de Custo**

Para avaliar a viabilidade econômica da aplicação, foram realizadas análises de custos, comparativamente com os materiais convencionalmente utilizados.

### **5. ASPECTOS DA ÁREA DE ESTUDO**

A caracterização da área de estudo distingue os três meios que devem ser considerados: físico, biológico e sócio-econômico. Inicialmente serão apresentadas expõe características como: localização e acesso, aspectos socioeconômicos, clima, fisiografia, geomorfologia, hidrografia, geologia, geologia estrutural. Essa informação é baseada principalmente no Programa de Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil: Goiânia – Folha SE.22-X-B-IV.

#### **5.1. Localização e acesso**

A área de estudo localiza-se na região sudeste do Estado de Goiás, entre os meridianos 49°04' e 49°30' de longitude oeste de Greenwich e os paralelos 16°27' e 16°52' de latitude sul,

ocupando uma superfície de aproximadamente 2.100km<sup>2</sup>, correspondente ao município de Goiânia e arredores, do padrão cartográfico internacional para a escala 1:250.000 (Figura 1).

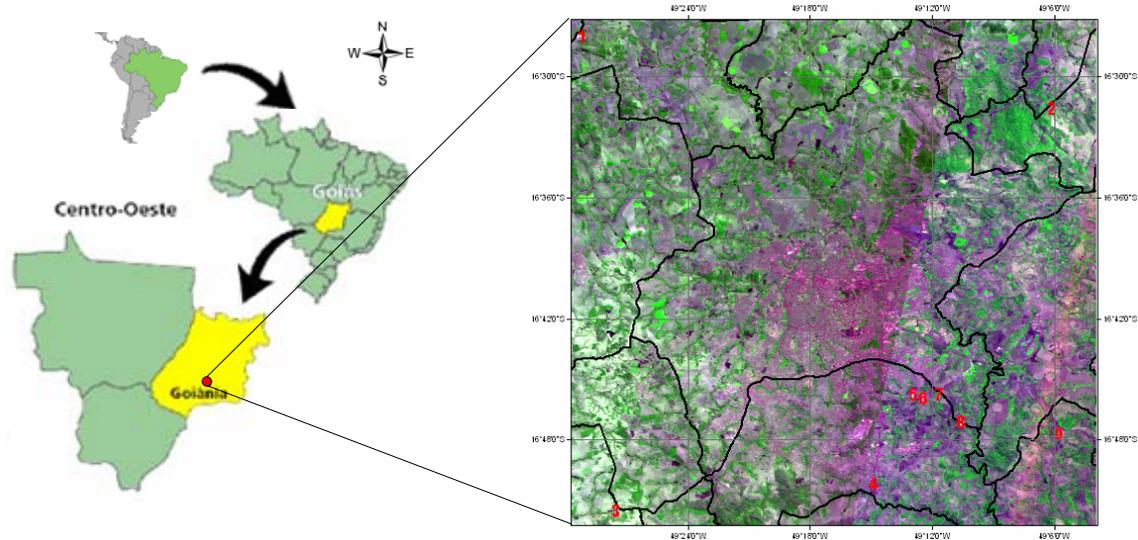


Figura 1. Localização do município de Goiânia e arredores

O sistema viário é constituído por várias rodovias federais, estaduais e vicinais (Figura 2), dentre as quais destacam-se: BR-153 (São Paulo/Anápolis- Belém), BR-60 (Anápolis/Brasília), BR-414 (Anápolis/Niquelândia), BR-352 (Goiânia/Ipameri), GO-070 (Goiânia/Goiás), GO-60 (Goiânia/Iporá), GO-10 (Goiânia/Vianópolis-Luziânia) e GO-80 (Goiânia Nerópolis-Goianésia), as quais facilitam o acesso á cidade de Goiânia. Segundo a Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes –DNIT - Mapa Rodoviário – Goiás 2002.

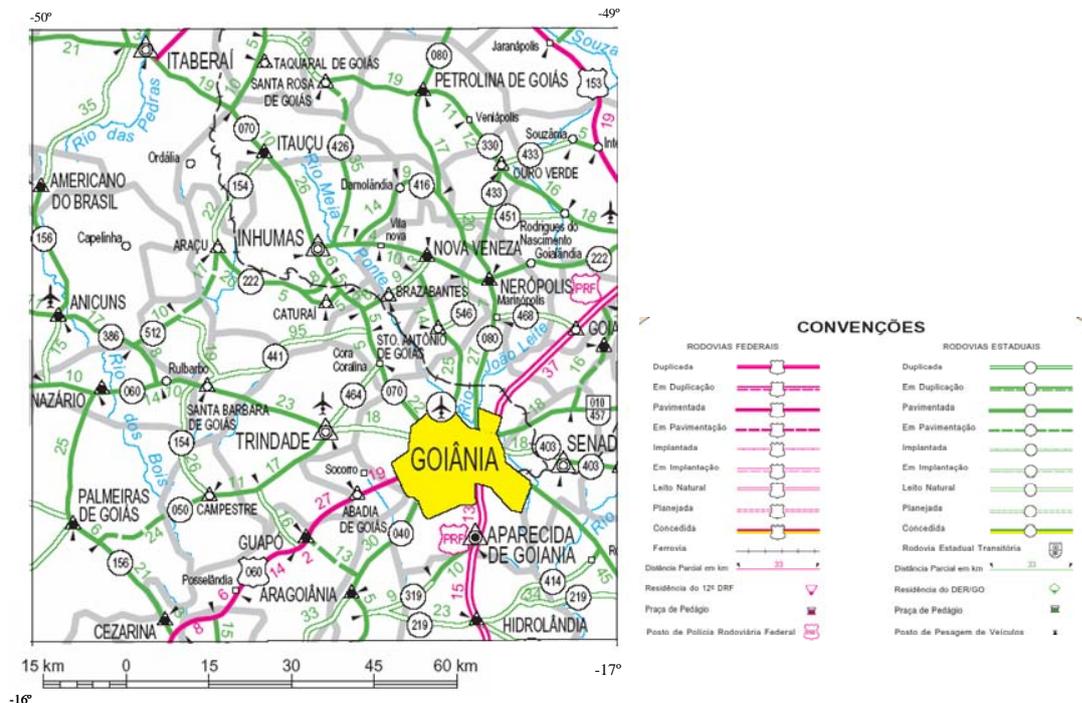


Figura 2. Principais acessos na área de estudo (DNIT)

## **5.2. Aspectos Sócio-econômicos**

As cidades da região dispõem de modestos parques industriais, destacando-se os frigoríficos e os laticínios que, juntamente com a indústria de cerâmica, contribuem para a economia local. Por outro lado, existe na região uma grande demanda de material de construção, (brita, pedra ornamental e areia), bem como de argila para cerâmica.

A agropecuária é a principal atividade econômica, destacando-se a criação de bovinos como a mais importante. As culturas mais praticadas são as de cana-de-açúcar, soja, milho, arroz e mandioca.

Nos últimos anos, os recursos minerais, além de material de construção, registraram alguns garimpos de ouro e talco (desativados). Existem também os jazimentos de manganês e cromita; estes, contudo, com suas principais reservas esgotadas.

## **5.3. Clima, Fisiografia, Geomorfologia e Hidrografia**

O clima da região é do tipo AW, tropical úmido, caracterizando-o duas estações bem definidas: uma seca, que corresponde ao outono e ao inverno, indo de maio a setembro; e, outra, com chuvas, correspondendo ao período de primavera e verão.

A precipitação média anual, da ordem de 1.500mm, concentra-se principalmente entre dezembro e março. Em junho e julho, as precipitações são praticamente nulas. As temperaturas médias são da ordem de 18°C (inverno) e 30°C (verão). A média anual é de 23°C.

A vegetação original, representada por matas tropicais, cerrados e matas-galerias, em sua maioria foi substituída por pastagens e culturas cíclicas, principalmente de cereais. As matas tropicais apresentam-se geralmente em terrenos dissecados, em interflúvios tabulares e colinosos, constituindo-se de espécies arbóreas florestais caducifólias. Os cerrados desenvolveram-se sobre litótipos pré-cambrianos, moldados principalmente em superfícies tabulares e em vastos planaltos rebaixados, com altitudes que variam de 650m a 1.200m. São constituídos por arbustos e árvores baixas, retorcidas, geralmente com casca grossa e suberosa. As matas ciliares ocorrem ao longo das drenagens.

A região em estudo exibe cinco classes de solos (Figura 3), cujas unidades estão relacionadas à diversificação das feições geomorfológicas e das rochas.

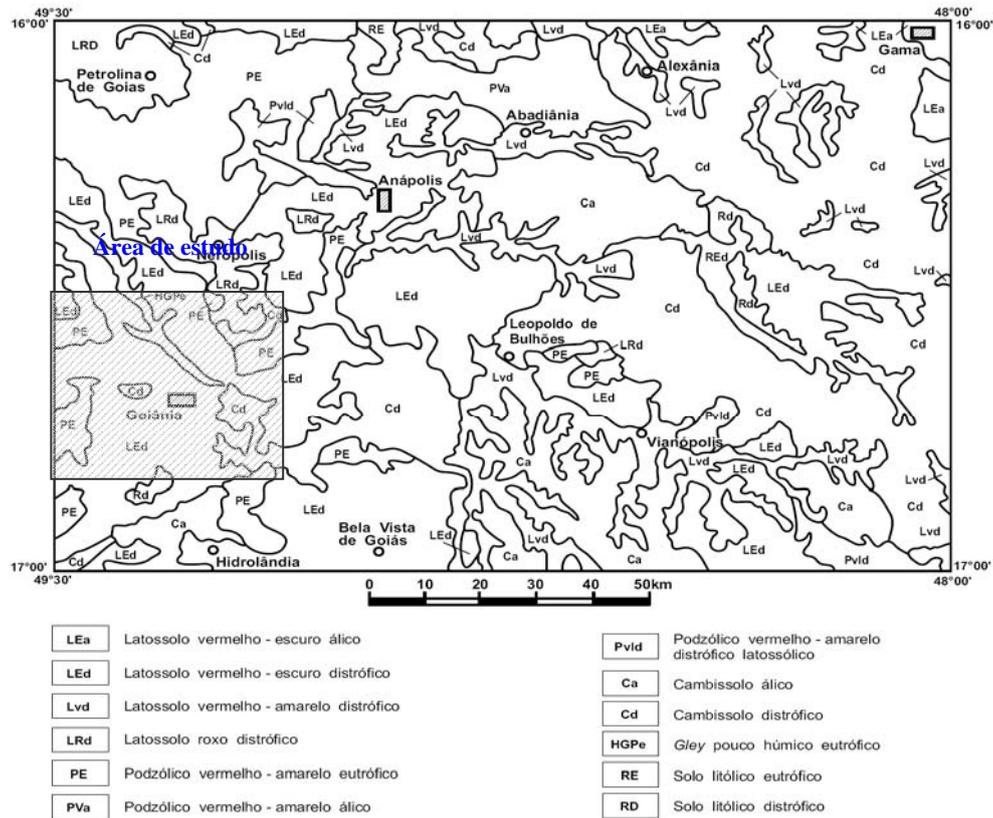


Figura 3. Domínios de solos

Na primeira classe ocorrem latossolos distróficos vermelhos e roxos, e álicos vermelhos, os quais se caracterizam por serem bastante espessos, bem drenados, porosos, friáveis e que ocorrem em regiões de relevo plano a suavemente ondulado. Na segunda, está o solo podzólico, vermelho-amarelo, em geral profundo, bem drenado, que se exhibe em relevo ondulado, suave a forte e com características: eutrófica, álica e distrófica. A terceira classe é formada por cambissolo álico e distrófico, em geral pouco desenvolvido, raso e com o horizonte B incipiente.

A quarta classe é caracterizada por solo tipo gley, pouco úmido, eutrófico, profundo, maldrenado, com forte “gleização”, por causa dos encharcamentos; e desenvolvido ao longo do rio Meia Ponte.

Na quinta e última classe estão os solos litólicos eutróficos e distróficos, os quais são rasos, pouco desenvolvidos, em relevo suave, ondulado a escarpado.

A geomorfologia é reflexo da geologia, tanto no que diz respeito ao tipo de relevo, quanto ao padrão de drenagem e à definição de áreas de erosão e sedimentação.

A área situa-se no domínio conhecido por Planalto Rebaixado de Goiânia caracterizado por extenso planalto rebaixado e dissecado, desenvolvido principalmente sobre rochas do Grupo Araxá. A superfície é mantida por depósitos de material clástico, o que indica a atuação de uma morfogênese seca, que mostra submissão, no passado, a condições climáticas de semi-aridez. Os

processos de pediplanação ocorreram durante o Neopleistoceno, do qual resultaram cotas em torno de 640m.

A rede de drenagem é relativamente densa, a bacia hidrográfica pertencente ao rio Meia Ponte, afluente do rio Paranaíba, tem por principais afluentes os rios Dourados, João Leite, Caldas, Sozinho e Inhumas.

#### **5.4. Geologia**

A geologia, incluindo os aspectos litológicos, estratigráficos, estruturais e sua evolução histórica, representa a base do conhecimento para a caracterização do meio físico de determinada região. A zona de estudo encontra-se na Folha Goiânia SE-22-X-B e está composta por:

##### **5.4.1. Complexo granulítico anapolis-itaucu**

Este complexo define um cinturão de rochas cisalhadas, estabilizadas na fácies anfibolito alto a granulito, e separadas como ortoderivadas (Paio) e paraderivadas (Pais). Nas ortoderivadas destacam-se metagabróides, metabásicas, enderbitos, charnoenderbitos, charnockitos e metapiroxenitos, estes últimos às vezes transformados em serpentinitos, talco xistos e tremolita-talco xistos. Alternando-se com tais litótipos ocorrem os paraderivados, dentre os quais granada gnaisses, biotita-granada gnaisses, biotita-sillimanita-granada gnaisses, cianita-granada gnaisses, granada quartzitos, gonditos e calcissilicáticas.

Às rochas desta unidade são atribuídas idades arqueana e proterozóica inferior.

##### **5.4.2. Complexos Indiferenciados - Associação Ortognáissica-Migmatítica**

É constituída por uma geração de granitóides de filiação calcialcalina, de baixo potássio, composta por tonalitos, com variações locais para granitos e granodioritos, além de migmatitos com enclaves de granulitos.

Recentemente, em trabalho executado pela CPRM para o PLGB (Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil) na região centro-sul de Goiás, folhas Nerópolis, Goiânia, Anápolis, Leopoldo de Bulhões e Caraíba, tais rochas foram denominadas informalmente de Granitóides Gama 1 (G1).

### **5.4.3. Seqüências Metavulcano-sedimentar**

Esta seqüência divide-se em duas unidades: Metavulcânica e Metassedimentar/Mista. O termo Metassedimentar/Mista foi usado por causa das ocorrências de vulcano-clásticas intercaladas na forma de lentes entre os metassedimentos, cujos posicionamentos atuais resultaram de ação tectônica em regime de cisalhamento dúctil, que provocou o imbricamento de corpos via falhamentos contracionais e de laminações entre segmentos crustais de diferentes níveis de profundidade.

### **5.4.4. Unidade Metavulcânica**

É constituída predominantemente por anfibolito e metandesito. O anfibolito exhibe coloração verde-escura, textura porfiroblástica muito fina e estrutura orientada. É constituído essencialmente por hornblenda e pla-gioclásio, tendo por secundários: clorita, epidoto e actinolita. Como acessórios ocorrem: apatita, zircão e allanita, e, ainda, freqüentes disseminações de pirita e calcopirita.

O metandesito exhibe coloração cinza-escura, com níveis descontínuos verde-escuros, textura porfiroblástica com matriz granoblástica muito fina e estrutura orientada. É constituído essencialmente por quartzo, feldspato e hornblenda, tendo titanita por acessório.

### **5.4.5. Unidade Metassedimentar/Mista**

É representada por quartzo-muscovita-biotita xistos de cor cinza, com níveis esverdeados, granulação média e estrutura milonítica foliada. Ocorrem subordinadamente: grafita xisto, muscovita quartzito.

O grafita xisto apresenta cor cinza-escura e estrutura milonítica foliada. É constituído por quartzo, sericita, muscovita e grafita.

Os muscovita quartzitos têm coloração cinza-esbranquiçada, às vezes avermelhada por óxido de ferro.

### **5.4.6. Grupo Araxá**

O Grupo Araxá esta composto principalmente por micaxistos e quartzitos e foram subdivididos em duas unidades:

A Unidade “A” representada por micaxistos a duas micas, finos a grosseiros, com granada, estaurolita, cianita, cordierita e intercalações de quartzitos micáceos finos a grosseiros, xistos grafitosos e anfíbolitos; e a Unidade “B”, constituída por calcixistos com intercalações de calcários.

Com base nos ambientes deposicionais, o grupo foi subdividido em quatro unidades: A, B, C e D. A Unidade “A” seria formada por grauvacas, depositadas em ambiente marinho. A Unidade “B”, representaria uma seqüência psamo-pelítica, sedimentada em ambiente marinho raso/deltaico. À Unidade “C”, corresponderiam sedimentos pelitocarbonáticos, formados em ambiente litorâneo. A Unidade “D” retrataria uma seqüência pelito-psamítica, depositada em ambiente litorâneo de supramaré.

#### **5.4.7. Granitos Sintectonicos - Granitóides Gama 3 (G3)**

Os principais tipos são metagranito a duas micas, metagranodiorito e metadiorito, apresentam-se foliados, milonitizados e controlados por zonas de cisalhamento.

Este tipo de granitóide foi cartografado na Folha Goiânia em apenas oito locais. Ocorre condicionado a zona de cisalhamento dúctil e rúptil-dúctil, com desenvolvimento de foliação milonítica e contatos concordantes bruscos.

Nos biotita-muscovita granitos e granodioritos, os termos dominantes possuem cor cinza-clara e, às vezes, intercalações entre bandas milimétricas claras e escuras. Exibem granulação média, estrutura foliada, textura milonítica localmente preservada e textura granoblástica. São constituídos predominantemente por muscovita, biotita, quartzo, plagioclásio (oligoclásio-andesina) e feldspato potássico (ortoclásio e microclínio).

Vênulas e veios de pegmatitos e de quartzo teriam sido originados pelos eventos que geraram faixas de milonitos e ultramilonitos, assim como os cristais prismáticos de turmalina e de cassiterita, encontrados em concentrados de bateia de algumas áreas em que esses corpos afloram, revelariam estágios magmáticos tardios, com percolação de fluidos ricos em boro e estanho.

#### **5.4.8. Cobertura terciária quaternária**

São coberturas Detrítico-Lateríticas que desenvolveram-se sobre todas as unidades geológicas pré-cambrianas, sendo, entretanto, mais prósperas nos terrenos das rochas do Complexo Granulítico Anápolis-Itaçu.

Constituem solos areno-argilosos avermelhados, semiconsolidados, mal classificados, com espessura superior a 10m, que se apresentam parcialmente laterizados. Esses terrenos são

identificados por superfícies aplainadas e pene-planizadas, que formam as extensas chapadas e chapadões.

#### 5.4.9. Cobertura Quaternaria

Os depósitos aluvionares encontram-se confinados principalmente ao longo dos rios Meia Ponte, João Leite e seus principais afluentes. São caracterizados por sedimentos arenosos, siltico-argilosos e areias com níveis de cascalho.

As areias, bastante exploradas para utilização na construção civil, são predominantemente formadas por grãos de quartzo arredondados ou subarredondados, contendo subordinadamente minerais pesados (magnetita e ilmenita).

Condicionadas às cabeceiras dos córregos, ocorrem pequenas turfeiras, que, em sua maioria, exibem pequenas dimensões e reduzido potencial econômico.

## 6. LEVANTAMENTO POR IMAGENS DE SATÉLITE

Com a finalidade de localizar as pedreiras foram interpretadas partes de quatro imagens de satélites CBERS-2, captadas pelo sensor CCD (Câmara Imageadora de Alta Resolução) que fornece imagens de uma faixa de 113 km de largura, a uma resolução de 20m, disponibilizadas na internet pelo INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), especificadas na Tabela 1.

Tabela 1. Imagens CBERS-2

Orbita_Ponto	Data	Bandas
158_118	2005/09/04	1,2,3,4,5
158_119	2006/09/03	1,2,3,4,5
159_118	2006/08/05	1,2,3,4,5
159_119	2006/08/05	1,2,3,4,5

As imagens CBERS2 possuem 5 bandas, com a primeira variando na faixa do azul (0,45-0,52  $\mu\text{m}$ ), a segunda na faixa do verde (0,52-0,59  $\mu\text{m}$ ), a terceira na faixa do vermelho (0,63-0,69  $\mu\text{m}$ ), a quarta na faixa do infravermelho próximo (0,77-0,89  $\mu\text{m}$ ), e a quinta sendo uma banda pancromática (0,51-0,73  $\mu\text{m}$ ). Para a finalidade desta pesquisa só se utilizaram as bandas 2, 3 e 4.

Foram utilizados os dados cartográficos em formato digital, disponibilizados pelo governo de Goiás mediante o Sistema Estadual de Estatística e de Informações Geográficas de Goiás (SIEG) e os dados disponibilizados pelo Departamento Nacional da Produção Mineral (DNPM), apresentados a seguir:

- a) O mapa geológico da folha Goiânia SE-22-X-B, na escala 1:250.000, disponibilizado pelo SIEG.
- b) O mapa de drenagem da folha Goiânia SE-22-X-B na escala 1:250.00, disponibilizado pelo SIEG.
- c) A base topográfica de folha Goiânia SE-22-X-B na escala 1:250.000, com equidistância de 100m, disponibilizado pelo SIEG.
- d) O mapa geomorfológico da folha Goiânia SE-22-X-B na escala 1:250.00, disponibilizado pelo SIEG.
- e) O mapa de municípios da folha Goiânia SE-22-X-B na escala 1:250.00, disponibilizado pelo SIEG.
- f) O mapa de Títulos minerários do estado de Goiás e DF, disponibilizado pela Diretoria de Outorga e Cadastro Mineiro – DICAM do Departamento Nacional da Produção Mineral - DNPM.

Também foi necessária a escolha de programas voltados para o processamento de imagens e análises estrutural como:

- a) Spring 4.3.2 desenvolvido pelo INPE – Geoprocessamento das imagens satélites.
- b) Programa Google Earth – Visualização de imagens de satélite em 3D.
- c) ArcGIS 9.0 – Utilizando se o modulo ArcMap 9.0, manipulação dos produtos finais de cartografia, assim como suporte do banco de dados.
- d) DIPS 5.0 do Rockscience - Manipulação e análise de dados estruturais

Para os trabalhos de campo foram utilizados:

- Microcomputador com processador 1.73 Ghz
- Câmara Fotográfica Digital – Sony Cyber Shot 6.0 Mega pixels
- GPS eTrex H – Garmin
- Bússola de geólogo, tipo Brunton
- Martelo para Geólogo Estwing
- Perfilometro
- Trena de 20 m

Para o desenvolvimento do trabalho foi utilizado o Spring (Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas). Este SIG é um sistema de domínio público, podendo ser obtido gratuitamente pela Internet ou por CD para os sistemas operacionais Linux e Windows.

O Spring está dividido em quatro módulos de trabalho: Impima, Spring, Scarta e Iplot. Os módulos utilizados foram o Impima que importa e converte imagens para formato GRIB

(Gridded Binnary) e o módulo Spring onde estão as funções do geoprocessamento responsáveis pelas operações referentes às informações espaciais presentes em imagens de satélites, cartas topográficas, cadastrais, temáticas e redes produzindo cartas temáticas.

O módulo Scarta é responsável pelo acabamento das cartas, mas foi utilizada para esta função o programa ArcGIS; com o Modulo ArcMap.

Primeiramente, foi criado um banco de dados (Figura 4), implicando assim na criação de um sub-diretório, dentro do banco de dados ativo, onde estão armazenados. Para esta criação foi necessário definir a projeção do sistema do modelo da Terra, as coordenadas de origem do sistema de referência, além das coordenadas do retângulo envolvente da área de trabalho.

Antes da introdução de qualquer dado no Spring foi necessário criar categorias conceituais do banco de dados, para que cada tipo de dados a ser tratado pelo Spring fosse associado a uma categoria. Cada categoria pertence a um modelo de dados, são elas: temático, numérico, imagem, cadastral e objetos (Figura 5).

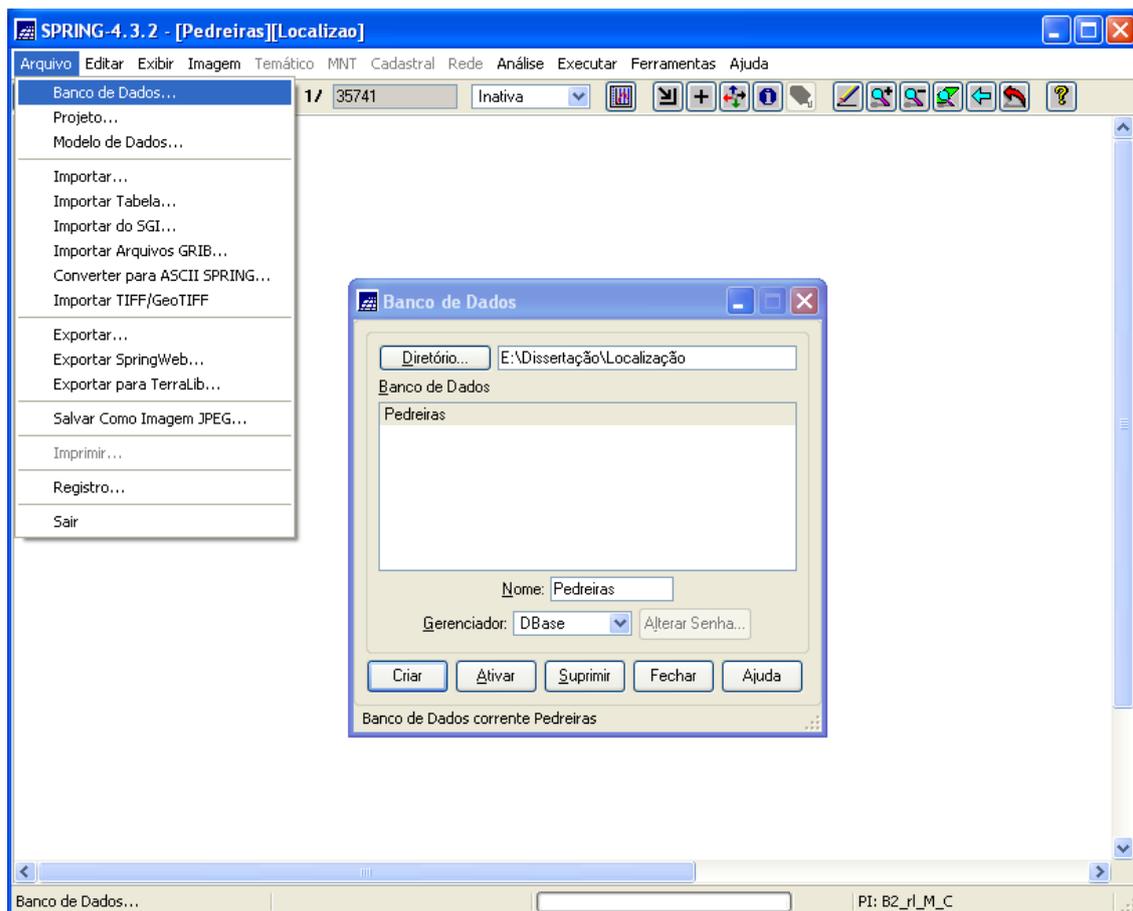


Figura 4. Criação do banco de dados

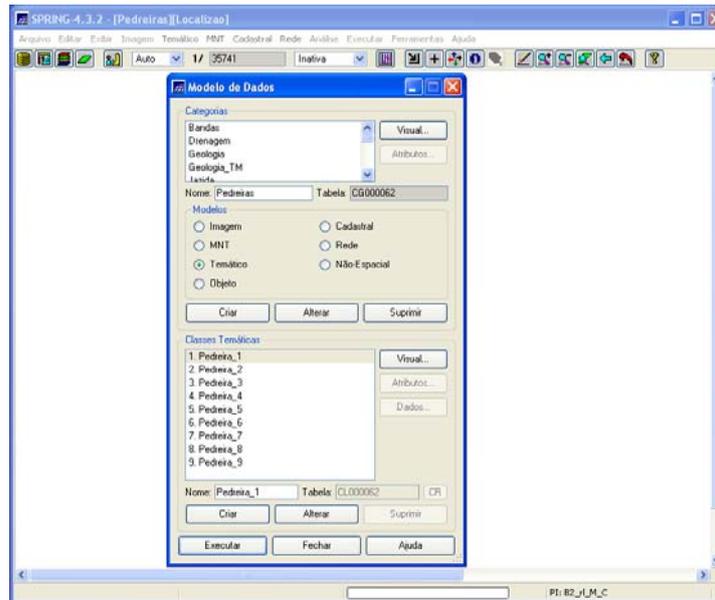


Figura 5. Definição do modelo de dados para a categoria temático

A categoria de Bandas foi criada no modelo Imagens e na categoria Pedreiras foram criadas 9 classes temáticas, logo após foi necessária a criação e a definição do projeto (Figura 6), contendo: a projeção adotada, o Datum utilizado e as coordenadas planas para delimitar a área do trabalho. A Figura 4.4 apresenta a criação e definição do projeto usado nesse trabalho com o nome de Localização, projeção Universal Transverse Mercator – UTM com datum South American Datum 1969 – SAD-69, meridiano central 49° WGr (Greenwich of West-oeste de Greenwich) e coordenadas planas para o retângulo envolvente de: X1= 391638 X2=553627 Y1=8064225 Y2=8286364.

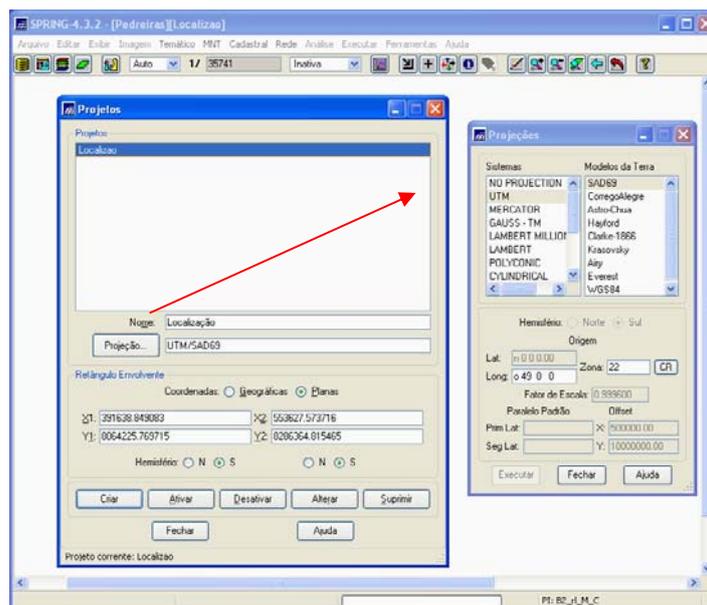


Figura 6. Criação e definição do projeto

Definidas as categorias e o projeto, o próximo passo foi definir os planos de informações que são representações dos mapas que estão na mesma área geográfica de estudo definida pelo retângulo envolvente do projeto (Figura 7).

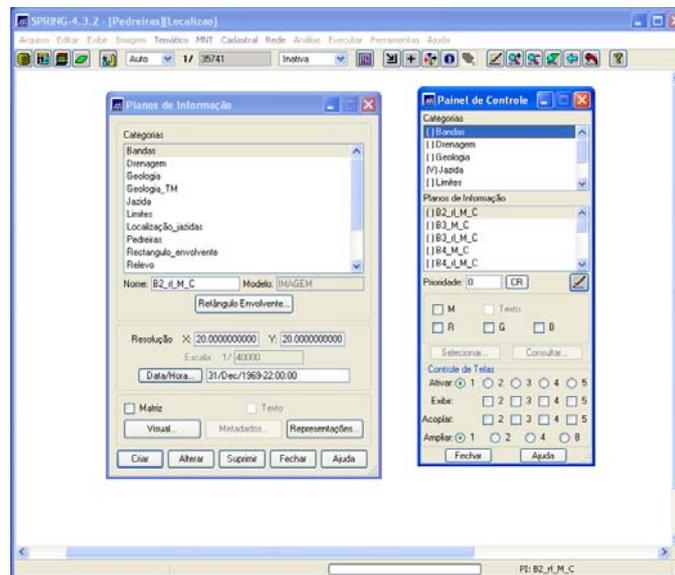


Figura 7. Plano de informação (PI)

Para melhor interpretação da imagem, a composição que melhor se adequou foi a composição colorida RGB 3, 4, 2. As técnicas de processamento digital aplicadas nas imagens foram:

a) Registro de imagem - Georreferenciamento:

Uma vez a imagem em formato GRIB realizou-se o registro da imagem feito para corrigir as possíveis distorções espaciais durante o processo de gravação que provocam uma perda na precisão cartográfica quanto ao posicionamento dos objetos, superfícies ou fenômenos nela representados. A imagem é corrigida segundo um sistema de coordenadas.

As coordenadas da imagem foram relacionadas com as coordenadas geográficas do mapa base de drenagem a escala de 1:250.000 do Sistema Estadual de Estatística e de Informações de Goiás (SIEG). Foram adquiridos pontos de controle identificados de modo preciso na imagem e no mapa para o registro da imagem. Esta correção geométrica foi feita para no módulo Impima. A escolha dos pontos de controle foi feita tendo em conta uma distribuição uniforme destes, com a finalidade de evitar erros por uma ponderação excessiva de algum setor da zona de trabalho.

## b) Realce de contraste

Teve por objetivo melhorar a qualidade das imagens sob os critérios subjetivos do olho humano. Foi realizado um contraste linear, que consiste numa transferência radiométrica nos “pixels” para aumentar a discriminação visual dos objetos presentes na imagem. Esta transferência radiométrica é realizada com ajuda de histogramas, que são manipulados para obter o realce desejado (Figura 8).

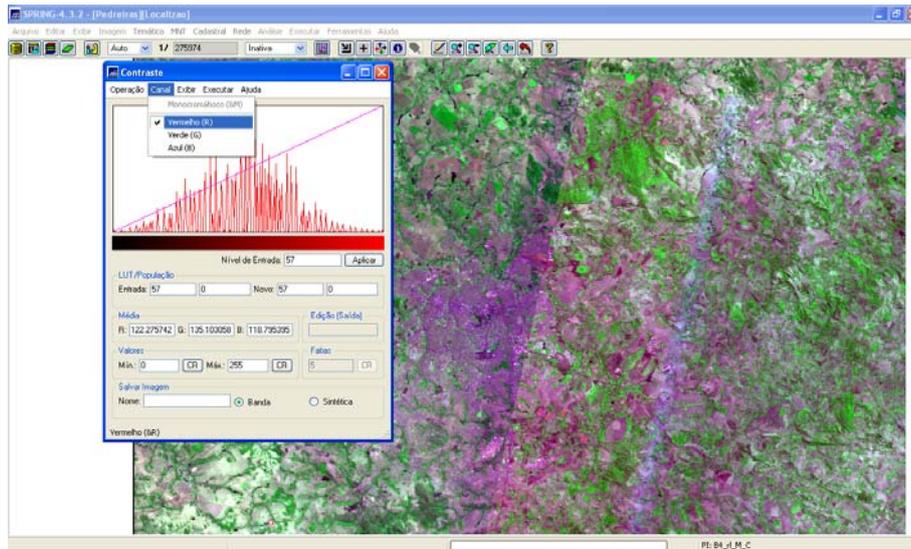


Figura 8. Realce da imagem

## c) Operações aritméticas

Nesta operação utilizaram-se duas bandas (B4/B3) de uma mesma área geográfica, para obter o índice de vegetação. Realizou-se a operação "pixel" a "pixel", através de uma regra matemática definida, tendo como resultado uma banda representando a combinação das bandas originais. Esta operação foi feita com um fator de ganho de 50 (multiplicativo) ou "off-set" de 100 (aditivo), para melhorar a qualidade de contraste da imagem. A definição destes valores depende dos resultados (Figura 9).

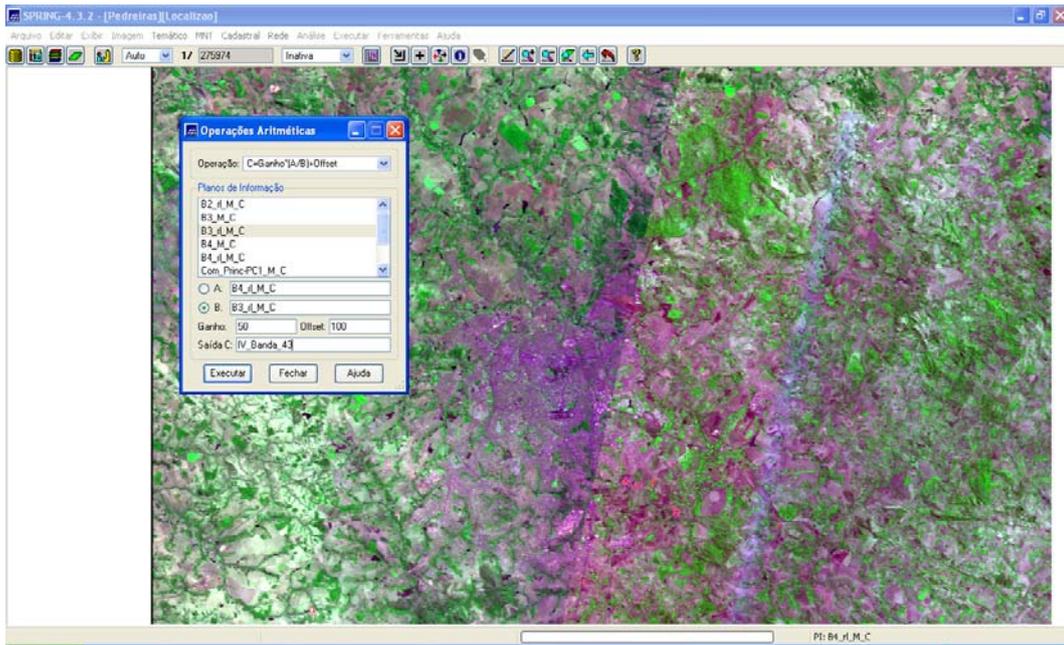


Figura 9. Índice de vegetação

#### d) Filtragem

Os filtros servem para suavizar ou realçar detalhes da imagem. Foi utilizado um filtro linear passa-baixa numa vizinhança de dimensão 3x3.

#### e) Componentes principais

Componentes principais é uma técnica de realce que reduz ou remove esta redundância espectral, ou seja, gera um novo conjunto de imagens cujas bandas individuais apresentam informações não-disponíveis em outras bandas. Utilizaram-se as bandas 2, 3 e 4, bem como o índice de vegetação gerado anteriormente.

#### f) Segmentação da Imagem

Para a segmentação da imagem utilizou-se o método de crescimento por regiões, onde somente as regiões adjacentes espacialmente são agrupadas. Escolheu-se o limite de similaridade 30 (para valores menores se apresentam polígonos muito pequenos e o contrário para valores superiores) e o tamanho mínimo da área de cada região igual a 40 pixels (Figura 10).

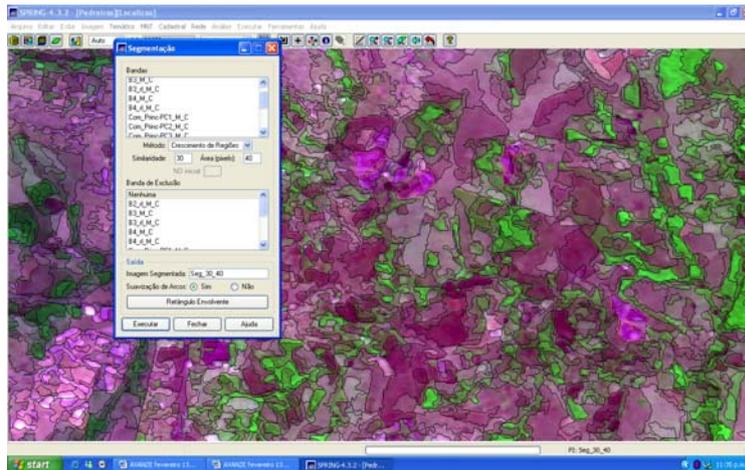


Figura 10. Segmentação da imagem

g) Classificação supervisionada por região

Para a classificação supervisionada da imagem segmentada utilizou-se o algoritmo Ioseg de classificação por região, o classificador utilizado foi por treinamento e com ajuda do GoogleEarth se conseguiu delimitar nove pedreiras em fase de lavra (Figura 11).

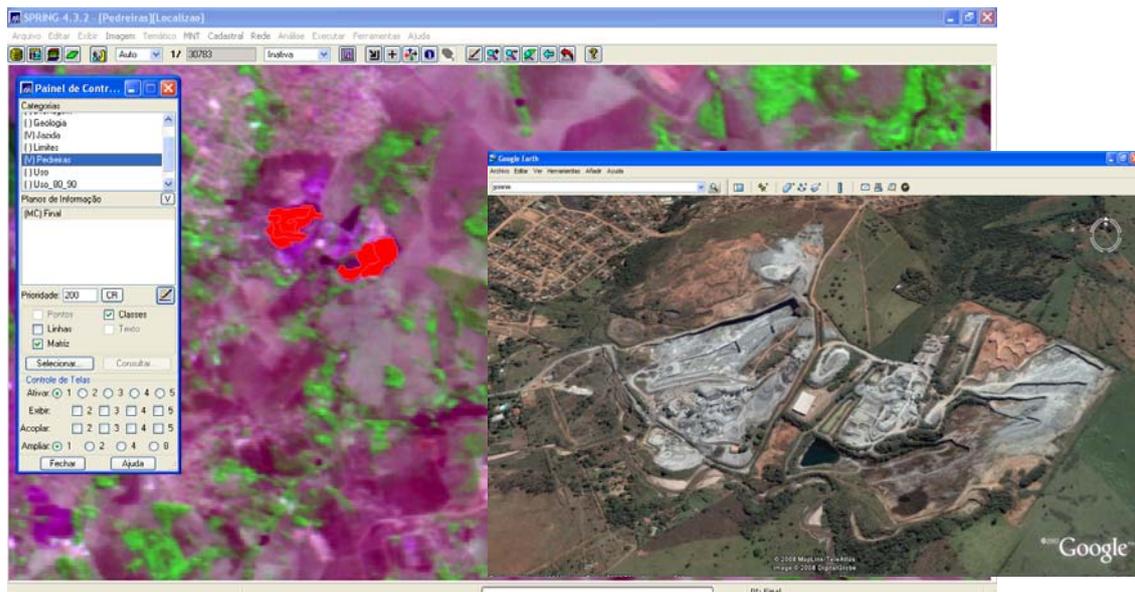


Figura 11. Ajuda do GoogleEarth na identificação das pedreiras

Finalmente, obteve-se o mapa preliminar de localização de pedreiras e, em seguida, os polígonos das áreas foram exportados para o ArcMap 9.0.

## **7. VERIFICAÇÃO E VISITA ÀS PEDREIRAS**

Após a classificação da imagem, realizou-se trabalho de campo para obter maior confiabilidade na identificação de cada área o que levou ao planejamento de roteiros diferentes (realizados em diversos dias).

Foram visitadas todas as áreas mapeadas para verificar se as coordenadas medidas com o GPS, em campo, concordavam com aquelas obtidas pelo programa.

Alguns locais, como a área 6, identificada como única, no trabalho de campo comprovou serem duas pedreiras que ficaram muito próximas. Já no caso da área 2, comprovou-se que se tratava de uma barragem e não de uma pedreira, daí a importância das visitas.

Por tanto, teve-se que repetir o processamento digital na parte de classificação por treinamento a fim de corrigir a distribuição das pedreiras.

Foi elaborada uma ficha cadastral (Anexo I) contendo informações relativas à identificação da pedreira, dados funcionais, geologia e reservas, método de exploração e produção de agregados e resíduos. Esta ficha foi entregue por ocasião da primeira visita ao responsável pela pedreira, sendo solicitado o preenchimento e envio por meio eletrônico.

## **8. CARACTERIZAÇÃO DO MACIÇO**

O trabalho de campo realizou ainda o levantamento geomecânico de algumas das pedreiras, sendo escolhidas as pedreiras 1 e 6 para caracterização dos maciços rochosos e obtenção das características que apresentam cada afloramento. Foram realizadas sondagens rotativas e coleta de amostras das rachas para os ensaios em laboratório. Estas informações serviram de base para elaboração do plano de fogo.

Para realizar o levantamento geomecânico foi adotado o mapeamento por janelas de amostragem. Inicialmente, foi observada a quantidade de famílias por janela e das demais características:

- Dip/dir Direction: medido com a bússola
- RQD: estimado com a trena
- Resistência à compressão uniaxial: estimado com o martelo para geólogo
- Percolação: observação visual
- Alteração: observação visual
- Persistência: medido com a trena
- Abertura: medido com a trena
- Rugosidade: medido com o perfilometro

- Preenchimento: observação visual
- Espaçamento: medido com a trena

Foram caracterizadas 3 janelas para cada pedreira como mostram as Figuras 12 e 13.



Figura 12. Localização das janelas de amostragem – Pedreira 1



Figura 13. Localização das janelas de amostragem – Pedreira 6



Figura 14. Medição da rugosidade com o perfilômetro

Para realização das sondagens rotativas foi contratada uma empresa especializada em sondagens e realizado o acompanhamento do serviço pela equipe executora do projeto. Os testemunhos foram adequadamente acondicionados em caixas de madeira, identificadas por furo.

Foram coletados os blocos amostrais das duas pedreiras para realização dos ensaios de resistência a compressão uniaxial e resistência à tração, seguindo as norma ASTM D 2938 e a ISRM 78, respectivamente.

Foram preparados três corpos de provas como mostram as Figuras 15 e 16.



Bloco de amostra perfurado



Amostra A



Amostra B



Amostra C

Figura 15. Preparação dos corpos de prova



(a)



(b)

Figura 16. (a) Montagem do equipamento para a realização do ensaio; (b) Montagem terminada para a realização do ensaio



(a)



(b)

Figura 17. (a) Corpos de mostras prontas para a realização do ensaio à tração; (b) Vista do equipamento para o ensaio à tração

## 9. PROPOSTAS PARA PLANO DE FOGO

O processo produtivo das pedreiras pode ser dividido em três etapas básicas. A primeira é a etapa de lavra do bem mineral propriamente dito. O processo de produção tem início com a remoção do capeamento ou solo residual que em alguns casos cobre a rocha sã. Após a limpeza do terreno este material estéril é depositado em locais denominados “bota-fora”. Em seguida vem a fase de perfuração da rocha, com furos variando em diâmetro e profundidade. Estes furos são feitos por perfuratrizes de carreta e marteletes pneumáticos. A escolha do modo de perfuração depende da lavra e da produção da empresa. Outro detalhe é a inclinação dos furos, cujos ângulos variam de 15° a 20°. Após a perfuração é feito o carregamento do furo com explosivo e o desmonte da bancada, operação denominada de fogo primário. Para esta operação é necessário um “Plano de Fogo” previamente elaborado sob a supervisão de engenheiros com experiência em planejamento de lavra. A etapa consiste no carregamento dos furos com explosivos previamente selecionados e dentro de especificações técnicas condizentes com o melhor desempenho e segurança. Carregados, os furos são ligados por cordéis detonantes e ou acessórios de iniciação pontual e, posteriormente, iniciados e detonados.

Após as detonações, com o material desagregado na praça de lavra ou na bancada inferior, procedem-se às etapas de carregamento, transporte e desmonte secundário. O carregamento é feito por máquinas carregadeiras que fazem o enchimento dos caminhões fora-de-estrada para que o material seja levado até a planta de beneficiamento. Os blocos de dimensões maiores que a capacidade dos equipamentos de beneficiamento instalados são novamente fragmentados através “fogacho” (“fogo secundário”) ou um equipamento montado em escavadeira, chamado rompedor hidráulico, produzindo blocos menores que podem ser processados pelos britadores.

Na exploração de rocha industrial são realizadas na frente de desmonte detonações com o intuito de proceder ao arranque do minério. A realização destes desmontes obedece a determinados critérios e fatores que determinam a concepção e eficiência da mesma. Quando existe compartimentação geológica é indispensável introduzir a sua presença na previsão da fragmentação, em virtude das descontinuidades dos maciços rochosos serem responsáveis por distribuições irregulares da energia explosiva, quer absorvendo, quer dispersando as ondas da explosão através de fendas pré-existentes na vizinhança dos furos. O diâmetro das cargas explosivas deve ser tão próximo quanto possível do diâmetro dos furos, no caso de explosivos encartuchados, não deve ser nem tão pequeno que impeça o desenvolvimento completo da detonação, nem tão grande que possa originar vibrações, sopros exagerados, ou mesmo o fenômeno da sobrefraturação da rocha remanescente.

Para o estabelecimento do diagrama de fogo procurou-se atender aos seguintes fatores:

- Produção por desmonte
- Diâmetro do furo
- Comprimento do furo
- Subfuração
- Inclinação do furo
- Distância (afastamento) à face livre
- N° de furos
- Espaçamento entre furos
- Tamponamento
- Carga específica
- Consumo específico

O diâmetro do furo foi fixado a partir das propriedades da rocha a ser desmontada, do grau de fragmentação pretendido, da altura da bancada, e do tipo de equipamento disponível. Após a seleção do diâmetro do furo, dimensionou-se o comprimento mais adequado para o diâmetro escolhido e para as condições existentes, tendo em consideração a inclinação destes, a altura da bancada e a subfuração. A subfuração, variou com a distância à face livre e inclinação dos furos, de modo a facilitar a execução do desmonte.

O uso de furos inclinados, como uma prática bastante comum nas detonações, foi um fator determinante no estudo uma vez que apresenta algumas vantagens, tais como:

- Bancadas mais seguras
- Melhor fragmentação
- Maior produção
- Diminuição do consumo de explosivo

- Menores vibrações

O ajustamento da distância à face livre e o espaçamento entre furos visou melhorar os resultados de fragmentação e arranque da rocha e, conseqüentemente, se traduzir em uma diminuição do consumo específico de explosivo.

Nos diagramas de fogo a céu aberto a energia do explosivo necessária para que se produza a ruptura da rocha não é constante em toda a altura da bancada. Desta forma, as tensões libertadas pela detonação devem ser superiores à resistência da rocha ao longo da bancada, especialmente na sua base. Por tal razão, a carga de fundo foi dimensionada para garantir a maior energia da carga de coluna, considerando a altura da bancada. Outro aspecto considerado foi a folga (relação entre os diâmetros dos furos e o diâmetro das cargas explosivas) considerada o mais próximo possível da unidade, de modo a contribuir para a adequada compactação do explosivo do furo. O consumo específico foi definido como a relação entre o peso de explosivo utilizado na pega de fogo e o volume total de rocha desmontada. Neste trabalho foram utilizadas planilhas de cálculo do Excel<sup>®</sup>, baseadas no trabalho do Eng<sup>o</sup> Luciano Alves de Souza.

## **10. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS PRODUZIDOS PELAS PEDREIRAS**

O uso de tecnologias e de materiais mais viáveis economicamente e ecologicamente está se tornando uma necessidade ímpar para o desenvolvimento sustentável mundial. Depara-se hoje com inúmeras pesquisas e obras que utilizam a tecnologia de reciclagem de materiais e produtos, visando agregar valores econômicos de produção bem como reduzir a degradação ambiental.

Na engenharia rodoviária são muitos os projetos de pesquisas que apontam à viabilidade técnica e econômica do uso de agregados reciclados e de resíduos, sejam eles oriundos da construção civil, indústria siderúrgica, usina termoeletrica, mineração e outras.

De uma maneira geral os resíduos gerados durante o processo mineral tem suas características atreladas ao processo de extração e beneficiamento do minério.

As pedreiras selecionadas na etapa anterior desenvolvem atividades de exploração mineral na região a mais de 20 anos, produzindo agregados graúdos (brita 2, brita 1 e brita 0), areia artificial e o resíduo. Dependendo da geologia da rocha, o processo de obtenção dos resíduos ocorre por peneiramento ou por lavagem do pedrisco.

Em relação ao processo de exploração mineral, verifica-se a utilização da técnica de lavra à céu aberto na exploração da mina. Inicialmente, são realizados processos de limpeza e decapeamento da camada vegetal e do solo, que cobre a superfície da rocha. O desmonte do

máquina rochosa é feito através do processo de detonação, ocorrendo quase que diariamente. Foram observadas em algumas pedreiras perfis geológicos alterados, o que obriga as empresas a elaborar um plano de extração em função do produto final.

Após detonação, as rochas são conduzidas em caminhões fora de estrada para o complexo de britagem, passando posteriormente por um britador primário e, posteriormente, por mais um ou dois estágios de britagem. Os agregados graúdos e miúdos produzidos são submetidos a um processo de peneiramento e lavagem, onde inicia-se a separação dos resíduos finos destes agregados.

Para identificar os materiais produzidos pelas pedreiras cadastradas na fase anterior, foram realizadas coletas de amostras de todos os materiais produzidos pelas pedreiras. Em cada uma delas, as coletas dos materiais britados e dos resíduos foram realizadas em pontos distintos das pilhas de estocagem e, no caso dos resíduos, a coleta foi realizada em pontos distintos, tanto na pilha quanto na barragem de armazenamento, para se avaliar a homogeneidade dos resíduos gerados no processo.

## **11. USO DE RESÍDUOS DE MINERAÇÃO EM PAVIMENTAÇÃO**

Uma tendência atual, ditada pela necessidade do mercado, tem sido a produção e o consumo de produtos oriundos do processamento de britagem de rochas, ou seja, aproveitamento de areia artificial, do pó de pedra e do filler. A escassez das fontes naturais de areia e pedregulho (cascalho), o seu alto custo ambiental e de transporte (dois terços do valor do produto) e a existência de uma legislação ambiental cada vez mais rígida são motivos que contribuem para esta crescente tendência.

Na área da engenharia rodoviária e pavimentação inúmeras pesquisas apontam cada vez mais as potencialidades dos rejeitos de mineração na produção de mástiques de concreto betuminoso.

Espósito (2000) considera resíduos os materiais resultantes do processo de beneficiamento, a que são submetidos os minérios, visando extrair os elementos de interesse econômico. Estudando o uso de rejeito de minério de ferro aplicado a aterro hidráulico, a autora caracterizou geotecnicamente os resíduos das pilhas do Xingu e Monjolo das Minas da Companhia Samitri Mineração S.A., em Minas Gerais.

Mendes (1999) apresenta em seu estudo, que os resíduos de pedreiras de Basalto, no Estado de São Paulo, são caracterizados por apresentarem: formas cúbicas, textura superficial rugosa, mineralogia composta por piroxênios, feldspatos, magnetita e anfibólio, com peso específico absoluto de 30,1 kN/m<sup>3</sup>. Analisou o uso desses resíduos em substituição parcial e total de areias naturais, na produção de pavimentos executados com a tecnologia do concreto compactado a rolo,

com diferentes tipos de dosagens, constando que a substituição demonstrou-se viável tecnicamente e economicamente.

Ribeiro (2000) ao estudar rejeitos de minério de ferro da Mina de Morro Agudo da Companhia Samitri em Minas Gerais aplicados a construção de barragens de aterro hidráulico relata que os mesmos possuíam características não coesivas por isto tendem a ser amplamente utilizado como material de construção da própria barragem.

Alecrim et al (2005) estudaram as potencialidades do uso de rejeito de quartzito na produção de sub-base e base de pavimentos flexíveis. Utilizando diferentes dosagens entre solos lateríticos da região sudoeste de Minas Gerais com rejeito granular de quartzitos, os pesquisadores comprovaram que a proporção de 60% de rejeito e 40% de solo apresentou o melhor desempenho relativo aos ensaios de Índice Suporte Califórnia (CBR) e de Módulo Resiliente (MR) com respectivos valores de 84% e de 700 MPa.

Conde (2006) comprovou o potencial do uso de rejeitos de pedra de Ardósia na produção de Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ) no estado de Minas Gerais. Através dos ensaios estabilização Marshall, Tração por Compressão Diametral, Abrasão Los Angeles e outros, o autor concluiu que é possível aplicar os referidos rejeitos na produção de CBUQ, aliando redução de custo com preservação ambiental.

Neste contexto, a iniciativa de se reutilizar os rejeitos de pedra como materiais de construção em obras civis representa uma importante medida para reduzir os impactos negativos da atividade mineral. Destaca-se, no entanto, que o complexo comportamento geotécnico destes materiais acentua a necessidade de um amplo programa de investigação. Nesta etapa da pesquisa, procurou-se avaliar o potencial de utilização dos resíduos finos de pedra, escolhendo inicialmente os resíduos gerados pela Pedreira 1. A escolha deu-se em função da necessidade de produzir misturas (solo + rejeito), que viessem a tornar-se economicamente viáveis no caso de uma futura utilização deste material em programas de pavimentação urbana, considerando principalmente a distância de transporte e em decorrência da escassez de jazidas de materiais naturais na região desta pedra.

Além dos resíduos, nesta etapa da pesquisa, foram utilizados três solos distintos: solo da cidade de Caturai, obtido no residencial Jardim Noroeste, distante de 1,7 km da Pedreira 1; solo da cidade de Goianira, obtido no Residencial Cora Coralina, distante de 21 km da pedra; e solo da cidade de Inhumas, obtido no Residencial Santa Bárbara, a uma distância de 11,7 km da pedra. Além de solos da região, utilizou-se ainda um cascalho proveniente de uma jazida localizada a 25 km do empreendimento imobiliário Residencial Santa Bárbara, na cidade de Inhumas, que serviu como referencial nos ensaios de desempenho das misturas solo-resíduo.

A pedreira selecionada desenvolve a atividade de exploração mineral na região a mais de 20 anos, com produção de agregados graúdos (brita 1 e brita 0), areia artificial e o resíduo, provenientes do beneficiamento de uma rocha granítica.

Nesta pedreira, os finos são levados a um equipamento denominado de hidro-ciclone (Figura 18) onde ocorre a separação final, sendo os mesmos conduzidos, por processo hidráulico, até uma barragem. O resíduo depositado na barragem sofre um processo de secagem natural, pela exposição direta ao ar, sendo depois conduzido às pilhas de estocagem.



Figura 18. Hidro-ciclone e pilha de resíduo da Pedreira 1

A proposta de investigação do potencial desse resíduo como elemento de adição, visando à estabilização de solos e um possível uso em camadas de pavimentos urbanos de tráfego leve, iniciou-se por uma caracterização física, química e mineralógica dos materiais empregados (resíduo, solo), e pela caracterização física das composições (solo + adição de resíduo).

Avaliou-se posteriormente o comportamento mecânico de todas as composições (solo, solo + resíduo, solo + resíduo + cal) através do ensaio de Índice Suporte Califórnia (CBR tradicional e em miniatura) e pela expansão. Os solos naturais e as composições (solos + resíduo) que apresentaram melhores e piores desempenhos em relação ao comportamento mecânico foram submetidas à realização de ensaios não convencionais. Assim foram avaliadas as estruturas através do MEV, o módulo de resiliência e a sucção.

Foram executadas ainda duas pistas experimentais construídas com os solos pesquisados da cidade de Inhumas; sendo uma executada com adição de resíduo nas camadas do pavimento e a outra sem adição. As pistas encontram-se localizadas na cidade de Inhumas (GO).

O pavimento foi constituído de camada de subleito e ou reforço, camada de base, imprimação em asfalto diluído CM-30 (taxa de 1,0 a 1,1l/m<sup>2</sup>), revestimento betuminoso tipo tratamento superficial duplo com o uso de emulsão RR 2C ( taxa 3,1l/m<sup>2</sup>) com espessura 2,5 cm .

Toda a construção da pista experimental foi acompanhada por ensaios de controle de compactação e umidade, determinação das taxas aplicação de material betuminoso, sendo posteriormente medidas as deflexões no pavimento com o uso da Viga Benkelman e a determinação do Coeficiente de Rigidez e do Módulo de elasticidade da base com o uso do aparelho geoguage.

Após avaliação técnica do uso do resíduo fino de pedreira na produção deste pavimento foi feita a análise da viabilidade econômica para a produção deste pavimento urbano de volume de tráfego leve.

### **11.1. Metodologia utilizada nesta etapa**

A proposta de metodologia para o desenvolvimento desta etapa procurou primeiramente investigar isoladamente as características físicas, químicas e mecânicas dos solos e do resíduo, estudando posteriormente as características físicas e o comportamento mecânico das composições.

As proporções de misturas entre os solos e o resíduo inferiores a 35%. Teores superiores a estes, não conduziam a um bom desempenho mecânico das composições para os estudos até então desenvolvidos. Neste sentido, definiu-se pelas adições dos percentuais de 15, 25 e 35% de rejeito em relação ao peso do solo.

Em relação à energia de compactação adotada, optou-se pela utilização do Proctor intermediário para todas as amostras que apresentavam características granulométricas de solo fino, visando obter melhores parâmetros de resistência; e pela energia do Proctor intermediário e modificado para as composições que apresentaram características granulométricas granulares, seguindo recomendações tradicionais.

Quanto ao estudo relativo ao comportamento das composições mediante a adição de cal hidratada, optou-se pela adição de 2 e 4%, em peso. Estes teores mais reduzidos buscaram reduzir os índices de expansão das composições, além de resultados mais apreciáveis nos valores de CBR das composições, aliados a um menor custo.

Após estas investigações, foi necessária a realização de estudos complementares, através de ensaios não convencionais em algumas composições de solos naturais e com adição de rejeito. Estas simulações tiveram como objetivo avaliar os mecanismos que propiciaram as alterações percebidas no comportamento mecânico destas composições. Foram realizadas, a análise da microscopia eletrônica de varredura (MEV), a determinação do Módulo de Resiliência, e o ensaio de sucção pelo método do papel filtro.

Completando a investigação técnica, foram realizados ensaios de campo em duas pistas experimentais (com e sem o uso do rejeito), com intuito de comprovar os efeitos da adição do rejeito na estrutura e no desempenho do pavimento.

Partindo desta proposta, a metodologia foi dividida em quatro fases:

#### **a) Investigação Preliminar de Laboratório dos Materiais Pesquisados**

Inicialmente fez-se a coleta do rejeito. Dentro da barragem e na pilha, em pontos e profundidades distintas, num total de sete amostras. A profundidade da coleta variou entre 0,5 e 2,0 m, quando realizada na barragem; e numa profundidade máxima de 0,5 m, quando realizada na pilha. Na barragem, coletou-se amostra em vários pontos, perto da entrada da barragem, no centro e na saída (Figura 19).

A proposta de se realizar a coleta de amostras em diferentes pontos da barragem e da pilha foi em decorrência das orientações de Ribeiro (2000), para avaliar a heterogeneidade ou homogeneidade do material, em relação ao ponto de coleta.

Em relação aos solos naturais finos, a coleta foi realizada em áreas dentro das vias de tráfego, localizadas nos empreendimentos imobiliários, no leito natural da via. A profundidade máxima da coleta atingiu a 1 m em relação à cota do terreno natural. Foram coletados dez sacos de amostras para cada material.



Figura 19. Coleta de amostra do rejeito, realizado dentro da barragem

A coleta do solo granular, utilizado na pesquisa, foi realizada nas pistas experimentais, cidade de Inhumas. A mesma ocorreu após o lançamento e espalhamento do solo, sobre a camada de subleito. Neste processo de coleta foram obtidos 30 sacos de amostras.

As amostras de rejeito e de solos foram encaminhadas ao laboratório de Mecânica dos Solos, onde após secagem, sob proteção da luz solar, foram preparadas para os ensaios de caracterização e de compactação conforme a NBR 6457 (ABNT, 1986).

As Figuras 20 e 21 ilustram o processo de secagem dos solos e do rejeito no laboratório.



Figura 20. Secagem das amostras de solos no laboratório



Figura 21. Secagem do rejeito

Após a preparação, as amostras foram submetidas aos ensaios de caracterização física:

- Análise granulométrica conforme NBR 7181 (ABNT, 1984), com e sem o uso de defloculante. Este último procedimento visava avaliar a cimentação das partículas sólidas, devido à presença de óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio nas amostras;
- Determinação da massa específica NBR 6508 (ABNT, 1984);
- Determinação do limite de plasticidade conforme NBR 7180 (ABNT, 1984);

- Determinação do limite de liquidez conforme a NBR 6459 (ABNT, 1984);

Após a realização dos ensaios de caracterização convencionais foi realizada a classificação dos solos conforme as metodologias propostas pelo Transportation Research Board (TRB) e pelo Sistema Unificado (SUCS).

As amostras de solos foram então submetidas aos ensaios de classificação da metodologia Miniatura Compactada Tropical (MCT); solo compactado em equipamento miniatura (MINI-MCV) conforme a ME 258 (DNER, 1994) e Perda de Massa por Imersão conforme a ME 256 (DNER, 1994). A Figura 22 ilustra o ensaio de perda de massa por imersão, realizado para determinar o coeficiente PI, utilizado na classificação MCT.

Para melhor caracterizar o rejeito e os solos foram realizados estudos para a determinação da composição química e mineralógica. Foram enviadas, ainda, realizados ensaios de difração por Raios-X. Este estudo objetivou a determinação e identificação dos principais minerais presentes nestas amostras.



Figura 22. Ensaio de Perda de Massa por Imersão

Em relação à técnica de análise por Raios-X, ressalta-se que o limite de detecção do método nas condições usuais de trabalho é de 5%, ou seja, minerais cujo teor presente na amostra, encontra-se a uma percentagem inferior à 5%, não foram detectada durante esta análise. Todas as amostras foram inicialmente submetidas no difratômetro de raios-X pelo método do pó não orientado, ou seja análise integral da amostra. Procedeu-se à separação por sedimentação em coluna, da fração argila destas amostras, seguida por montagem em vidro de 03 lâminas orientadas para cada registro, ou seja, apenas com deslizamento de uma lâmina sobre a que contém a lama para orientação. Fez-se então a análise natural (apenas com secagem ao ar), uma após saturação com etileno-glicol (análise glicolada) e uma terceira análise após a calcinação a 550°C (análise

calcinada). A utilização destas técnicas visava identificar possíveis minerais expansivos e ou que apresentem retração, tais como a montmorilonita, gibsita, goethita, caulinita.

Após a realização desta etapa de investigação preliminar, onde os materiais foram analisados individualmente, passou-se à montagem de composições entre o rejeito da pedreira e os solos da região. Estas composições foram submetidas aos mesmos ensaios de caracterização física, aos ensaios da metodologia Miniatura Compactada Tropical (MCT) e MCT expedita aliada a D 2488 (ASTM,1984), para algumas amostras, cujo intuito era de classificar as composições conforme preconização desta metodologia.

Ao final desta etapa a título de futuras comparações, foi realizada a classificação das composições nas mesmas metodologias propostas para as amostras de solos naturais, ou seja, nos sistemas TRB, SUCS e MCT.

#### **b) Análise da Resistência Mecânica e da Expansibilidade dos Solos e Composições**

Nesta fase da metodologia de trabalho avaliou-se a resistência mecânica e a expansão dos solos e de todas as composições (solo, solo + rejeito, solo + rejeito + cal e solo + cal), em seus respectivos percentuais de adição: 15, 25 e 35%.

Para os solos finos e suas misturas com rejeito, cuja percentagem retida na peneira 2,0 mm não ultrapassou a 5%, foi empregada a metodologia MCT, proposta para solos tropicais. Os ensaios de compactação, expansão e de MINI-CBR (com e sem imersão), foram executados, conforme as normas, ME 228 (DNER,1994) e ME 254 (DNER, 1997). Estes ensaios foram realizados no laboratório de Geotecnia da Universidade de Brasília (UnB). A Figura 23 ilustra a realização do ensaio de MINI-CBR conforme a ME 254 (DNER,1997).



Figura 23. Ensaio de MINI-CBR

Primeiramente o MINI-CBR e a expansão foram determinados pelo processo tradicional, ou seja, determinando-se o CBR de cada corpo de prova do ensaio de compactação, num total de 5 unidades, e lançando em seguida os resultados obtidos no gráfico de compactação. Retirou-se deste gráfico o valor do MINI-CBR e da expansão correspondente ao valor da umidade ótima.

Novas amostras foram moldadas, estando às composições nos seus respectivos teores de umidade ótima, submetendo as mesmas aos ensaios de MINI-CBR e expansão individualmente.

Todos os teores de umidade foram determinados no momento da moldagem dos corpos de prova, sendo que para os solos que ficaram em imersão, retirou-se a umidade de saturação após o rompimento destes corpos de prova na prensa.

Quanto ao estudo dos parâmetros do solo granular e de suas misturas com rejeito fino de pedreira, a metodologia aplicada foi à da compactação e do Índice Suporte Califórnia (CBR) tradicional. Esta metodologia foi adotada em função dos materiais serem granulares, possuindo considerável teor de frações com dimensões superiores a 2,0mm, não sendo possível adotar a metodologia MCT.

Para estes ensaios foram mantidos os mesmos critérios de mistura, tempo de homogeneização e armazenamento adotados para a realização dos ensaios de compactação das composições finas. A Figura 24 ilustra a realização do ensaio de CBR tradicional, realizado na pesquisa, onde todas as amostras passaram por imersão, durante 96 horas, antes de serem submetidas ao ensaio na prensa do CBR.



Figura 24. Ensaio de CBR

Estes estudos foram complementados com o uso da cal hidratada (CH-III) adicionada na composição das amostras que apresentaram melhores desempenhos. Foi adicionado o teor de 2% (em todos os solos) e de 4 % (somente nos solos de granulização fina). A metodologia permitiu avaliar se a adição da cal juntamente com o rejeito fino proporcionou melhor desempenho às composições.

A energia aplicada nestas composições com adição de cal foi à intermediária, sendo a cal adicionada juntamente com a água ao solo, 24 horas antes da realização da compactação, mantendo-se condições que preservassem ao máximo, a característica da mistura durante o armazenamento, isto a utilização de sacos plásticos hermeticamente fechados e guardados em câmara úmida.

### **c) Investigação complementar**

Nesta etapa da pesquisa os trabalhos foram direcionados para a busca de informações complementares que viessem fornecer subsídios para entender as alterações percebidas nos comportamentos mecânicos e na expansibilidade das composições investigadas na fase anterior. Uma das formas de investigação da morfologia, compacidade, mineralogia e contato entre as partículas sólidas destes solos e composições (solo + rejeito), foi através da utilização da técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

As amostras de solos naturais de Goianira e de Caturá e de suas adições com 25% e 35% de rejeito respectivamente, foram moldadas nos parâmetros de umidade ótima e densidade seca máxima, sendo posteriormente enviadas ao Centro de Apoio Tecnológico de Engenharia de Furnas Centrais Elétricas, para investigação na técnica MEV.

Pretendia-se avaliar com esta investigação a influência da adição do rejeito no arranjo estrutura do solo, para tentar obter informações que justificassem o melhor e o pior desempenho das composições.

Outro parâmetro analisado no comportamento das amostras de solo fino e das misturas foi a sucção. No laboratório de Geotecnia da Universidade de Brasília (UnB) foram realizados ensaios de sucção pelo Método do Papel Filtro, seguindo a ASTM-D5298 (ASTM, 1992), utilizando o papel Wathman 42 .

Foi realizado este ensaio para as composições de Inhumas, Inhumas + 15% de rejeito, devido à pista experimental; Goianira, Goianira + 25% de rejeito, melhor desempenho entre as composições; Caturai e caturai + 35% de rejeito, bom desempenho na condição não saturada. Cada ensaio foi composto de 13 corpos de prova, estando um na umidade ótima e os 12 demais no ramo seco ou acima da ótima. Após serem envoltas no papel filtro, no filme plástico e no papel alumínio, as amostras foram armazenadas por 15 dias em uma caixa de isopor. Ao final deste período os papéis filtros foram pesados na balança de precisão (0,001g) e levados para secagem em estufa (temperatura  $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ ), sendo novamente pesados. A diferença no teor de umidade representa a quantidade de água absorvida pelo papel filtro durante o contato com a amostra. Finalizando, foi determinado o peso específico aparente dos corpos de prova, pela metodologia da balança hidrostática NBR 10838 (ABNT, 1988).

A Figura 25 ilustra o ensaio de sucção realizado na pesquisa pelo método do papel filtro.



Figura 25. Ensaio de sucção

Para avaliação do comportamento mecânico dos materiais que apresentaram melhores desempenhos, foram realizadas nos solos e nas misturas, avaliações destes quando submetidos a carregamento cíclicos.

Neste sentido foram realizados ensaios para determinar o módulo de resiliência conforme a norma ME 131(DNER, 1994). Para a realização destes ensaios foram selecionadas as amostras de Inhumas, Goianira e do cascalho na condição natural, e de Goianira + 25% e Inhumas + 15% e do cascalho + 15% de rejeito, sendo as duas últimas utilizadas na pista experimental que sofreu adição deste material. É importante ressaltar o apoio do Laboratório de Materiais e Pavimentação da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo- USP, localizado na cidade de São Paulo, SP para a realização do ensaio de módulo de resiliência dos solos naturais e das respectivas misturas.

As composições foram moldadas dentro de cilindros padronizados, com dimensões de 20 cm de altura e 10 cm de diâmetro, compactadas em cinco camadas, dentro dos parâmetros de umidade ótima e peso específico seco máximo. As mesmas foram envoltas por membranas de borracha (proteção da amostra) sendo instalados extensômetros LVDT nas laterais destas amostras; em seguida, elas são acondicionadas dentro da célula triaxial cíclica.

Após a montagem da célula, as amostras passaram por um processo de acondicionamento com aplicação de tensões confinantes e desviadoras, sem registro de deformações. Aplicou-se então pares de tensões confinantes e desviadoras nas amostras, registrando-se as deformações, através de sistema informatizado. Os valores destes pares de tensões aplicadas são estabelecidos pela ME 131 (DNER, 1994). A Figura 26 ilustra o ensaio de módulo de resiliência, executado na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.



Figura 26. Ensaio de módulo de resiliência

#### **d) Estudo do comportamento em uma pista experimental**

Para comprovar a viabilidade técnica do uso do rejeito fino na estabilização de solos e na produção de pavimentos urbanos com volume de tráfego leve, foi construída uma pista experimental em uma via urbana localizado na cidade de Inhumas (GO), executado um trecho experimental com extensão de 72 metros de extensão e 6,0 metros de largura. Para a construção desta pista foram utilizados solo, com adição de aproximadamente 15% em volume de rejeito, que corresponde a 16,2% em peso, nas camadas de subleito e da base. A Figura 27 ilustra o momento do lançamento do rejeito no subleito.



Figura 27. Pista experimental

O pavimento implantado possuía espessura de 20 cm para a camada de reforço de subleito e 20 cm de base, com o revestimento executado em tratamento superficial duplo com aplicação de emulsão RR2C e imprimação em asfalto diluído CM-30. O tráfego na região onde foi implantado o pavimento é considerado como sendo muito leve, com um número de passagens de caminhões e ônibus não superior a 3 por faixa ao dia.

Estima-se que futuramente que o tráfego na região seja classificado em leve com um número de veículos padrões diário de 50 por faixa.

De acordo com as estimativas realizadas por Senço (1997), considerando um período de projeto de 10 anos com taxa de crescimento de 10% (por período de projeto), foi possível calcular o número N a ser considerado para análise deste pavimento; assim foi adotado o valor de 6,74 x10<sup>5</sup> operações do eixo padrão.

Durante a execução das camadas do pavimento foram realizados ensaios de controle de compactação utilizando a metodologia do Frasco de Areia NBR 7185 (ABNT 1986) com o uso do

umidímetro Speedy, em pontos alternados da pista: borda direita, centro e borda esquerda. Para confecção da pista experimental foi empregada a energia intermediária, tanto para a camada de subleito, quanto para a camada de base.

No estado de Goiás existe uma prática de se aceitar valor de CBR em torno de 40% para materiais de base aplicados em pavimentos urbanos, devido à escassez de jazidas, em algumas regiões, que apresentem valores de CBR superiores a 60%. Além de que em pavimentos urbanos com tráfego leve a muito leve, o valor do CBR em torno de 40%, não vem comprometendo a durabilidade da estrutura destes pavimentos urbanos.

Considerando a importância das análises relativas a pista experimental em relação ao desempenho da adição dos rejeitos ao solo, são descritos, a seguir os procedimentos adotados na execução da pista experimental. É importante ressaltar que à descrição destas etapas visam apresentar o método de mistura e a forma de como foi adicionado o rejeito na pista.

Execução da camada de subleito:

- Escarificação do solo na pista (greide colado);
- Lançamento e espalhamento do rejeito sobre a camada de subleito;
- Período de repouso para secagem do rejeito, duração 48 horas;
- Mistura, gradeamento do solo e rejeito;
- Adição de água e gradeamento para atingir a umidade ótima;
- Compactação com o rolo CA-25;

Execução da camada de base:

- Lançamento e espalhamento do solo granular sobre a camada de subleito;
- Lançamento do rejeito sobre o solo granular e mistura;
- Repouso de 48 horas para secagem da composição;
- Umidecimento, gradeamento e compactação da camada.

Observou-se durante a execução das duas camadas anteriores, alguns comportamentos não convencionais, ocorridos durante o processo de construção destas estruturas, sendo importante de serem relatados. A primeira observação foi de que o processo de produção destas camadas são mais lentos do que os convencionais, visto que se faz necessário esperar o rejeito perder a umidade excessiva que o mesmo contém ao sair das pilhas. Outro fato relevante ocorrido durante a execução da camada do subleito, foi o surgimento de trincas superficiais em toda a extensão da camada. Em relação a estas trincas, serão abordadas no capítulo de análise de resultados, as possíveis causas que vieram originar a formação destas trincas. A ação adotada em campo para a eliminação destas trincas, foi a raspagem das mesmas, com a lâmina da motoniveladora, numa profundidade aproximada de 3 cm. Após esta operação, constatou-se uma grande redução destas

trincas na camada inferior, sendo prosseguido o lançamento e espalhamento do cascalho sobre a camada do subleito.

Após a execução de cada camada: subleito, base e da imprimação, foram realizados ensaios de campo para avaliar o comportamento das camadas do pavimento, determinação do grau de compactação e do desvio de umidade pela metodologia do frasco de areia e determinação da taxa de imprimação, ensaio de placa.

Após a conclusão da camada de base e da imprimação betuminosa, realizou-se a avaliação das deflexões nos dois pavimentos, o que foi construído com adição de rejeito de pedreira, bem como do pavimento que não sofreu adição deste material. Para esta avaliação foi utilizada a Viga Benkelman, sendo este levantamento realizado conforme as recomendações da ME 24 (DNER 1994). Foram realizadas 05 determinações ao longo de toda a pista experimental confeccionada com adição de rejeito, e em uma pista ortogonal, que não continha adição do rejeito nas camadas, num total de cinco determinações. A proposta de realizar os ensaios em ambas as condições tinha como intuito confrontar os resultados das duas bacias de deflexões médias. Em ambas situações foram realizadas determinações iniciadas a partir de 25 cm até a distância de 07 metros em relação ao ponto inicial de carregamento, sendo esta última distância adotada foi suficiente para a determinação das deflexões, isto é leitura extensômetro igual a zero.

A Figura 28 ilustra o ensaio de viga Benkelmam realizada na pista experimental que sofreu adição de rejeito.



Figura 28. Ensaio de Viga Benkelman

Adicionalmente aos ensaios com a Viga Benkelman, foi determinado o coeficiente de rigidez e o módulo de elasticidade das camadas e dos solos para os dois pavimentos, utilizando o aparelho geoguage.

## 12. USO DE RESÍDUOS DE MINERAÇÃO EM CONCRETO

No início do século XX, a população mundial era de 1,5 bilhões de pessoas. No final do século, tinha crescido para 6 bilhões. Esse crescimento populacional provocou uma rápida urbanização e uma enorme demanda por energia, industrialização, transportes etc. Este crescimento gerou uma demanda crescente por cimento e concreto, fazendo com que o consumo de cimento passasse de 2 milhões de toneladas em 1880 para 1,6 bilhões em 1999 (Mehta, 1999).

Segundo Metha (2002), o cimento Portland, o principal aglomerante hidráulico usado nos concretos modernos, é produto de uma indústria que além de consumir muita energia, também é responsável pela emissão de grande quantidade de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Normalmente, os concretos convencionais utilizam aproximadamente 12% de cimento, 8% de água, e 80% de agregados, em massa. Isso significa que para cada 1,6 bilhões de toneladas de cimento, a indústria de concreto consome 10 bilhões de toneladas de areia e brita e 1 bilhão de água por ano, sendo a maior consumidora de recursos naturais do mundo. Esse é um aspecto crítico da indústria do concreto, sob o ponto de vista ambiental.

O desenvolvimento sustentável das indústrias de cimento e concreto poderá ser alcançado com a utilização de resíduos provenientes de outras indústrias, como adições, que em condições normais seriam descartados em grandes quantidades e locais impróprios, gerando risco de contaminação do solo e da água. Estes resíduos podem substituir parcialmente o clínquer ou o cimento, reduzindo o volume de matéria-prima extraída e até 80% do consumo energético, quando considerada a utilização de resíduos que não necessitam de calcinação no processo de fabricação.

Aliado aos benefícios ambientais, a incorporação desses resíduos resulta ainda em materiais cimentícios com melhores características técnicas, já que modificam a estrutura interna da pasta de cimento hidratada, reduzindo a porosidade capilar do concreto, diminuindo o calor de hidratação e, conseqüentemente, as fissuras de origem térmica (Molin, 2005).

As empresas de britagem, fortemente relacionadas à indústria de construção civil, também é responsável por diversos impactos ambientais. Esses impactos incluem poeira, ruído e vibrações, lama e fragmentos de rocha.

O desenvolvimento de concretos especiais, como concreto auto-adensável (CAA) é uma contribuição positiva à sustentabilidade da indústria do concreto, graças à necessidade da utilização de elevados teores de subprodutos industriais na forma de pó (Gomes et al., 2003). Sua utilização surgiu como uma solução para a produção de concretos cuja durabilidade independa do nível de treinamento dos trabalhadores, dispensando vibração (Okamura & Ouchi, 2003).

Dentro deste contexto, esta etapa do trabalho tem como objetivo avaliar a possibilidade de utilização dos resíduos finos de pedra-reira como adição mineral na confecção de concreto, com ênfase para o concreto auto-adensável, apresentando as características físicas, químicas e mineralógicas destes resíduos e o desempenho dos concretos nos estados fresco e endurecido, tendo em vista sua aplicação na confecção de estacas escavadas.

### 12.1. Adições Minerais para Concreto

As adições minerais, de acordo com sua ação físico-química, podem ser classificadas em (Molin, 2005):

- a) material pozolânico;
- b) material cimentante;
- c) filer.

O material pozolânico é definido pela NBR 12653 (1992) como um material silicoso ou sílico-aluminoso que por si só possui pouca ou nenhuma atividade cimentícia, mas quando finamente dividido e na presença de umidade, reage quimicamente com o hidróxido de cálcio, para formar compostos com propriedades cimentantes. Como exemplos de pozolanas tem-se a cinza volante com baixo teor de cálcio, a pozolana natural, a sílica ativa, a cinza da casca do arroz e o metacaulim.

O material cimentante não necessita do hidróxido de cálcio presente no cimento para formar produtos cimentantes, no entanto, sua auto-hidratação é normalmente lenta e a quantidade de produtos cimentantes formados é insuficiente para sua aplicação com finalidade estrutural. Quando usado como adição ou substituição em cimento Portland, a presença de hidróxido e gipsita acelera sua hidratação, como é o caso da escória granulada de alto-forno.

O filer é uma adição mineral finamente dividida, sem atividade química, tendo como principais funções o efeito físico de empacotamento granulométrico e ação como ponto de nucleação para hidratação dos grãos de cimento.

O efeito químico das adições minerais está associado à capacidade de reação com o hidróxido de cálcio –  $\text{Ca(OH)}_2$  – formado na hidratação do cimento Portland, para formar silicato de cálcio hidratado – C-S-H – adicional, que é o principal produto responsável pela resistência das pastas de cimento hidratadas (Molin, 2005).

Segundo John et al. (2003) é sempre fundamental a realização de uma análise química completa, por fluorescência de raios X ou por métodos clássicos via úmida, determinando os percentuais de óxidos de silício, de alumínio, de ferro e de cálcio, e anidrido sulfúrico. Este último tem importância particular quando empregado com o cimento, podendo causar expansão por

formação da etringita já nas primeiras idades de hidratação. Os teores de Na e K também devem ser avaliados uma vez que teores elevados são indesejáveis na maioria das aplicações, causando eflorescências ou reações álcali-agregado.

Quanto aos efeitos físicos gerados pelas adições minerais no concreto Molin (2005) cita:

- efeito microfiller: aumento da densidade da mistura resultante do preenchimento dos vazios pelas minúsculas partículas das adições, cujo diâmetro médio deve ser menor que o diâmetro médio das partículas do cimento;
- refinamento da estrutura dos poros e dos produtos de hidratação do cimento: as adições podem agir como pontos de nucleação para os produtos de hidratação. Assim, os cristais cresceram não somente a partir da superfície dos grãos de cimento, mas também nos poros ocupados pela adição e pela água, acelerando as reações e os tipos de produtos formados (gera um grande número de pequenos cristais ao invés de poucos cristais de grande tamanho);
- alteração na microestrutura da zona de transição: adições finamente divididas no concreto interferem na movimentação das partículas de água livre em relação aos sólidos da mistura, reduzindo ou eliminando o acúmulo de água livre retida sob os agregados. Reduz ainda a exsudação, podendo preencher os vazios deixados pelas partículas do cimento próximos à superfície do agregado.

O somatório destes efeitos provoca uma melhora significativa da zona de transição, melhorando o desempenho do concreto sob o ponto de vista mecânico e de durabilidade.

Para avaliar a finura das adições utilizam-se os métodos de peneiramento na peneira # 200 (0,075 mm), granulometria a laser, área específica por absorção de nitrogênio (BET) ou pelo ensaio de Blaine.

## **12.2. Efeitos das Adições Minerais nas Propriedades do Concreto**

Muitas propriedades do concreto podem ser benéficamente influenciadas pela utilização de adições minerais, variando em função da quantidade utilizada, das condições de cura, da composição química, mineralógica e granulométrica.

Segundo Metha & Monteiro (1994) e Neville (1997) as principais mudanças no aspecto do concreto nos estados fresco e endurecido são as seguintes:

### **12.2.1. Concreto no Estado Fresco**

a) Aspectos Reológicos:

Do ponto de vista reológico o concreto pode ser caracterizado pela sua coesão e viscosidade. A coesão diz respeito a sua capacidade do concreto se manter na posição originária sob pequenas tensões. A viscosidade caracteriza a estabilidade do concreto agindo como restrição ao movimento relativo dos grãos (Molin, 2005). Como são oriundas dos fenômenos de superfície, estas grandezas são influenciadas pela incorporação de adições minerais. Os grãos de pequeno diâmetro agem como bloqueadores dos poros, aumentando o contato sólido-sólido e reduzindo ainda a tendência à segregação e a exsudação, quando comparado ao concreto sem adições.

b) Consumo de Água:

O consumo de água de concretos com adições minerais depende da forma e superfície específica das partículas e da quantidade utilizada como adição ou substituição ao cimento.

Quando as partículas são esféricas, como é o caso da cinza volante, a substituição parcial do cimento, permite reduzir o consumo de água para uma dada trabalhabilidade. Esta redução, no caso da cinza volante, é também resultado de uma melhor dispersão das partículas do cimento, de forma similar ao que ocorre com aditivos redutores de água.

Para partículas de formato menos arredondado (escória de alto-forno e metacaulim) a redução da quantidade de água não se observa. Ao contrário, para estas adições quanto maior a superfície específica maior o efeito redutor de trabalhabilidade, sendo necessário um acréscimo de água. Este problema pode ser resolvido com a utilização de aditivos plastificantes e superplastificantes.

c) Calor de Hidratação:

Normalmente o calor de hidratação gerado é reduzido com a substituição do cimento por adições minerais, já que a quantidade de clínquer diminui, resultando em menor liberação de calor durante as reações de hidratação. Como a reação pozolânica é lenta e ocorre somente após a formação do hidróxido de cálcio a partir da hidratação do cimento, o calor gerado pelas reações pozolânicas ocorrerá de forma defazada. Ou seja, a substituição do cimento por adições minerais de reações lentas, reduz o aumento de temperatura de grandes massas de concreto.

### **12.2.2. Concreto no Estado Endurecido**

a) Resistência à Compressão:

A adição de pozolanas mais ativas (sílica, metacaulim e cinza da casca do arroz) ao concreto causa melhora notável da sua resistência à compressão, devido ao refinamento dos poros e dos cristais presentes na pasta do cimento, aumentando a resistência da matriz na zona de transição.

A resistência final do concreto com adição mineral e sua evolução com o tempo dependem, dentre outros fatores:

- da quantidade e características das adição mineral (tamanho das partículas, quantidade de SiO<sub>2</sub> em forma amorfa etc);
- do proporcionamento do concreto (tipo e consumo de cimento, relação água/cimento, presença de superplastificante etc);
- das condições de cura.

b) Resistência à Tração:

As adições minerais causam redução na porosidade da matriz e da zona de transição, melhorando a resistência à compressão e à tração do concreto. Mas, um aumento significativo na resistência à tração só se dará quando ocorrerem as reações pozolânicas, reduzindo o tamanho e a concentração dos cristais de hidróxidos de cálcio na zona de transição.

c) Módulo de Deformação:

No caso do módulo de deformação, a melhoria das características na zona de transição não são suficientes para causar melhora correspondente no módulo de deformação do concreto, no qual o agregado se torna um fator limitante. Conseqüentemente, os aumentos nos níveis de resistência à compressão não se reproduzem com a mesma intensidade nos valores do módulo de deformação.

d) Durabilidade:

As adições minerais reduzem os canais capilares do concreto, reduzindo a permeabilidade e a absorção do concreto. Esta redução é extremamente importante, já que é principalmente por meio dos mecanismos de absorção que penetram, junto com a água, íons agressivos no interior do concreto, responsáveis pelos processos de deterioração.

O fato de não permitir ou dificultar a difusão dos sulfatos e de reduzir a quantidade de hidróxido de cálcio disponível para se combinar com os sulfatos presentes e gerar etringita, responsável por reações expansivas, aumenta a resistência aos sulfatos em concretos com adições minerais.

Com relação as reações álcali-agregado, a presença de adições minerais ativas são eficientes para inibir ou reduzir as reações expansivas resultantes da combinação dos álcalis do cimento com agregados potencialmente reativos. Isto se deve a três fatores: redução da permeabilidade, redução do total de álcalis do aglomerante ao se substituir parte do cimento, consumo de parte dos álcalis pela reação pozolânica.

Ainda em relação a durabilidade tem-se a possibilidade de corrosão das armaduras. Os dois principais fatores responsáveis pela despassivação do aço no concreto são a carbonatação (redução do pH pela reação do hidróxido de cálcio com o gás carbônico do ambiente, formando carbonato de cálcio) e a penetração de cloretos em quantidade suficiente até a superfície do aço. Uma vez despassivado o aço, a taxa de corrosão depende de outros fatores como a umidade, o oxigênio e a resistividade do concreto.

A presença de adições diminui a penetração dos cloretos, da umidade e do oxigênio no interior do concreto, aumentando sua resistividade e contribuindo para a prevenção da corrosão das armaduras desencadeada por cloretos. O mesmo não acontece para a corrosão provocada por carbonatação, uma vez que a presença de adições minerais que diminui o  $\text{Ca(OH)}_2$  livre, reduzindo o pH e aumentando a profundidade carbonatada. Este efeito pode ser minimizado com uma cura úmida adequada, de forma a reduzir a porosidade e a permeabilidade superficial do concreto, impedindo ou retardando o acesso do  $\text{CO}_2$ .

### **12.3. Concreto Auto-Adensável**

O Concreto Auto-Adensável (CAA) tem como principal característica uma grande fluidez, ou seja, uma alta trabalhabilidade, podendo ser moldado em fôrmas preenchendo cada espaço vazio através de seu peso próprio, não necessitando de qualquer tipo de vibração ou compactação externa.

O CAA foi desenvolvido no Japão, por volta de 1983, sendo que sua maior aplicação em obras civis ocorreu em 1997, naquele país, com a concretagem das ancoragens de concreto da ponte metálica de maior vão livre do mundo.

Os materiais utilizados para produção de CAA são os mesmos utilizados para a produção de concretos convencionais, porém com maior adição de finos e de aditivos plastificantes, superplastificantes e, por vezes, aditivos modificadores de viscosidade.

O desenvolvimento da tecnologia de aditivos e, recentemente, a significativa redução dos custos dos mesmos são fatores que tem dado suporte ao uso do CAA.

Os aditivos superplastificantes permitem que se alcance alta fluidez nas misturas, enquanto os aditivos modificadores de viscosidade oferecem um aumento da coesão, prevenindo-se com isto a exsudação e segregação do concreto.

Graças à necessidade de utilização de elevados volumes de adições minerais para atingir requisitos de auto-adensamento, utiliza diversos tipos de resíduos em sua constituição, tanto como adição mineral, como em substituição do cimento, tais como: escória de alto-forno moída, cinzas volantes, sílica ativa, finos de pedra e resíduo de serragem de rochas ornamentais.

A adição de finos proporciona melhoria em diversas propriedades, tanto no estado fresco como no estado endurecido. Acredita-se que os finos atuam como pontos de nucleação, isto é, quebram a inércia do sistema fazendo com que as partículas de cimento sofram reação mais rápida com a água, ocasionando ganhos de resistência nas primeiras idades. Atuam ainda no aumento do pacote de finos, fazendo com que haja um crescimento na densidade da pasta, dificultando a penetração de agentes agressivos e melhorando a zona de transição (Tutikian, 2004).

O concreto auto-adensável tem como principais vantagens: redução do custo de aplicação por metro cúbico de concreto, garantia de excelente acabamento em concreto aparente; permite bombeamento em grandes distâncias horizontais e verticais; otimização de mão-de-obra; maior rapidez na execução da obra; melhoria nas condições de segurança na obra; eliminação do ruído provocado pelo vibrador; eliminação da necessidade de espalhamento e de vibração; aumento das possibilidades de trabalho com formas de pequenas dimensões; redução do custo final da obra em comparação ao sistema de concretagem convencional (Camargos, 2002).

As principais indicações de uso do CAA são: fundações executadas por hélice contínua, paredes, vigas e colunas, paredes diafragma, estações, reservatórios de água e piscinas, pisos contrapisos, lajes, pilares, muros, painéis, obras com acabamento em concreto aparente, obras de concreto em locais de difícil acesso, em peças pequenas, com muitos detalhes ou com formatos não convencionais, onde seja difícil a utilização de vibradores e em formas de peças com grande concentração de ferragens (Camargos, 2002).

### **12.3.1. Método de Dosagem**

Os métodos de obtenção do concreto auto-adensável não são fundamentados apenas na questão da alta fluidez do concreto, mas também considerando a capacidade do concreto passar entre obstáculos sem ocorrer bloqueio nem resistência à segregação.

A dosagem do concreto deve estar relacionada com a proporção entre os materiais constituintes do concreto, a fim de se obter de maneira econômica, resistência e durabilidade (NEVILLE, 1997). Algumas exigências devem ser atendidas ao se determinar uma dosagem para o concreto, tais como: especificações de projeto, condições de exposição das estruturas, materiais disponíveis na região, técnicas de execução e o custo (HELENE e TERZIAN, 1993).

Os métodos de dosagem utilizados para o concreto auto-adensável diferem muito daqueles utilizados para concretos convencionais, no que diz respeito à seleção e caracterização dos materiais, pois, o CAA apresenta uma grande quantidade de finos e presença de adições minerais e químicas, assim como pelos benefícios alcançados nas suas propriedades frescas. Atualmente, já existem métodos conhecidos, desenvolvidos por alguns pesquisadores da literatura, tais como:

Método de Gomes, Método de Okamura, Método EFNARC, Método de Tutikian, Método Repette-Melo, dentre outros. Neste projeto optou-se por utilizar o Método de Gomes, com algumas adaptações.

O método de Gomes (2002) apresenta um procedimento de caráter experimental para obtenção da dosagem do concreto auto-adensável de alta resistência. Esse procedimento constitui uma extensão do desenvolvido por Toralles et. al. (1998), para concretos de alta resistência, no sentido de incorporar critérios de dosagem, relativo aos concretos auto-adensáveis.

Os critérios de otimização adotados na aplicação dos procedimentos vêm acompanhados por uma resistência mínima à compressão e por um cumprimento de diferentes requisitos de auto-adensamento no estado fresco, tudo isso com uma quantidade mínima de superplastificante e cimento. Apresentam-se, também, detalhes de procedimentos de ensaios utilizados para a caracterização do estado fresco do CAA.

### **12.3.2. Princípios do método**

O procedimento proposto por Gomes (2002), para CAA de alta resistência, foi fundamentado na otimização do esqueleto granular de agregados, otimização separada da composição da pasta, com a determinação da dosagem ótima de superplastificante, variando a quantidade de superplastificante e mantendo constantes as relações água/cimento ( $a/c$ ) e filler/cimento ( $f/c$ ), bem como a produção do concreto com a dosagem de superplastificante igual à dosagem ótima da pasta.

A relação  $a/f$  foi fixada, a princípio, em 0,4, para em seguida ser diminuída, até se atingir a resistência requerida para o concreto. Quanto ao esqueleto granular, foi adotado um tamanho característico máximo para o agregado = 9,5 mm. A relação areia/brita ( $ar/br$ ) é determinada segundo um critério de máxima densidade em seco, com compactação, no sentido de ser obtida uma mínima quantidade de vazios entre os dois materiais.

### **12.3.3. Definição da composição da pasta**

A composição da pasta é definida pela quantidade de cimento e das relações  $a/c$ ,  $sp/c$ , e  $f/c$ . Em função disso, os parâmetros a serem determinados são as relações  $sp/c$  e  $f/c$ .

A dosagem de superplastificante nas pastas é determinada através de ensaios do cone de Marsh, com abertura de saída de 8 mm de diâmetro, conforme a Figura 29 (a), e de acordo com as recomendações da EN 445 (Norma Européia – Grautes para bainhas de protendidos. Métodos de

Ensaio, 1996). Tal procedimento consiste em introduzir 1 litro de pasta no cone e medir o tempo (T) decorrido, para 500 ml de pasta fluir completamente pela abertura inferior do cone.

Este tempo de fluxo se apresenta como um parâmetro inverso da fluidez da pasta. Variando a relação  $sp/c$ , se obtém uma curva  $\log T$  versus  $sp/c$ , Figura 29 (b).

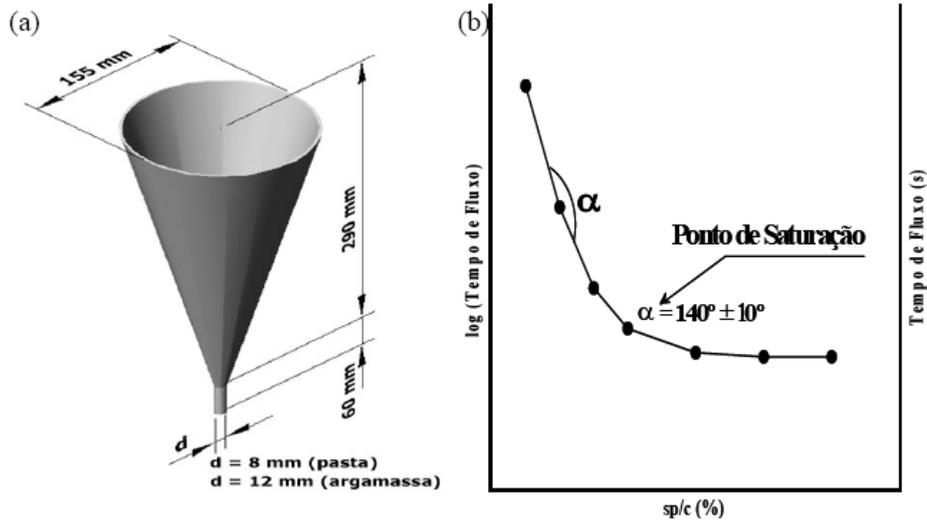


Figura 29. (a) - Ensaio do cone de Marsh; (b) - Curva  $\log T$  x  $sp/c$  (%) (Cavalcanti, 2006)

A quantidade de cimento, água e fíler foram fixadas anteriormente. A variável é a quantidade sólida de superplastificante. O gráfico  $\log T$  versus  $sp/c$  é utilizado para a definição do ponto de saturação do superplastificante, que constitui a percentagem ótima de aditivo para a pasta utilizada. O ponto de saturação significa a relação  $sp/c$  para a qual um incremento da dosagem de superplastificante não provoca nenhuma melhora significativa na fluidez da pasta, sendo determinada como sendo a relação de  $sp/c$ , correspondente a um ângulo interno de  $140^\circ \pm 10^\circ$  na curva  $\log T$  versus  $sp/c$ . Mas, a dosagem de superplastificante correspondente ao ponto de saturação depende da relação  $f/c$  da pasta, assim foram realizados ensaios para distintos valores da relação citada, adotando-se valores de 0,3 a 0,5 para  $f/c$ .

A verificação da habilidade de espalhamento da pasta e determinação do percentual de fíler foi realizada pelo ensaio do mini-slump, como mostra a Figura 30, medindo-se o tempo que a pasta leva para atingir um diâmetro de 115 mm, denominado T115, e o diâmetro de espalhamento final da mesma pela média aritmética de duas medidas perpendiculares. O equipamento utilizado foi proposto por Kantro (1980) e consiste de um molde em forma de tronco de cone. O ensaio foi realizado com diferentes relações  $f/c$ , cada uma com sua dosagem de superplastificante, correspondente ao ponto de saturação.

A relação f/c ótima da pasta é aquela que apresenta um diâmetro de extensão final no mini-slump de  $180 \pm 10$  mm, e um tempo T115 no intervalo de 2 a 3,5 s. Os ensaios da pasta com o cone de Marsh e o mini-slump permitem obter as respectivas relações de sp/c e f/c, que geram misturas de concreto com fluidez máxima, sem segregação e com alto nível de coesão interna, coesão essa, que não prejudique significativamente a fluidez do material.

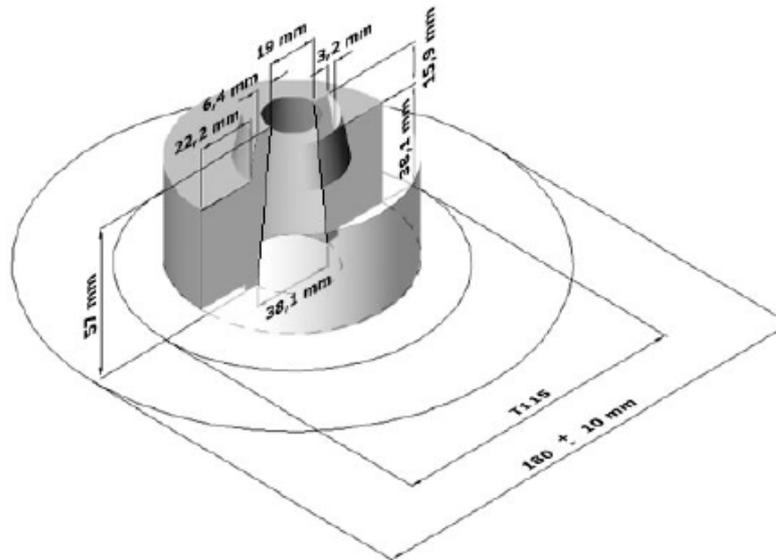


Figura 30. Ensaio do Mini-Slump (Cavalcanti, 2006)

#### 12.3.4. Determinação do esqueleto granular

As propriedades exigidas para o concreto auto-adensável limitam o tamanho do agregado graúdo e o volume de agregados que deve ser utilizado (BILLBERG, 1999).

A relação ar/br é determinada segundo um critério de máxima densidade em seco e sem compactação, no sentido de ser obtida uma mínima quantidade de vazios entre os dois materiais. Esse ensaio segue as orientações da norma ASTM C29/C29M, porém, é feita uma adaptação pelo fato da não compactação dos materiais. O ensaio consiste em preencher um recipiente com 5 litros de uma mistura seca com certa relação areia/brita. A partir dos dados dos dois materiais, densidade e peso de cada componente, obtém-se a massa unitária e o volume de vazios de cada mistura. O ensaio é realizado para várias relações entre os componentes, até se chegar à relação entre eles que apresenta maior densidade e menor volume de vazios (HELENE & TERZIAN, 1993; GOMES, 2002).

### 12.3.5. Otimização do volume de pasta no concreto

Após terem sido determinadas as relações ótimas de  $sp/c$  e  $f/c$  para a pasta e a relação areia/brita, segundo o critério de maior densidade com menor volume de vazio, se faz necessária a obtenção do volume de pasta ótimo para satisfazer as condições de resistência e auto-adensamento exigidos pelo concreto. Em função de tais parâmetros pré-estabelecidos, são fabricados concretos com diferentes quantidades ótimas de pasta, em função de cada tipo de aplicação. A quantidade mínima de pasta deve preencher os vazios do esqueleto granular, proporcionando a característica de auto-adensamento no estado fresco e a resistência à compressão desejada no estado endurecido.

Desta forma, os concretos devem ser submetidos aos diversos ensaios no estado fresco, no sentido de satisfazer as faixas de parâmetros, que confirmam sua característica de auto-adensamento.

Os parâmetros que conferem o autoadensamento são estabelecidos através de ensaios, de acordo com os critérios de capacidade de preenchimento, capacidade de passagem entre armaduras e estabilidade ou ausência de segregação. Para o estabelecimento dos parâmetros da capacidade de preenchimento são utilizados os ensaios de Espalhamento (cone de Abrams) e Funil V, para os parâmetros da capacidade de passagem por armaduras é usada a Caixa L e finalmente para os parâmetros de ausência de segregação é utilizado o ensaio do Tubo em U. Na Tabela 2, estão apresentados os parâmetros estabelecidos para o atendimento dos tais critérios citados acima.

Tabela 2. Faixa dos parâmetros de auto-adensamento dos CAA

Propriedades	Ensaio	Parâmetros	Faixa ideal
Capacidade de Preenchimento	Slump-flow	Extensão final do fluxo	60 a 75 cm
		$T_{50}$	$5 \pm 2$ s.
Capacidade de Passagem	Funil V	Tempo total de fluxo	$10 \pm 3$ s.
	Caixa L	$T_{L20}$	$1 \pm 0,5$ s.
		$T_{L40}$	1,5s. a 3s.
Estabilidade	Tubo em U	$RB = H2 / H1$	= 80
		Relação de Segregação	= 90

(Lisboa, 2004)

Os ensaios de Espalhamento consistem em preencher cones de Abrams de concreto sem compactar, em seguida levantá-los, lentamente, deixando o concreto se estender em forma quase circular. As médias de duas medidas perpendiculares dos concretos espalhados resultam nos valores dos parâmetros extensão final do fluxo. E os tempos medidos em segundos, para os concretos alcançarem um diâmetro de 50 cm, são chamados de  $T_{50}$  (Figura 31).

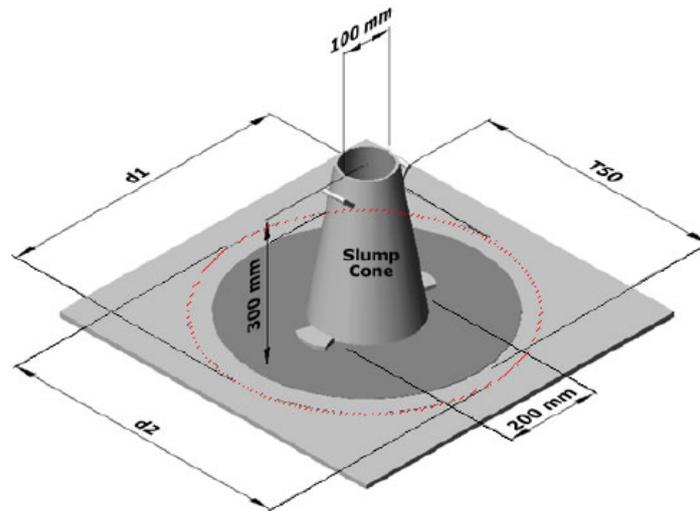


Figura 31. Ensaio de espalhamento do cone de Abrams (Slump Flow Test) (Cavalcanti, 2006)

Os ensaios do Funil V consistem em medir os tempos que amostras de aproximadamente 10 litros de concreto passam para fluir totalmente através do orifício inferior do funil, onde tal seção deverá ter uma dimensão mínima de 3 vezes o tamanho máximo do agregado; e para os CAA suas dimensões deverão variar de 6,5cm a 7,5 cm.

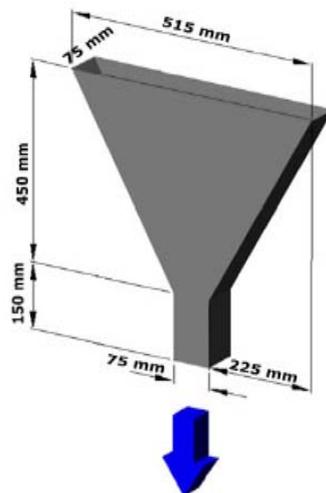


Figura 32. Funil V

Para estabelecer os parâmetros de capacidade de passagem por armaduras são utilizados ensaios com a Caixa L, que consiste em preencher o cômodo vertical da caixa com a amostra de concreto de aproximadamente 12 litros. Após a abertura da porta da caixa são medidos os parâmetros TL20, TL40 e H2/H1, que são respectivamente, o tempo para o concreto em fluxo alcançar um comprimento horizontal de 20 cm, 40 cm e a relação final entre as alturas do concreto no final do trecho horizontal e a altura do concreto remanescente do trecho vertical da caixa (Figura 33).

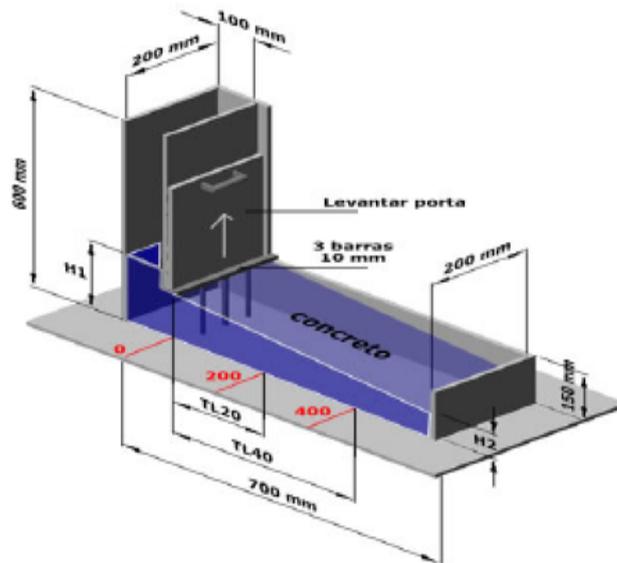


Figura 33. Ensaio da Caixa L (L-Box)

Os parâmetros de ausência de segregação dos concretos são estabelecidos através de ensaios com o tubo em U, de 16 cm de diâmetro. Os ensaios consistem em fazer fluir amostras de concreto sem sofrer compactação, através do tubo. Após algum tempo, quando os concretos já se encontram em estado de semi-endurecimento, são cortados, em cada caso, três fatias de 10 cm de espessura (a primeira no início do tubo de entrada, a segunda no início do trecho horizontal e a terceira no final do trecho horizontal do tubo), conforme mostra a Figura 34. Após a retirada das argamassas através de processos de lavagem das fatias sobre peneiras de 5 mm, são pesados os agregados de cada conjunto de três fatias. As Relações de Segregação (RS), são obtidas dividindo a massa dos agregados existentes, após a lavagem e enxugamento com papel toalha; da segunda fatia pela primeira fatia, o mesmo com a terceira fatia pela primeira fatia. O menor valor das duas relações é a Relação de Segregação, que deve ser maior ou igual a 0,90.

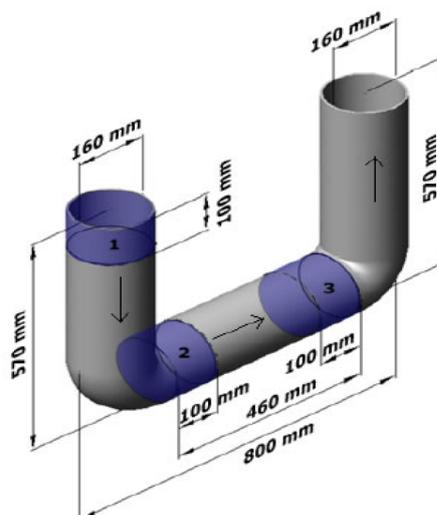


Figura 34. Ensaio do Tubo U

## 12.4. Materiais e Métodos nesta etapa do trabalho

Esta fase da pesquisa constou da seleção dos materiais a serem utilizados na pesquisa, com a realização de ensaios de laboratório para caracterização dos materiais, definição da dosagem para concreto de auto-adensável e avaliação de suas propriedades no estado fresco e endurecido.

### 12.4.1. Procedimento Experimental

Esta etapa do trabalho visou a otimização da dosagem do CAA com resistência à compressão normal de 20 MPa, exigida para os concretos de preenchimento de estacas escavadas. Esta otimização buscou a dosagem racional com a produção de concretos mais econômicos.

O procedimento experimental constou das seguintes etapas, resumidamente apresentadas na Tabela 3.

#### 1) Seleção e caracterização dos materiais

O primeiro passo para a dosagem foi a seleção e caracterização dos materiais empregados. A escolha dos materiais levou em consideração a litologia dos maciços das pedreiras cadastradas anteriormente.

#### 2) Fixação da relação água/cimento

Foram adotadas três relações água/cimento: 0,5; 0,55 e 0,6.

#### 3) Estudos da pasta

O estudo foi iniciado pela pasta, considerando cada relação água/cimento (a/c), buscando investigar a influência do teor de filer em função da variação da relação a/c e a definição do teor ótimo de aditivo. Foram considerados três teores de filer: 0,3; 0,4 e 0,5. Para cada teor de filer (f/c) e relação água/cimento, foi determinado o teor de saturação do aditivo, por meio dos ensaios do Cone Marsh e do Mini-Slump.

#### 4) Estudos em argamassa

Foram produzidas argamassas com três diferentes teores de agregado miúdo (30%, 40% e 45%), avaliando suas propriedades de auto-compactabilidade. Assim, determinou-se o volume ideal de agregado miúdo em relação ao volume total de argamassa, para cada relação a/c e o teor ótimo de filer determinado na pasta. Os ensaios utilizados nesta etapa foram o funil Marsh, com abertura de 12mm, e o espalhamento. Para cada teor de agregado miúdo variou-se o teor de

aditivo de forma a atender os requisitos dos ensaios. As argamassas que atenderam aos requisitos foram ensaiadas em relação à resistência à compressão, massa específica e teor de vazios.

#### 5) Esqueleto granular

Nesta fase foi avaliada a proporção entre agregado graúdo e agregado miúdo capaz de proporcionar maior massa unitária compactada seca. Para tanto, fixa-se a massa de agregado graúdo e vai-se acrescentando agregado miúdo aos poucos, avaliando a massa unitária. Inicialmente, essa massa aumenta, até atingir a proporção ideal e, aí, começa a diminuir. Para realização do ensaio utilizou-se um recipiente cilíndrico de volume conhecido, preenchido em três camadas, aplicando-se 25 golpes por camada. Ao final do preenchimento, o cilindro era nivelado e determinada a sua massa. A relação entre a massa líquida da mistura de agregados e o volume do recipiente é a massa unitária compactada.

#### 6) Produção do concreto

Para produção do concreto foi-se adicionando percentuais crescentes da mistura ideal de agregado miúdo e graúdo, avaliando para cada adição as características necessárias ao concreto auto-adensável, ajustando o teor de aditivo quando necessário. A verificação foi feita realizando-se os ensaios de espalhamento, Funil V, Caixa L e Tubo U, avaliando-se ainda a segregação, exsudação, resistência à compressão, módulo de elasticidade, massa específica e teor de vazios.

#### 6) Otimização da dosagem

Acompanhamento e análises dos parâmetros obtidos e obter uma dosagem que atenda os requisitos do CAA no estado fresco, com resistência à compressão adequada.

### **12.4.2. Seleção e caracterização dos materiais**

Foram utilizados na pesquisa materiais oriundos das pedreiras cadastradas. Agregados graúdos e miúdos britados de origem calcária, areia fina natural de rio, conhecida na região como areia rosa e dois tipos de resíduos com granulometria e litologias distintas: um mais fino de origem calcária e outro um pouco mais grosso de origem granítica. O primeiro obtido por um processo de peneiramento e o segundo por processo de lavagem. Todos os materiais foram caracterizados de acordo com os procedimentos especificados por norma.

Tabela 3. Resumo do procedimento experimental adotado no desenvolvimento do trabalho

Fase	Etapa	Procedimento	Objetivo
	Seleção e caracterização dos materiais	Ensaio definidos em normas	Caracterizar os materiais
	Determinação da relação a/c	Função da resistência à compressão	Encontrar a resistência especificada para os 28 dias de idade
Pasta	Ajuste do teor de filer	Análise visual para determinação de segregação	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ajustar o teor de filer em função da relação água/cimento.</li> <li>- Avaliar a relação entre os resultados do Cone e do Mini-Slump</li> <li>- Avaliar a relação entre as propriedades da pasta e a auto-compactabilidade das argamassas e concretos</li> </ul>
	Ajuste do aditivo	Ensaio Funil Marsh	
		Ensaio Mini-Slump	
Argamassa	Ajuste do teor de agregado miúdo	Ensaio de espalhamento e Funil Marsh	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Determinar o teor ideal de agregado miúdo para cada relação água cimento</li> <li>- Ajustar o teor de aditivo para se atingir os requisitos de auto-compactabilidade</li> </ul>
	Ajuste do aditivo		
	Massa específica e Teor de Vazios	Relação com a massa específica teórica	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Acompanhar o desenvolvimento da resistência à compressão e comparar com os resultados do concreto</li> </ul>
	Propriedades Mecânicas	Resistência à compressão	
Esqueleto Granular	Determinação da proporção ideal entre agregado miúdo e gráudo	Massa unitária seca no estado compactado	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Definir a melhor relação ar/br para o traço</li> </ul>
Concreto	Ajuste do agregado gráudo	Ensaio de espalhamento, Funil V e Caixa L	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Determinar o teor de agregados para garantir a estabilidade do concreto</li> <li>- Ajustar o teor de aditivo para se atingir as propriedades do CAA</li> <li>- Avaliar a perda de fluidez do concreto</li> </ul>
	Ajuste do aditivo		
	Perda de fluidez		
	Massa específica e Teor de Vazios	Relação com a massa específica teórica	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Avaliar o teor de vazios</li> </ul>
	Segregação	Tubo U	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Avaliar a segregação</li> </ul>
	Exsudação	Medida da água superficial em recipiente padrão	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Avaliar a ocorrência de exsudação</li> </ul>
	Propriedades Mecânicas		Resistência à compressão
Módulo de Elasticidade			
	Otimização da dosagem	Acompanhamento dos parâmetros	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Obter um método otimizado para o CAA com resistência à compressão especificada</li> </ul>

(Fonte: Melo, 2005 – Modificado)

**a) Cimento**

Foi empregado o cimento CP II-F 32 a granel, da marca CIPLAN. Este cimento foi escolhido por ser de utilização corrente na região e devido à necessidade de estabelecer um parâmetro de comparação com os concretos convencionalmente utilizados na confecção de estacas escavadas. Na Tabela 4 estão apresentadas as principais características do cimento utilizado, fornecido pela CIPLAN. A Figura 35 apresenta a curva granulométrica do cimento empregado obtido no granulômetro à laser (UnB).

Tabela 4. Resumo do procedimento experimental adotado no desenvolvimento do trabalho

Ensaio Físico Químicos	NBR - NM ENSAIOS QUÍMICOS	Resultados	Limites da NBR 5733/91	Dimensão
Dióxido de silício	SiO <sub>2</sub> NBR NM 14	19,73	-	%
Óxido de alumínio	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> NBR NM 14	4,79	-	%
Óxido de ferro	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> NBR NM 14	2,86	-	%
Óxido de cálcio	CaO NBR NM 14	61,64	-	%
Óxido de magnésio	MgO NBR NM 14	4,68	≤ 6,5	%
Anidrido Sulfúrico	SO <sub>3</sub> NBR NM 16	3,25	≤ 3,5	%
Óxido de sódio	Na <sub>2</sub> O NBR NM 17	-	-	%
Óxido de potássio	K <sub>2</sub> O NBR NM 17	-	-	%
Perda ao fogo	P.F. NBR NM 18	1,49	≤ 4,5	%
Óxido de cálcio livre	CaOL NBR NM 13	2,18	-	%
Resíduo insolúvel	RI NBR NM 15	1,40	≤ 1,0	%
Equivalente alcalino	- CALCULO	-	-	%
Finura # 200	- NBR 11579	0,24	-	%
Finura # 325	- NBR 12826	1,72	-	%
Blaine	- NBR NM 76	3950	-	cm <sup>2</sup> /g
Início de Pega	- NBR NM 65	187	≥ 60	min.
Fim de Pega	- NBR NM 65	264	≤ 600	min.
Espansibilidade (A Quente)	- NBR 11582	1,00	≤ 5,0	mm
Massa específica	- NBR NM 23	3,20	-	g/cm <sup>3</sup>
Resist. à Compressão	R1 NBR 7215	28,3	14,0	MPa
Resist. à Compressão	R3 NBR 7215	34,8	24,0	MPa
Resist. à Compressão	R7 NBR 7215	39,4	34,0	MPa
Resist. à Compressão	R28 NBR 7215	44,5	-	MPa

(Fonte:CIPLAN-DF)

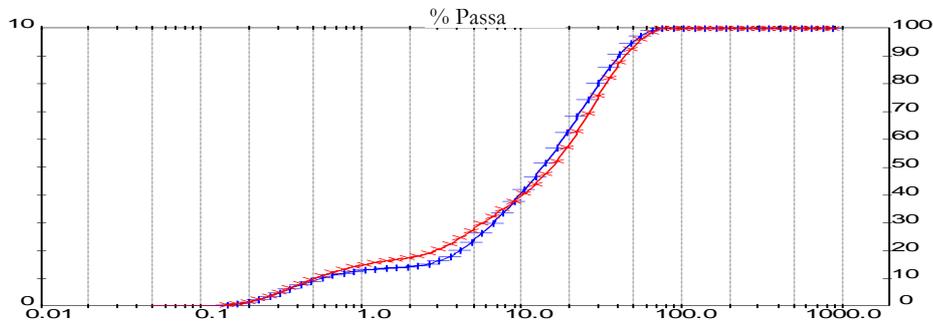


Figura 35. Curva granulométrica do cimento

## b) Agregados

Foram selecionados três agregados: brita 0, areia britada e areia de rio natural (areia rosa). Os agregados britados são de origem calcárea. Neste caso, fez-se a opção de manter constante o tipo de agregado variando apenas o tipo do agregado miúdo.

Os ensaios realizados para caracterização dos agregados foram: granulometria (NBR NM 248, 2001), material pulverulento (NBR NM 46, 2003), massa específica (NBR 9776, 1987; NBR 9937, 1987), massa unitária no estado solto (NBR 7251, 1982), absorção de água (NBR NM 30, 2001; NBR NM 53, 2002). A Tabela 5 apresenta os resultados dos ensaios.

Tabela 5. Principais características dos agregados

		Areia Rosa	Areia Britada	Brita 0	
Granulometria (% retida acumulada)	Abertura (mm)	25	0,00%	0,00%	0,00%
		19,5	0,00%	0,00%	0,00%
		12,5	0,00%	0,00%	0,33%
		9,5	0,00%	0,07%	6,83%
		6,3	0,46%	0,10%	26,71%
		4,8	0,82%	0,71%	57,60%
		2,4	1,73%	3,91%	86,02%
		1,2	2,87%	45,61%	93,21%
		0,6	3,76%	78,07%	94,81%
		0,3	7,70%	91,65%	95,37%
		0,15	88,47%	98,15%	96,81%
		0,075	98,20%	99,10%	97,74%
	Fundo	100,00%	100,00%	100,00%	
Diâmetro Máximo (mm)		0,6	2,4	12,5	
Módulo de Finura		2,04	4,17	-	
Massa Unitária(kg/dm <sup>3</sup> )		1,33	1,61	1,45	
Massa Específica (kg/dm <sup>3</sup> )		2,61	2,68	2,69	
Absorção de água (%)		1,45	1,00	0,70	
Material Pulverulento (%)		4,02	5,05	8,80	

## c) Filer

Foram utilizados como filer dois resíduos distintos. O primeiro denominado F1 é de origem calcária, com granulometria mais fina, e o segundo, denominado F2, de origem granítica. Nos resíduos foram realizados ensaios de granulometria por peneiramento, sedimentação e à laser; análise química, perda ao fogo, difratometria de Raio-X, massa específica, área específica pelo método Blaine (NBR NM 76, 1998). Os resultados dos ensaios estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6. Principais características do filer

Ensaio		Resíduo	
		F1	F2
% partículas com diam. < 0,075 mm		85	34
Dimensão máxima (mm)		0,15	0,3
Massa Específica (kg/m <sup>3</sup> )		2,73	2,66
Área Específica (cm <sup>2</sup> /g)		1471	164
Relação a/f para consistência normal (VICAT)		0,24	0,34
Composição Química (%)	SiO <sub>2</sub>	7,14	45,87
	CaO	33,09	4,87
	MgO	12,4	0,33
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	2,98
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,04	0,93
	Metais Pesados	-	-
	Perda ou Rubro	44,08	45,02
	Insolúvel em HCl	3,25	-

#### d) Aditivos

Foram utilizados dois tipos de aditivos químicos: SP 1 (a base de policarboxilatos de 3ª geração) e SP 2 (a base de naftaleno sulfonado). A opção por se variar o tipo do aditivo foi avaliar o desempenho x custo. A Tabela 7 apresenta as características dos aditivos, conforme especificado pelo fabricante.

Tabela 7. Principais características dos aditivos

Propriedades	SP 1	SP 2
Base Química	Policarboxilatos	Naftaleno Sulfonado
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	1,067 a 1,107	1,185 a 1,225
Estado Físico	Líquido viscoso	Líquido
Cor	Bege	Castanho
Teor de Sólidos (%)	28,5 a 31,5	38 a 42

#### 12.4.3. Estudos na pasta

Após a definição dos materiais e das relações a/c, iniciou-se o estudo das pastas. Inicialmente foi ajustado visualmente o teor de filer a ser empregado para cada relação a/c adotada. A seguir, foram realizados os ensaios de fluidez para determinação do teor de saturação do aditivo utilizando-se o Cone de Marsh e o Mini-Slump.

Os ensaios foram realizados em sala com temperatura média  $26\pm 2^{\circ}\text{C}$ . Para mistura foi utilizada uma argamassadeira mecânica de eixo planetário com duas velocidades de rotação (Figura 36).



Figura 36. Argamassadeira planetária utilizada na pesquisa

Para realização da mistura foi adotada a sequência apresentada na Tabela 8.

Tabela 8. Sequência de mistura das pastas

Atividade	Velocidade	Tempo de Mistura (minutos)	Tempo Acumulado (minutos)
100% cimento + 80% água	Lenta	0,5	0,5
100% fíler	Lenta	0,5	1,0
Mistura	Rápida	1,0	2,0
Limpeza da pá e descanso da pasta	-	3,0	5,0
100% aditivo + 20% água	Rápida	1,0	6,0

#### 12.4.4. Teor de Finos

Para cada relação água/cimento foi definido um teor de finos referente à fração inferior a  $75\mu\text{m}$ , incorporando ao cimento pequenos acréscimos de resíduo até que fosse observada segregação na pasta. Seguindo a metodologia proposta por Melo (2005), os teores de finos encontrados foram variados em 5% para mais e para menos, para que se pudesse ajustar o teor de saturação do aditivo. A Tabela 9 mostra os teores encontrados em função da relação a/c e do tipo de resíduo. Foram realizadas nove misturas para cada tipo de resíduo.

Tabela 9. Misturas realizadas nas pastas

Relação a/c	% Finos	Mistura	
		F1	F2
0,5	30	M11	M21
	35	M12	M22
	40	M13	M23
0,55	35	M14	M24
	40	M15	M25
	45	M16	M26
0,6	40	M17	M27
	45	M18	M28
	50	M19	M29

#### 12.4.5. Saturação do aditivo

Foi determinado o teor de saturação dos aditivos através do ensaio do Cone de Marsh e do Mini-Slump. O ensaio foi realizado preenchendo-se o cone com 1000 ml de pasta e medindo-se o tempo necessário ao escoamento de 500 ml (Figura 37), procedimento utilizado por Gomes (2002). O volume da pasta que escoava pelo cone era medido por um recipiente graduado e os tempos medidos com um cronômetro digital. Para cada mistura fez-se o acréscimo de aditivo, com incrementos de 0,1% em relação à massa de cimento, considerando-se apenas o teor de sólidos até que fosse observada segregação da pasta. O ensaio era realizado 5 minutos após o enchimento do cone.



Figura 37. Determinação do tempo de escoamento do Cone de Marsh para pastas

Ao término do ensaio do Cone de Marsh, utilizando-se a mesma pasta, era realizado o ensaio do Mini-Slump. Neste ensaio eram feitas duas medidas, perpendiculares entre si, do diâmetro de

espalhamento e o tempo ( $T_{115}$ ) que a pasta levava para atingir o diâmetro de 115 mm. Todos os ensaios foram repetidos para avaliar o comportamento dos dois aditivos.

As dosagens dos aditivos eram modificadas até que o tempo de escoamento do Cone não sofresse mais alteração significativa e o espalhamento atingisse  $180\pm 10$ mm, sem apresentar segregação.

#### 12.4.6. Estudo em Argamassas

Após a obtenção das pastas, foram realizados os ensaios com argamassas, otimizando o teor de agregado miúdo e ajustando os teores dos aditivos superplastificantes. Nesta etapa foram realizados ensaios no Cone de Marsh e no tronco de cone da mesa de consistência (Figura 38). Os ensaios no Cone de Marsh, com argamassas, da mesma forma que nas pastas, têm a finalidade de determinar o ponto de saturação do superplastificante, utilizando procedimentos semelhantes. Na curva obtida nos ensaios no Cone de Marsh com argamassas, para cada percentual de resíduo utilizado, fazendo variar o percentual de superplastificante sólido na mistura, o ponto de saturação é aquele a partir do qual o tempo de fluxo não sofre variações consideráveis. Os ensaios da argamassa no Tronco de cone da mesa de consistência têm a finalidade de verificar a capacidade de fluir da argamassa, medindo os diâmetros de espalhamento. Edmatsu et al. (1999) apud Gomes (2002) sugere para esse ensaio, um diâmetro final de espalhamento de 200 mm a 283 mm.

Os aparatos utilizados nestes ensaios são: a argamassadeira, o tronco de cone de consistência, uma base de vidro, um beaker, uma trena, um cronômetro e recipientes para acomodar os componentes da mistura antes do ensaio.



Figura 38. Ensaio com tronco cone em argamassas

Como na produção das pastas, as argamassas foram produzidas no ambiente do laboratório com temperatura média de  $26\pm 2^\circ\text{C}$  e mesma argamassadeira. As etapas da mistura estão apresentadas na Tabela 10.

Tabela 10. Misturas realizadas nas pastas

Atividade	Velocidade	Tempo de Mistura (minutos)	Tempo Acumulado (minutos)
100% cimento + filler + 80% água	Lenta	0,5	0,5
100% Agregado miúdo	Lenta	0,5	1,0
Mistura	Rápida	1,0	2,0
Limpeza da pá e descanso da pasta	-	3,0	5,0
100% aditivo + 20% água	Rápida	1,0	6,0

Nesta etapa foi escolhida uma mistura para cada relação água-cimento e para cada um dos dois finos, se acrescentado teores de agregado miúdo de 35, 40 e 45%. Para cada teor de agregado miúdo foi ajustado o teor de aditivo.

Para as argamassas com resultados dentro dos requisitos estabelecidos foram moldados 3 corpos-de-prova cilíndricos, com 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura, preenchidos sem adensamento, para ensaio de resistência à compressão axial, aos 28 dias de idade.

Foi avaliada ainda a massa específica real das argamassas pelo método gravimétrico.

#### 12.4.7. Esqueleto granular

As propriedades necessárias para o CAA limitam o tamanho do agregado graúdo e o volume de agregados que deve ser usado. Normalmente o tamanho máximo do agregado é limitado a 20mm para permitir alto fluxo sem problemas de segregação. O volume de agregado, especialmente o do agregado graúdo, deve ser menor que no concreto convencional. O menor volume de vazios encontrado na composição ótima do esqueleto granular é uma referência no próximo passo do procedimento de dosagem da mistura, onde o volume de pasta final é obtido nos ensaios que caracterizam as propriedades do concreto no estado fresco.

Nesse trabalho, foram testadas duas composições: areia britada e brita; areia britada, areia rosa e brita. Para o ensaio, os agregados secos, foram misturados manualmente, partindo de uma massa de 30 kg de brita e 0 kg de areia britada, fazendo variar a relação entre elas. No caso da composição ternária, depois do ensaio com a brita e a areia britada, foi realizado o mesmo procedimento utilizando-se a mistura ideal brita-areia britada, acrescentando-se a areia rosa. Para cada variação dos teores na mistura, preenchia-se um recipiente cilíndrico, com aproximadamente de 15 l, em três camadas, aplicando-se 25 golpes por camada. Para cada uma dessas relações os materiais eram misturados três vezes, com três preenchimentos do recipiente e três obtenções de massa unitária. A massa unitária de cada relação entre areia e brita era a média entre as três massas obtidas da mistura. Para cada massa unitária obtida era obtido também o volume de vazios entre os componentes da mistura.

#### 12.4.8. Produção do concreto

O estudo do concreto consistiu na determinação do teor do agregado graúdo, do teor de aditivo e das propriedades no estado fresco e endurecido.

Foi empregada, para mistura dos concretos, uma betoneira intermitente, de eixo inclinado e pás solidárias à cuba, com capacidade para 120 l.

A produção do concreto se deu em duas etapas. Primeiramente foram produzidos aproximadamente 10 l de concreto para ajuste do percentual de agregado graúdo, realizando-se apenas o ensaio de espalhamento. Ajustado o traço, confeccionou-se então um volume de 40 l, para realização dos ensaios no estado fresco e endurecido. A sequência de mistura adotada está apresentada na Tabela 11.

Tabela 11. Misturas realizadas nas pastas

Atividade	Tempo de Mistura (minutos)	Tempo Acumulado (minutos)
100% agregado graúdo + 80% água	1	1
100% cimento + 100% filer + 15% água	1,5	2,5
100% Agregado miúdo	1,5	4,0
Limpeza da pá e descanso da pasta	1,0	5,0
Mistura	2,0	7,0
80% aditivo + 5% água	3,0	10,0
20% aditivo	4,0	14,0

Após o ajuste do agregado graúdo, foi determinado o teor de aditivo para que fossem obtidas misturas que atendessem aos parâmetros dos CAA. Foram realizados ensaios de espalhamento, Funil V, Caixa L e Tubo U.

No ensaio de espalhamento foram medidos dois diâmetros em direções perpendiculares, realizando-se a média entre as duas (Figura 39).



Figura 39. Ensaio de espalhamento

A fluidez foi avaliada no ensaio do Funil V, cujo procedimento consistiu no preenchimento completo do funil e na medição do tempo para o completo escoamento do concreto (Figura 40).

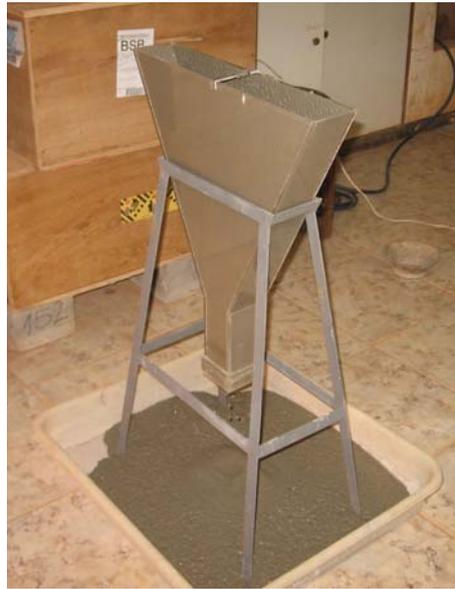


Figura 40. Ensaio do Funil V

No ensaio da Caixa L, foram analisadas a capacidade de passar por bloqueios e a capacidade de preenchimento. Foram utilizadas barras de aço de 10 mm de diâmetro para simular as armaduras, espaçadas de 42 mm.

O ensaio da Caixa L seguiu a seguinte seqüência: 1- Colocar a caixa L sobre uma superfície nivelada; 2- Limpar e umedecer as superfícies internas da Caixa; 3- Preencher com concreto a parte superior da Caixa, sem utilizar nenhum tipo de adensamento, deixando a superfície do concreto nivelado, retirando o excedente; 4- Após 15 segundos, levantar rapidamente a porta e simultaneamente ligar os dois cronômetros registrando em segundos os tempos para o concreto atingir na horizontal as marcas de 20 cm e 40 cm,  $T_{L20}$  e  $T_{L40}$ , respectivamente; 5- Logo após o concreto atingir seu estado de repouso, medir com uma trena suas alturas  $H_1$  e  $H_2$ , no início e final da parte horizontal da Caixa L, respectivamente.



Figura 41. Ensaio da Caixa L

O equipamento do Tubo U consiste de três segmentos de tubo e dois joelhos de PVC de 150mm, cortados em meia cana e mantidos juntos através de fixação longitudinal com fitas adesivas e com abraçadeiras transversais, de forma que, após o ensaio, as partes sejam separadas sem provocar destruição do concreto nele colocado. A segregação é avaliada como o grau de não uniformidade na quantidade de agregado graúdo, nas diferentes partes do tubo. São utilizados, nesse teste, aproximadamente 32 litros de concreto.

Os aparatos utilizados neste ensaio são: Recipientes para encher o Tubo U de concreto, Tubo U, instrumentos cortantes para retirar as amostras, três bandejas para receber as amostras, peneira de 5mm, papel toalha para enxugar as britas das amostras e uma balança.

O ensaio do Tubo U seguiu a seguinte seqüência: 1- Nivelar e aprumar o Tubo U com o auxílio de uma base metálica; 2- Introduzir o concreto em queda livre de uma altura de 80 cm, de forma que o mesmo preencha a fôrma de Tubo U, completamente, até sua extremidade oposta sem nenhuma compactação; 3- Manter o Tubo U na vertical durante um período de aproximadamente três horas até o concreto endurecer parcialmente, ficando rijo o bastante para se manter com a forma, mas não totalmente endurecido; 4- Colocar o Tubo U na horizontal e remover a meia cana superior do mesmo; 5- Extrair as três amostras cilíndricas de 10 cm de espessura, a primeira corresponde aos primeiros 10cm da extremidade de entrada do concreto, a segunda e a terceira amostras são extraídas, no sentido de fluxo do concreto, no início e no final do trecho horizontal do tubo, respectivamente; 6- Lavar as três amostras, separadamente, sobre uma peneira de 5 mm para remover a argamassa e se obter o agregado graúdo limpo; 7- Enxugar as superfícies das britas provenientes das três amostras com papel-toalha e determinar suas massas separadamente.

A massa da amostra 01 serve como referência. Calculam-se as razões da massa da amostra 02 sobre a massa da amostra 01 e a massa da amostra 03 sobre a massa da amostra 01. A Razão de Segregação (RS) é tomada como o menor dos dois valores. A segregação é considerada desprezível se  $RS = 0,90$  (Gomes,2002).



Figura 42. Sequência do ensaio do Tubo U

#### **12.4.9. Determinação das Propriedades Mecânicas do CAA no Estado Endurecido**

Após passar pelos testes no estado fresco, o CAA será submetido a ensaios no estado endurecido, no sentido de estudar suas propriedades mecânicas de Resistência à Compressão Axial (aos 3, 7, 28 e 91 dias), Módulo de Deformação Estática (aos 28 dias), Resistência à Tração por Compressão Diametral (aos 28 dias), Porosimetria por Intrusão de Mercúrio (aos 100 dias) e Absorção de Água (aos 28 e 91 dias), seguindo as orientações estabelecidas nas Normas Brasileiras. Para cada traço de concreto produzido, foram moldados 24 (vinte e quatro) corpos-de-prova, em formas cilíndricas metálicas de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, com preenchimento sem adensamento mecânico. A cura dos corpos-de-prova foi feita ao ar, nas primeiras 24 horas, e, depois de desmoldados, foram curados em câmara úmida até a idade dos ensaios.

#### **12.5. Aplicação do Concreto Auto-adensável em estacas – Simulação**

Nesta etapa foram realizados ensaios no Campo Experimental de Fundações e Ensaios de Campo da Universidade de Brasília com vistas à obtenção dos parâmetros do solo para simulação numérica do comportamento de estacas escavadas, constando de:

- execução três furos de sondagem SPT e três de CPT para caracterização do perfil estratigráfico do campo experimental:

Os ensaios de cone foram executados com equipamento hidráulico motorizado, com capacidade máxima de cravação de 200 kN, hastes cilíndricas de 33 mm de diâmetro e 1 m de comprimento, com um cone elétrico/piezocone de diâmetro igual a 3,56 cm, área de 10 cm<sup>2</sup>, ângulo de base igual a 60° com capacidade máxima na ponta de 100 kN e 1000 kPa de atrito lateral, acoplado a um sistema de aquisição de dados, computador e impressora, que forneceu as planilhas de variação da resistência de ponta ( $q_c$ ) e atrito lateral ( $f_s$ ) ao longo da profundidade. Foi utilizado o software do fabricante, Hogentogler & Company, Incorporated - Columbia, Maryland, USA (1995). Os dados de  $q_c$  e  $f_s$  foram medidos a cada 10 cm com velocidade de cravação estática de 2 cm/s, conforme D-3441 (ASTM, 1995a), D-5778 (ASTM, 1995b) e NBR-12069 (ABNT, 1991a).

Os ensaios foram realizados até o impenetrável, sendo esta limitação uma função do sistema de ancoragem e da capacidade de cravação do equipamento.

- simulação do desempenho de uma estaca tipo hélice contínua com diâmetro de 30 cm e comprimento de 7 m, utilizando os parâmetros do solo do campo experimental e variando as

propriedades do concreto de preenchimento, considerando um concreto convencional e outro auto-adensável.

Foram adotadas as condições geométricas das fundações e os parâmetros característicos do concreto. Em função do processo executivo das fundações considera-se  $k = 0,4$ , correspondendo ao  $K_0$  obtido em ensaios triaxiais. O  $f_{ck}$  foi determinado em laboratório, para as idades de 28 dias, para um concreto convencional e um CAA.

Para as simulações utilizou-se o programa PLAXIS, versão 7.2. Devido às vantagens proporcionadas pela interface gráfica do programa, tentou-se reproduzir uma situação real ocorrida durante uma prova de carga realizada no campo experimental. Com o auxílio deste programa, procurou-se determinar a provável distribuição e valores dos módulos de elasticidade do solo com a profundidade, a partir dos dados experimentais de recalques das provas de carga e do conhecimento da estratigrafia do maciço, fornecida por ensaio de campo e laboratório. As curvas carga-deslocamento da fundação foram ajustadas através de análises paramétricas.

Nas análises utiliza-se o modelo axial simétrico que permite, devido a simetria na geometria e na carga atuante, com respeito ao eixo central, simplificar o estudo de uma fundação isolada. O programa calcula a malha correspondente a um segmento de círculo que constitui 1 radiano, sendo os resultados multiplicados por um fator de escala igual a  $2\pi$  para obtenção da carga correspondente a fundação.

## **13. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS PRINCIPAIS RESULTADOS**

### **13.1. Elaboração das Cartas Temáticas**

As cartas temáticas foram geradas, utilizando o programa ArcMap 9.0, pois este módulo apresenta funções para que um mapa possa ser apresentado na forma final de um documento cartográfico. Estão disponíveis opções para editar uma carta e gerar um arquivo para impressão.

As cartas elaboradas foram a de Distribuição de Pedreiras e aquelas que vão caracterizar as pedreiras localizadas como: município em que se encontram, geologia, geomorfologia, solos predominantes.

### 13.2. Distribuição de Pedreiras

Elaborado em base as informações extraídas de imagens de satélite, cuja finalidade foi obter a quantidade de pedreiras em processo de lavra distribuídas na zona em estudo, sendo identificadas nove pedreiras como indica a Figura 43.

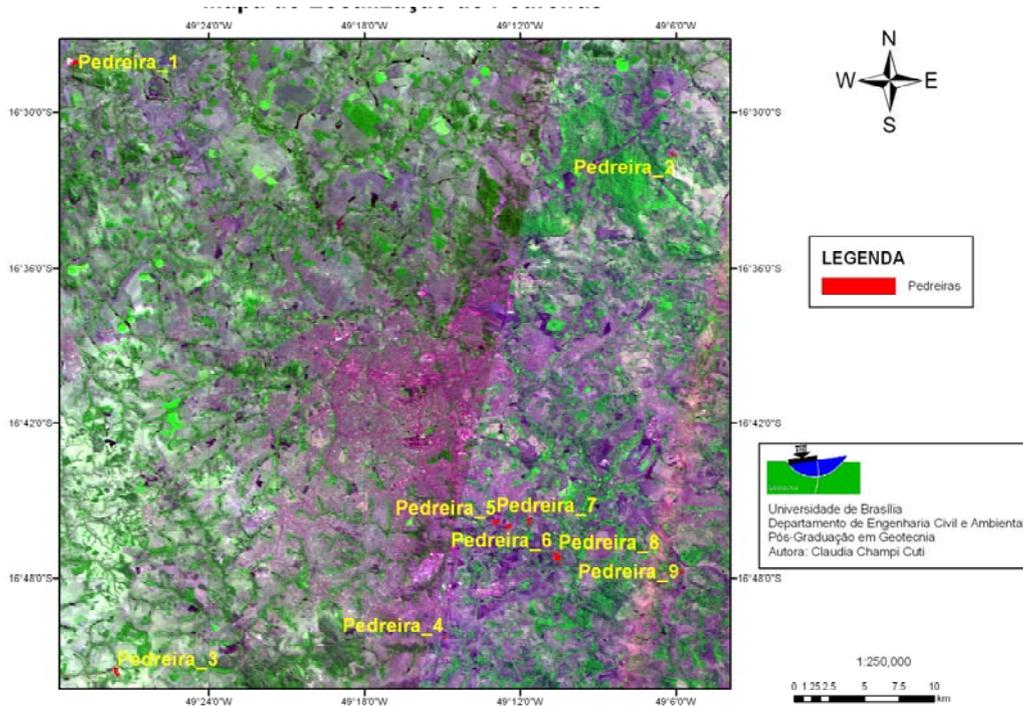


Figura 43. Mapa de localização das pedreiras

A Tabela 12 apresenta cada uma das pedreiras identificadas, com as coordenadas e áreas obtidas pelo próprio programa utilizado.

Tabela 12. Coordenadas geográficas e áreas das pedreiras

Nº Pedreira	Coordenadas Geográficas		Área (m <sup>2</sup> )
Pedreira_1	49°29'11" W	16°28'05" S	174354
Pedreira_2	49°06'10" W	16°31'37" S	93906
Pedreira_3	49°27'36" W	16°51'36" S	122253
Pedreira_4	49°14'46" W	16°50'22" S	54848
Pedreira_5	49°12'43" W	16°45'58" S	144070
Pedreira_6	49°12'27" W	16°45'59" S	135590
Pedreira_7	49°11'41" W	16°45'49" S	137776
Pedreira_8	49°10'35" W	16°47'10" S	94795
Pedreira_9	49°05'47" W	16°47'45" S	74406
TOTAL			1031998

### 13.3. Características das pedreiras

As características das pedreiras foram analisadas com base no município, geologia, geomorfologia e solos. A Figura 44 mostra a distribuição das pedreiras respeito aos municípios.

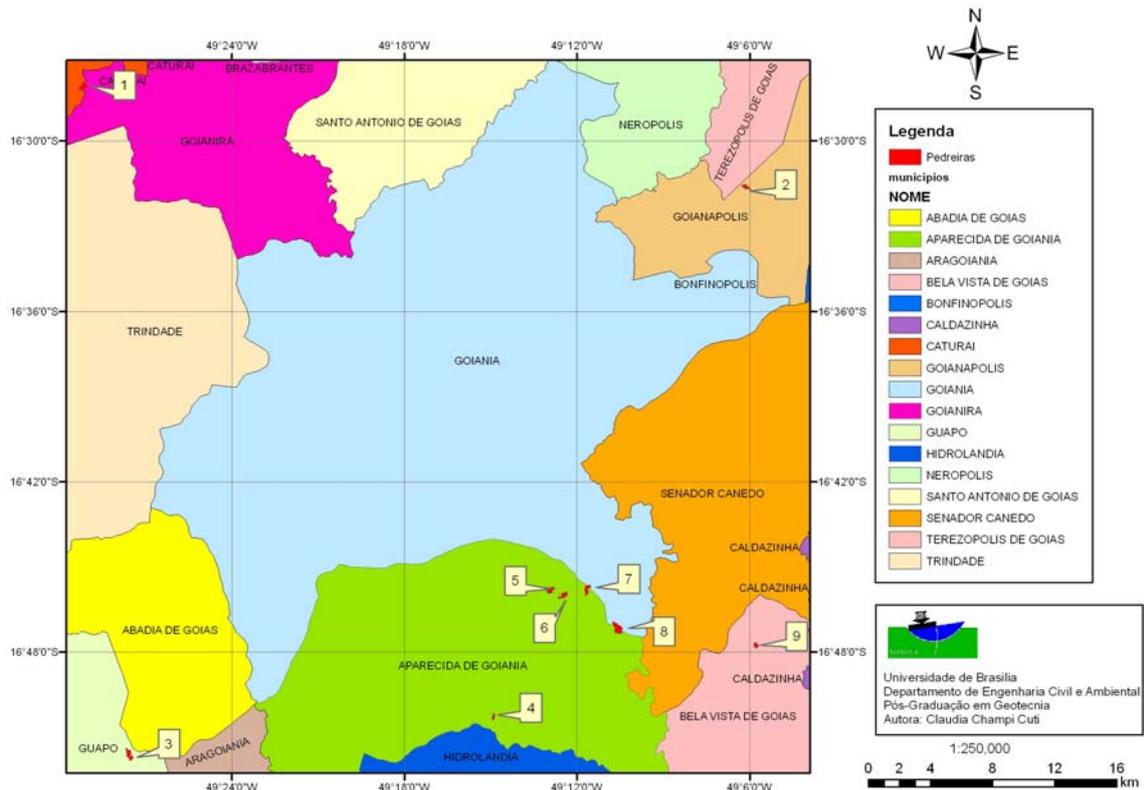


Figura 44. Mapa de localização das pedreiras quanto aos municípios

A maior quantidade, cinco das nove pedreiras, se encontra no município de Aparecida de Goiânia, as outras quatro no município de Goianira, Goianópolis, Guapo e Bela Vista de Goiás, respectivamente.

Com respeito à geologia as Figuras 45 e 46 mostram a localização das pedreiras quanto à geologia em grupo e litologia. A Pedreira 1 se encontra no grupo Granitos Sintectônicos, com litologia Biotita, Muscovita, Granito, Granodiorito. Idade Neoproterozoico. A pedreira 2 se encontra no grupo Sequências Metavulcanossedimentares com litologia Anfibolito, Metandesito, Xisto. Idade Mesoproterozoico. A pedreira 3 se encontra nos grupos Granitos Sintectônicos e Grupo Araxá (Unidade B) com litologia Biotita, Muscovita, Granito, Granodiorito /Calcixistos, Metacalcario, Quartzo-mica xisto. Idade Neoproterozoico /Mesoproterozoico. A maior concentração de pedreiras 4, 5, 6, 7, 8 e 9 se encontram no grupo Grupo Araxá (Unidade B) com litologia Calcixistos, Metacalcario, Quartzo, mica xisto. Idade Mesoproterozoico.

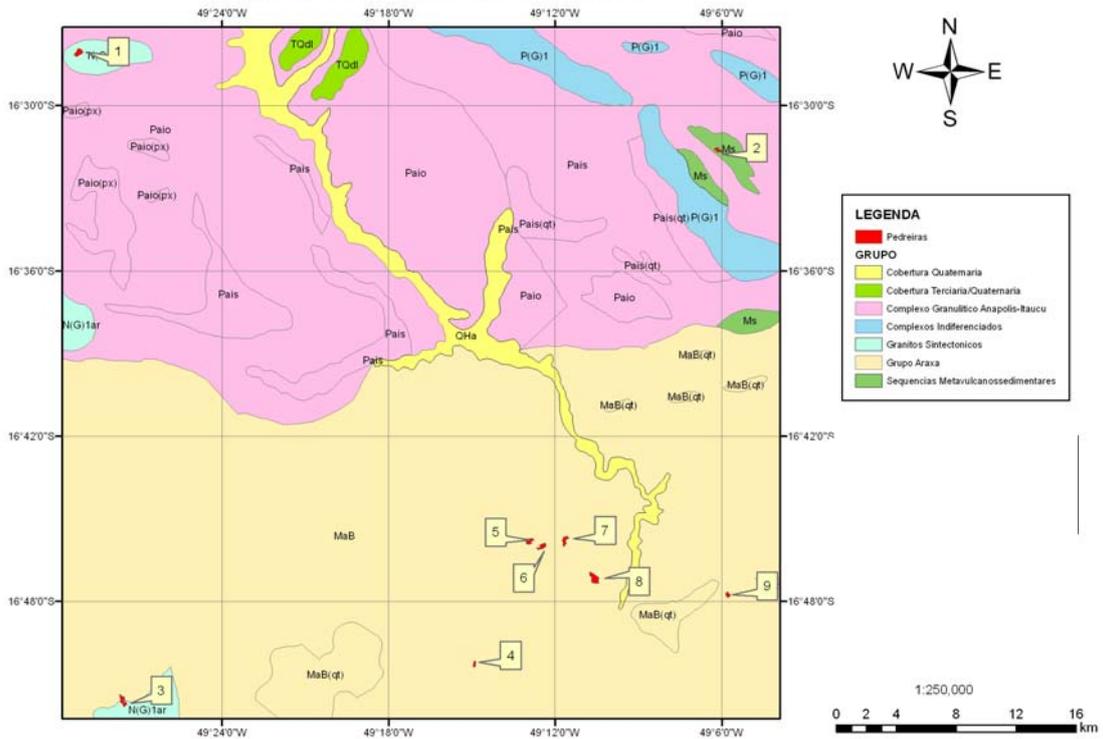


Figura 45. Mapa de localização das pedreiras respeito à geologia por grupos

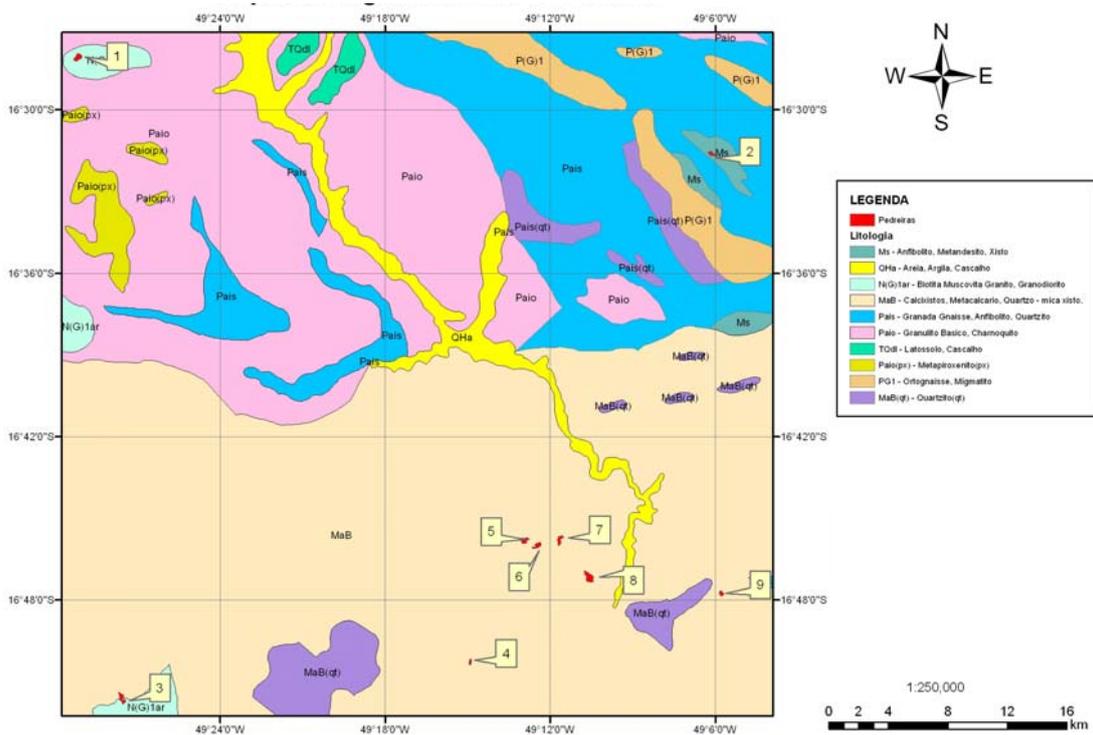


Figura 46. Mapa de localização das pedreiras respeito à geologia por litologia

Com respeito à geomorfologia (Figura 47) só a Pedreira 1 encontra-se em relevo de Morros e Colinas. As demais se encontram na Superfície Regional de Aplainamento IIA.

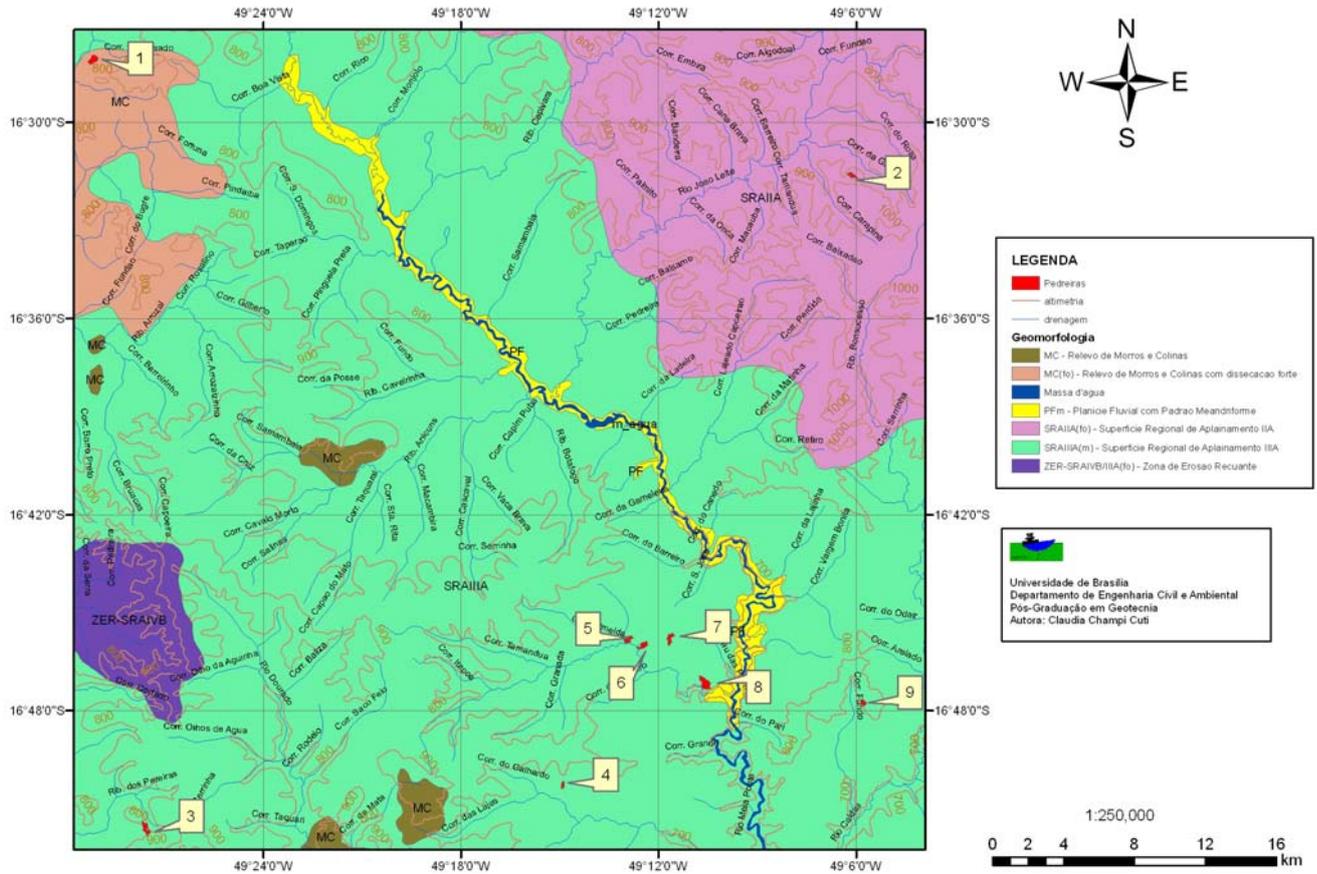


Figura 47. Mapa de localização das pedreiras quanto à geomorfologia

Finalmente, a Pedreira 1 se encontra no PVe1, podzolico vermelho-amarelo eutrofico textura media/argilosa, relevo ondulado e suave ondulado e LEd5, Associação de latossolo vermelho-escuro + latossolo vermelho-amarelo, ambos distroficicos textura argilosa relevo suave ondulado e plano + cambissolo distrofico ou alico textura argilosa cascalhenta ou media cascalhenta relevo ondulado e suave ondulado.

A Pedreira 2, PEe1, Associação de podzolico vermelho-escuro eutrofico ou distrofico, textura media/argilosa ou argilosa, relevo ondulado + podzolico vermelho-amarelo eutrofico moderado textura media cascalhenta/argilosa cascalhe e Cd4, Associação de cambissolo textura media cascalhenta fase pedregosa relevo ondulado e forte ondulado + podzolico vermelho-amarelo textura media/argilosa ou media cascalhenta/argilosa cascalhenta relevo ondulado.

A Pedreira 3, Cd4, Associação de cambissolo textura media cascalhenta fase pedregosa relevo ondulado e forte ondulado + podzolico vermelho-amarelo textura media/argilosa ou media cascalhenta/argilosa cascalhenta relevo ondulado e LEd5, Associação de latossolo vermelho-escuro + latossolo vermelho-amarelo, ambos distroficicos textura argilosa relevo suave ondulado e plano + cambissolo distrofico ou alico textura argilosa cascalhenta ou media cascalhenta, relevo ondulado e suave ondulado.

As Pedreira 4 e 7, LEd5, Associação de latossolo vermelho-escuro + latossolo vermelho-amarelo, ambos distroficis textura argilosa relevo suave ondulado e plano + cambissolo distrofico ou alico textura argilosa cascalhenta ou média cascalhenta, relevo ondulado e suave ondulado. E as 5, 6 e 8, Cd2, Associação de cambissolo textura média cascalhenta + podzólico vermelho-amarelo textura média cascalhenta/argilosa cascalhenta, ambos distroficis relevo suave ondulado e ondulado + cambissolo alico textura argilosa relevo suave ondulado.

A pedreira 9, Ca1, Associação de cambissolo alico textura argilosa relevo suave ondulado + cambissolo distrofico ou alico textura média cascalhenta relevo suave ondulado e ondulado, + latossolo vermelho-amarelo distrofico textura argilosa relevo plano e suave ondulado.

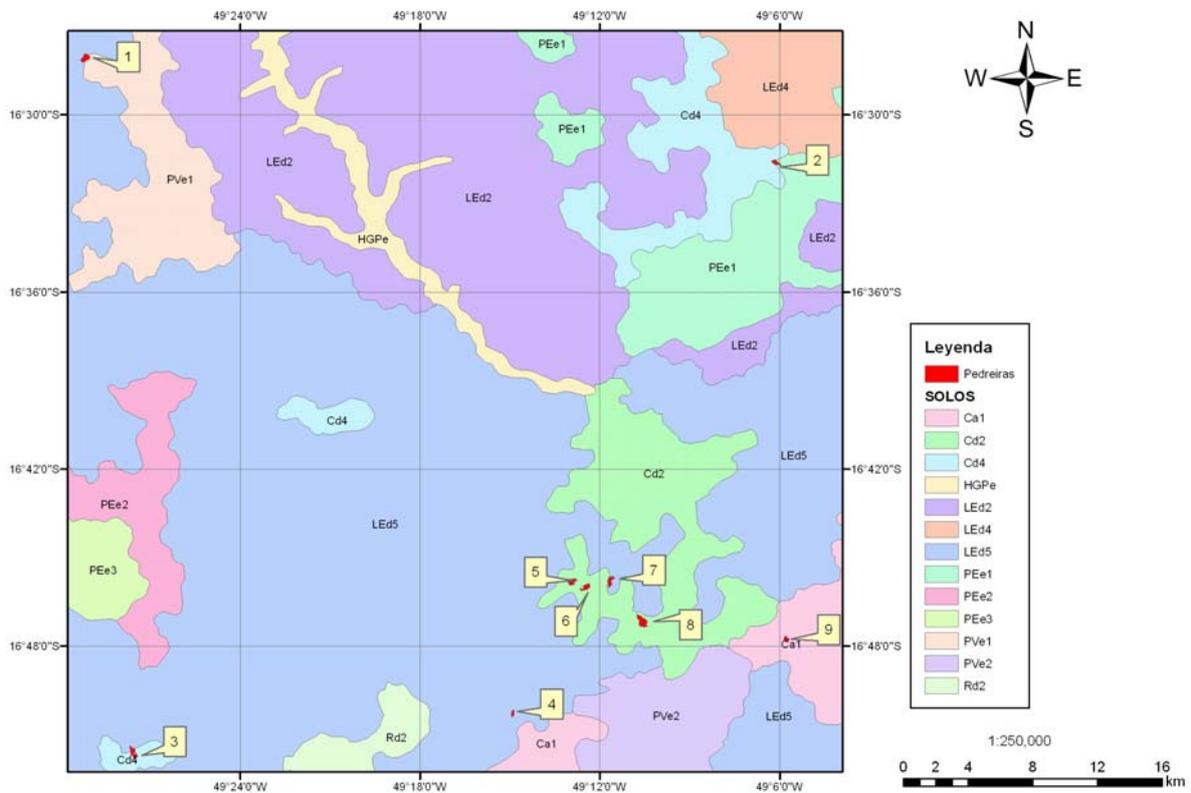


Figura 48. Mapa de localização das pedreiras quanto os solos

### 13.4. Classificação de maciços e ensaios de laboratório

Para realizar a classificação geomecânica dos maciços das pedreiras 1 e 6 se utilizou dados obtidos no levantamento geomecânico. Também foram realizados ensaios com a finalidade de confirmar alguns dados levantados em campo que foram estimados.

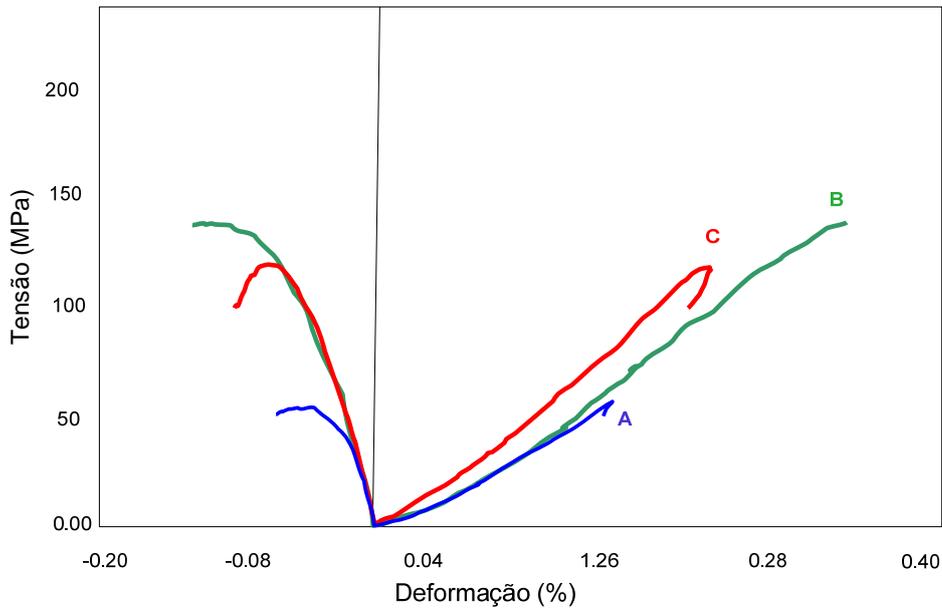


Figura 49. Curvas tensão x deformações axial, radial do ensaio de compressão uniaxial das amostras da Pedreira 1

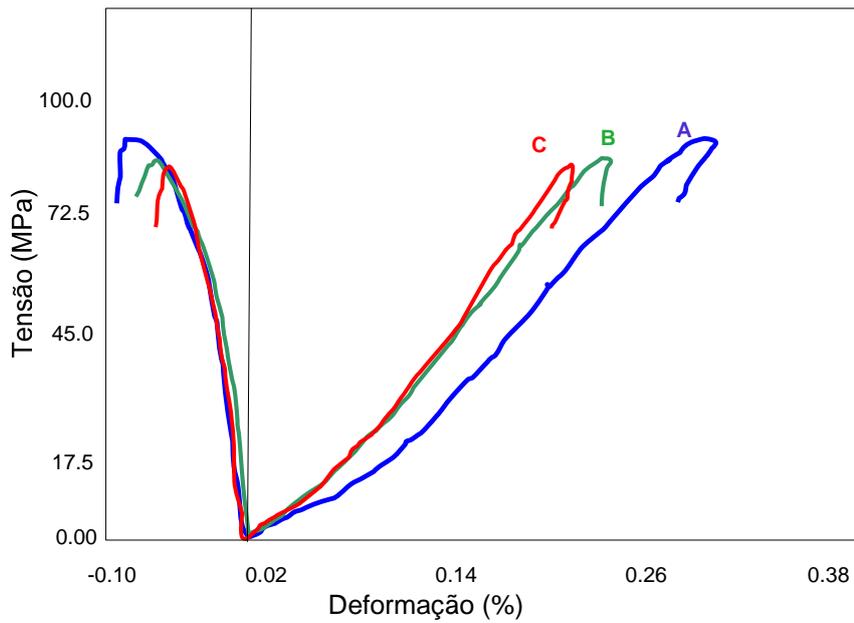


Figura 50. Curvas tensão x deformações axial, radial do ensaio de compressão uniaxial das amostras da Pedreira 6

O ensaio fornece a resistência à compressão uniaxial ( $\sigma_c$ ) e os parâmetros elásticos, tais como o módulo de elasticidade (E) e coeficiente de Poisson, cujos valores estão apresentados na Tabela 13.

Tabela 13. Resultados do ensaio à compressão uniaxial

<b>Pedreira 1</b>	$\sigma_c$ (MPa)	E ( GPa )	$\nu$
Amostra A	53.1	29.1	0.21
Amostra B	141.0	42.5	0.21
Amostra C	112.4	45.8	0.26
<b>Valor médio</b>	<b>102.2</b>	<b>39.1</b>	<b>0.23</b>
<b>Pedreira 6</b>	$\sigma_c$ (MPa)	E ( GPa )	$\nu$
Amostra A	91.7	32.9	0.14
Amostra B	82.9	35.7	0.21
Amostra C	76.0	35.9	0.25
<b>Valor médio</b>	<b>83.5</b>	<b>34.8</b>	<b>0.20</b>

Para classificação da rocha em função da resistência à compressão tem-se:

- Pedreira 1: valor obtido na faixa de 100 a 250 MPa, o que corresponde a uma “rocha muito forte”.
- Pedreira 6: encontra-se na faixa de 50 a 100 MPa, correspondente a uma “rocha forte”.

Os resultados do ensaio de compressão diametral são mostrados nas Figuras 51, 52 e Tabela 14.

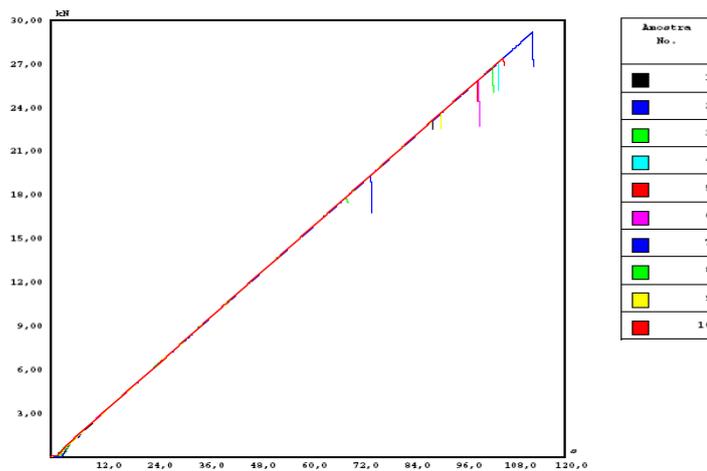


Figura 51. Pedreira 1

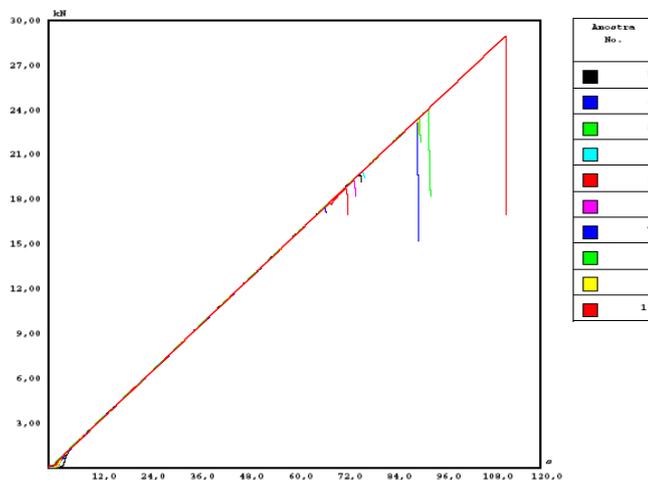


Figura 52. Pedreira 6

Tabela 14. Resultados dos ensaios à tração.

Identificação da amostra	<b>Pedreira 1</b>	<b>Pedreira 6</b>
	$\sigma_{b,t}$ (kN)	$\sigma_{b,t}$ (kN)
1	23.12	19.71
2	19.32	17.48
3	17.82	23.56
4	27.12	19.88
5	25.87	18.73
6	25.96	19.37
7	29.22	23.39
8	26.75	24.08
9	23.63	23.39
10	27.43	28.95
<b>Valor médio</b>	<b>24.62</b>	<b>21.85</b>

A orientação das descontinuidades foram analisadas com o programa DIPS v.5 como mostram as Figuras 53 a 60.

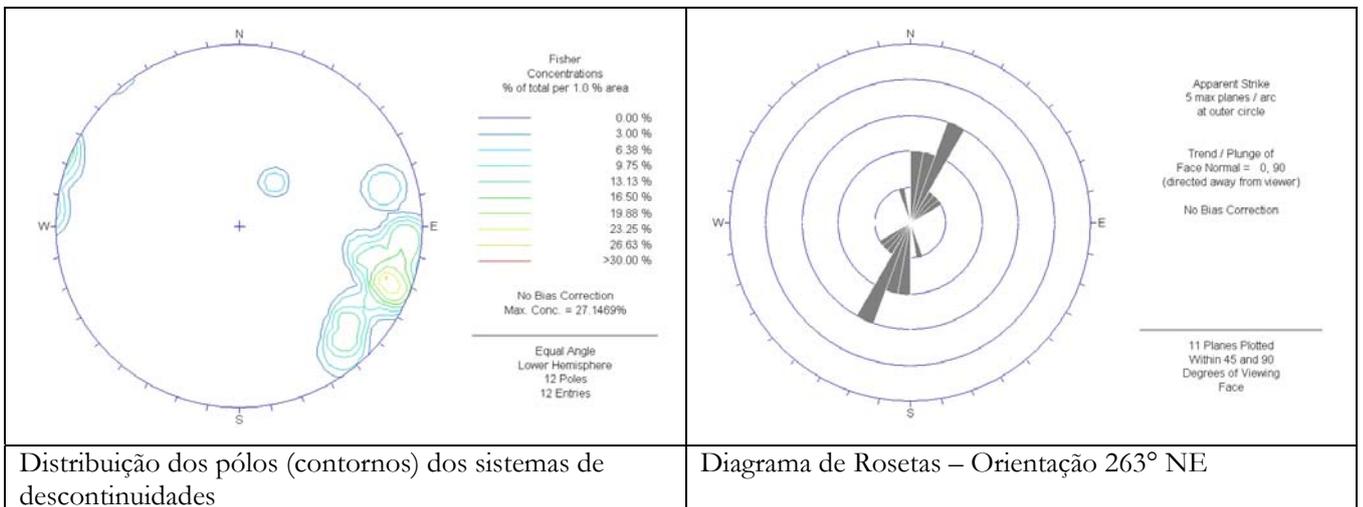


Figura 53. Janela 1 – Pedreira Araguaia – talude 263° NE

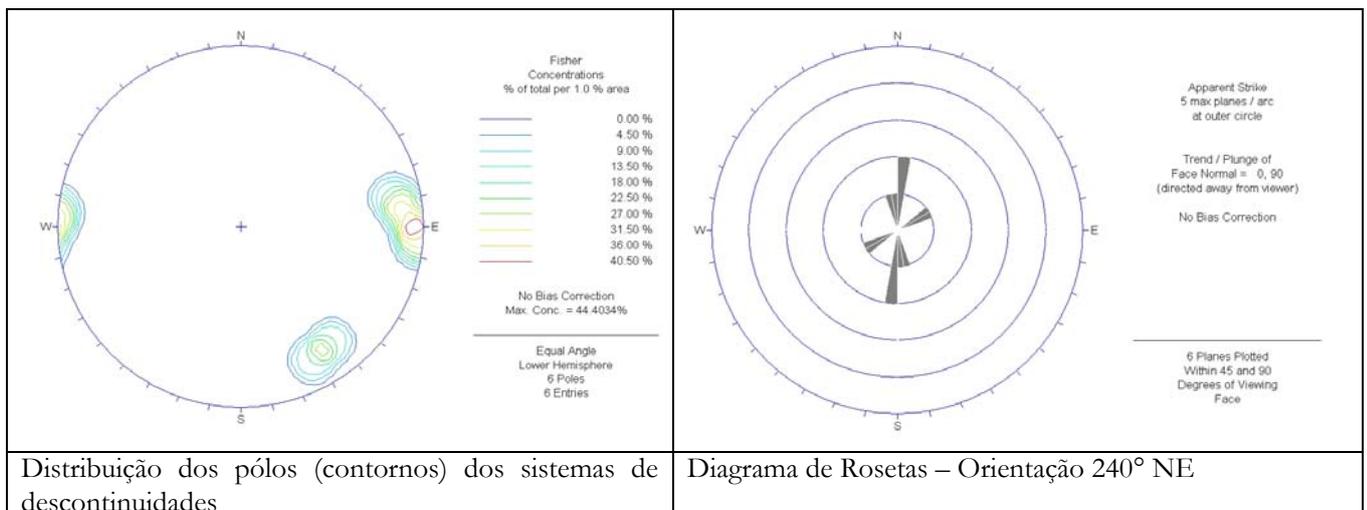


Figura 54. Janela 2 – Pedreira 6 – talude 240° NE

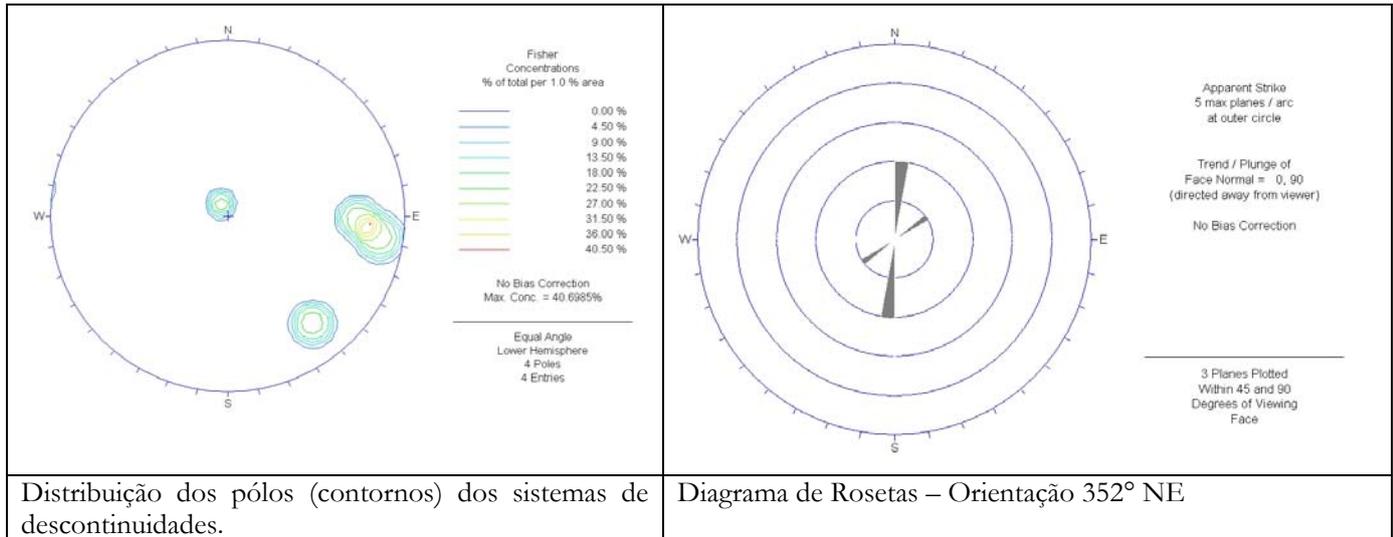


Figura 55. Janela 3 – Pedreira 6 – talude 352° NE

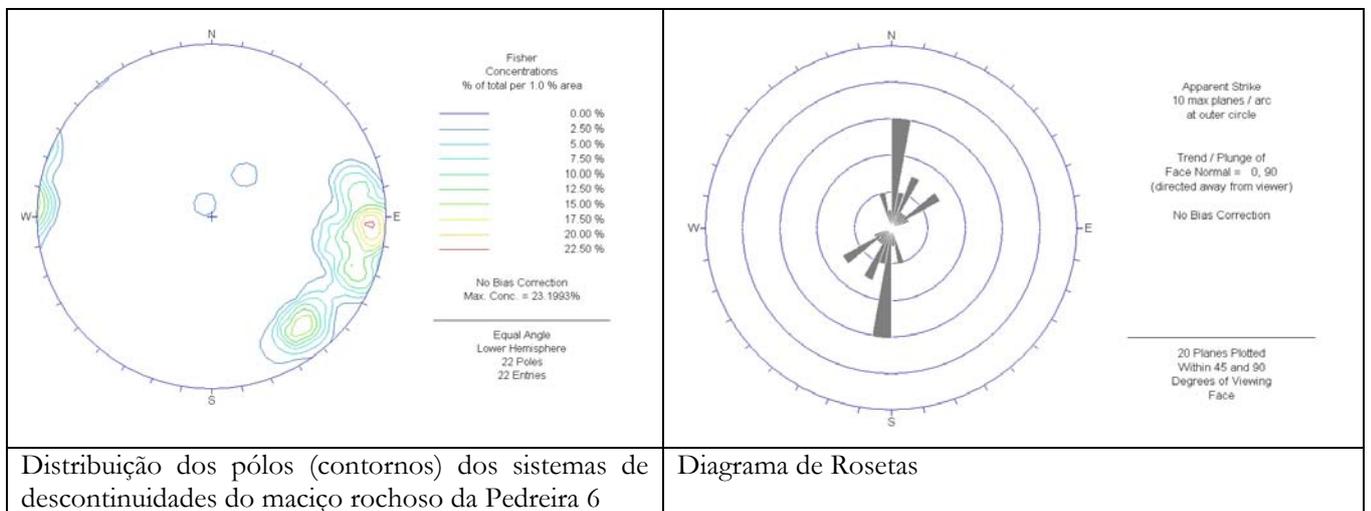


Figura 56. Janela 1, 2 e 3 – Pedreira 6

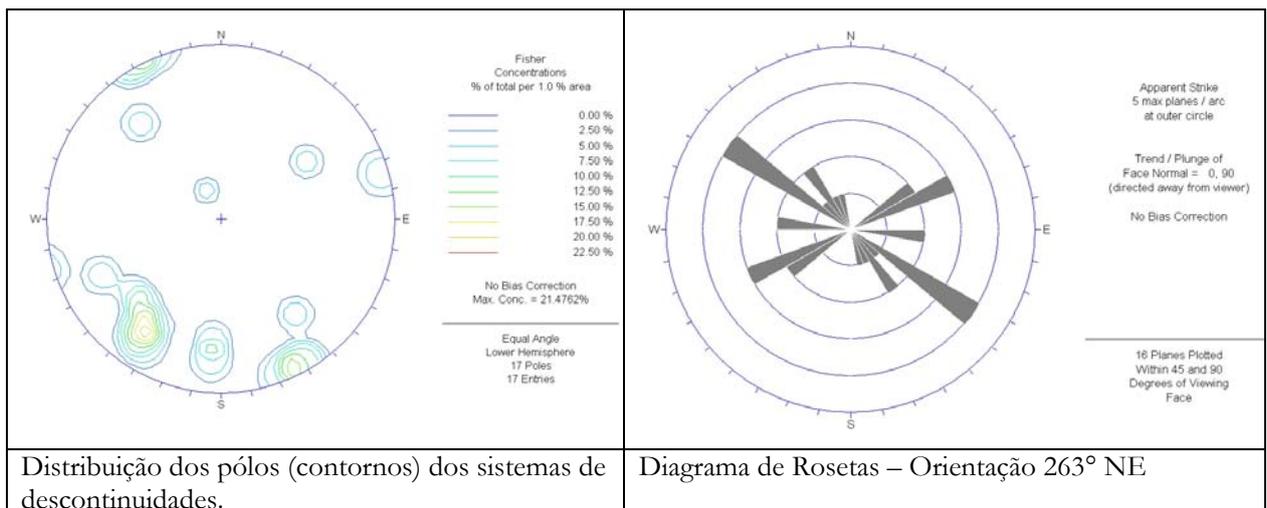


Figura 57. Janela 1 – Pedreira 1 – Talude 263° NE

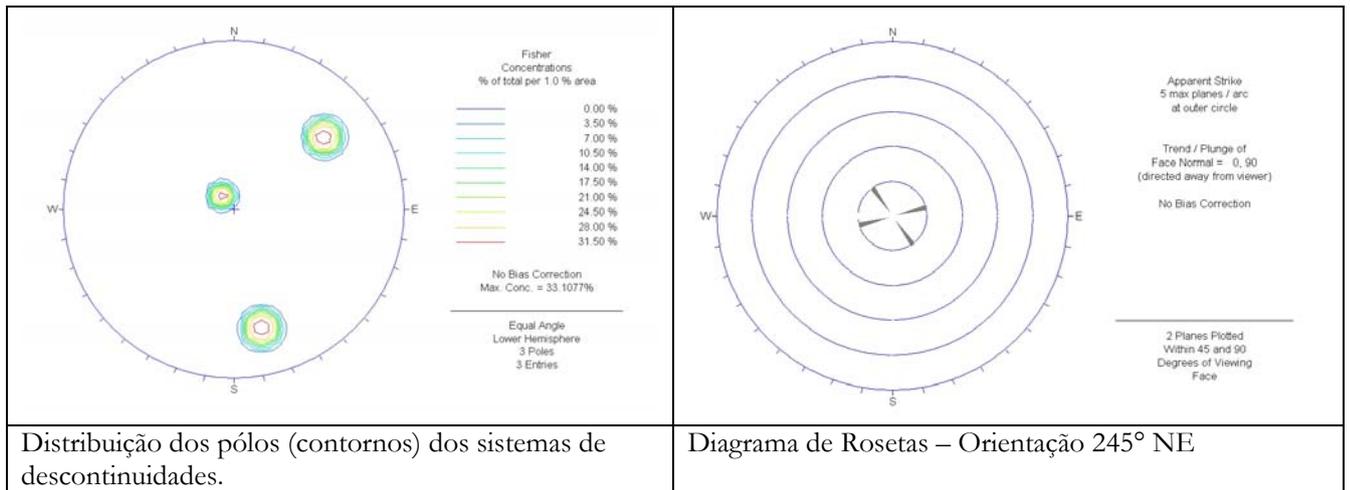


Figura 58. Janela 2 – Pedreira 1 – Talude 245° NE

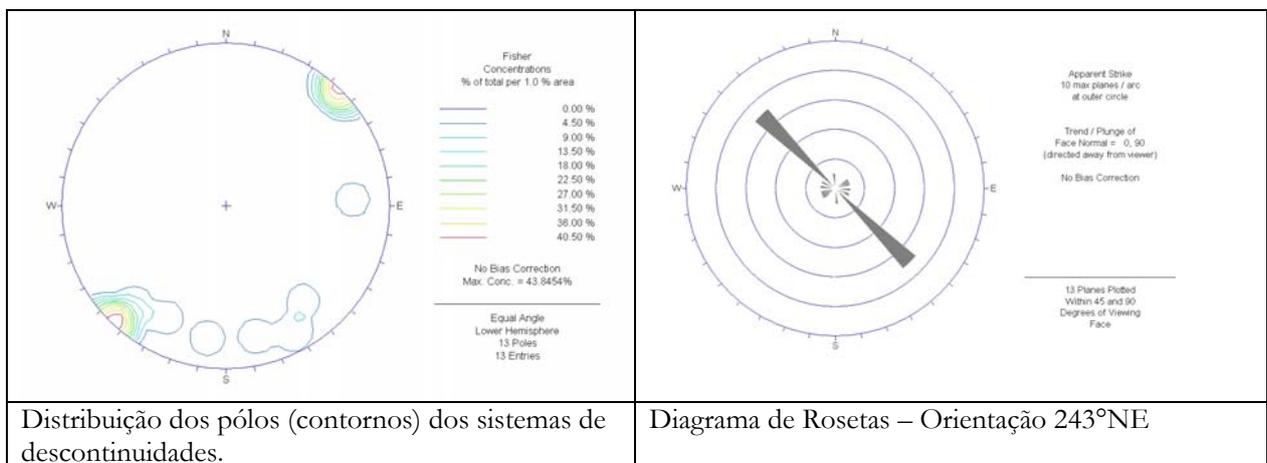


Figura 59. Janela 3 – Pedreira 1 – Talude 243° NE

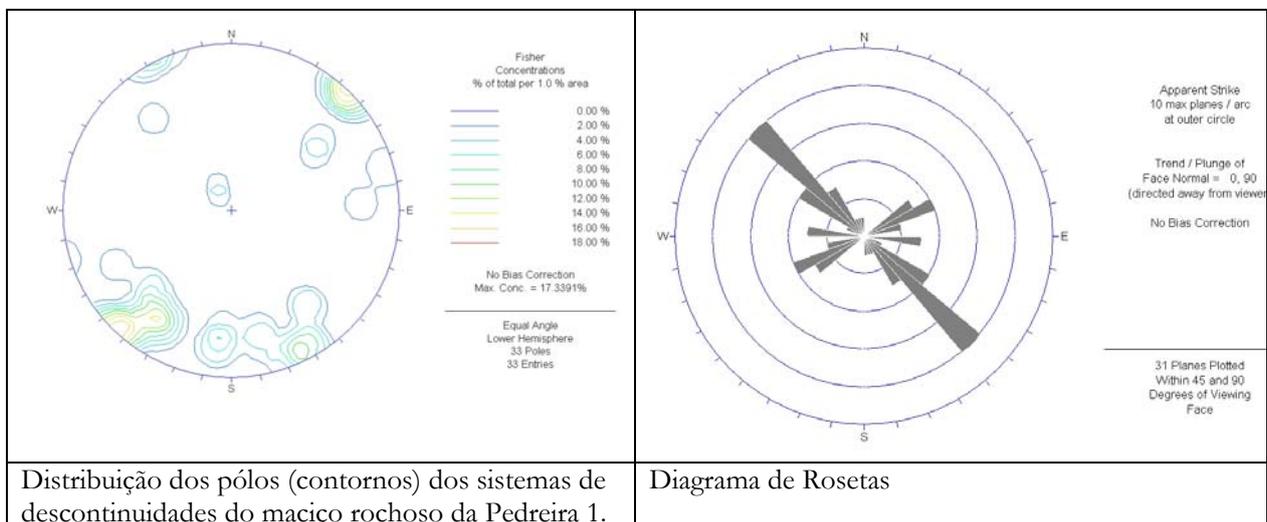


Figura 60. Janela 1, 2 e 3 – Pedreira 1

Com os resultados obtidos dos ensaios e a análise das estruturas foi possível fazer a classificação geomecânica RMR e estimar o Índice de Resistência Geológica (GSI) conforme a Tabela 15.

Tabela 15. Resultados da classificação geomecânica.

<b>Pedreira</b>	<b>RMR</b>	<b>GSI</b>
Pedreira 1	75	51-60
Pedreira 6	58	40-48 menos 5 RMR

Assim, o maciço da pedreira 6 se classifica como maciço de tipo III Regular e o maciço da pedreira 1 é tipo II Bom.

### 13.5. Banco de dados georreferenciado

O banco de dados foi gerado utilizando o programa ArcMap 9.0, pois este módulo apresenta funções para que se possa criar uma tabela de atributos com informações proporcionadas pelo próprio programa e outros inseridos manualmente provenientes das fichas de cadastro, como também os resultados da classificação geomecânica e ensaios de laboratório, além disso também permite colocar o registro de fotos.

Uma das principais características do banco de dados georreferenciado é que integra um sistema automático de acesso aos dados das pedreiras cadastradas e aos mapas temáticos elaborados.

Os atributos que compõem o cadastro georreferenciado foram:

FID (número de linha da tabela), Shape (forma de....), SPRAREA (área em m<sup>2</sup>), SPRCLASSE (número de pedreira escolhido aleatoriamente), Nome (nome da empresa proprietária), Endereço, Data\_activ (data início da atividade), Longitude, Latitude, Elevação\_m (elevação em metros), Mineral (tipo de material que produz), Produção\_t (produção em t/ano), ReservasMed (reserva medida), ReservaInd (reserva indicada), ReservaInf (reserva inferida), ReservaLav (reserva lavrável), Vida\_anos (vida útil em ano), Met\_Lavra (método de lavra), Exploração (só se realiza explorações), UsoMineral (uso do material que produz), Destino (destino do material), Rejeito (rejeito que produz em m<sup>3</sup>/t), Disposição (disposição do rejeito), LicAmbien (licenciamento ambiental), RMR (classificação geomecânica), GSI (Geological Streng Index), Uniax\_MPa (resistência à compressão uniaxial em MPa), E\_GPa (módulo de deformação em GPa), Poissom (coeficiente de Poissom), Tração\_KN (resistência à tração em KN), FotosLavra (registro de fotos de lavra), FotoEnsaio (registro de fotos de ensaios).

Tais atributos podem ser visualizados na tela do banco de dados, conforme ilustrado na Figura 61.

Mineral	Produção_t	ReservaMed	ReservaInd	ReservaInf	ReservaLav	Vida_anos	Mét_Lavra	Exploração	UsoMineral	Destino
Brita - areia de brita	319,500.00 - 106,500.00	357094640	0	0	285675712	500	Encosta	Não há	Construção Civil e Obras de Infra	Construção Civil e
		0	0	0	0	0				
		0	0	0	0	0				
		0	0	0	0	0				
Brita - areia de brita	450,000.00 - 150,000.00	9500000	0	0	8500000	22	Encosta e cava	Não há	Construção Civil / Pavimentação	100% para Goiás
		0	0	0	0	0				
		0	0	0	0	0				
		0	0	0	0	0				
		0	0	0	0	0				

FID	Shape	SPRAREA	SPRCLASSE	Nome	Endereço	Data_activ	LONGITUDE	LATITUDE	ELEVAÇÃO_m
0	Polygon	174354	Pedreira_1	Pedreira Anhanguera S.A - Empresa de Mineração.	Av.Perimetral Norte,Gleba 4A--Vila João Vaz--Goiânia	17/11/1987	49° 28' 11" W	16° 28' 05" S	760
1	Polygon	93906	Pedreira_2	Pedra Britada Indústria, Comércio e Rep Ltda.		<Null>	49°06'10" W	16°31'37" S	0
2	Polygon	122253	Pedreira_3	Ciplan-cimento Planalto S.A.		<Null>	49°27'36" W	16°51'36" S	0
3	Polygon	74406	Pedreira_9	Pedreira Bela Vista Ltda.		<Null>	49°05'47" W	16°47'45" S	0
4	Polygon	144070	Pedreira_5	Pedreira Araguaia Ltda.	Rodovia BR153, s/nº Km 9,5 Goiânia	23/03/1982	49° 12' 43" W	16° 45' 58" S	715
5	Polygon	135590	Pedreira_6	Pedreira Izaíra Indústria e Comercio Ltda.		<Null>	49°12'27" W	16°45'59" S	0
6	Polygon	137776	Pedreira_7	COMPAV-Cia de pavimentação do Mun. de Go.		<Null>	49°11'41" W	16°45'49" S	0
7	Polygon	94795	Pedreira_8	Briteng-Britagem e construções Ltda.		<Null>	49°10'35" W	16°47'10" S	0
8	Polygon	54848	Pedreira_4	Pedreira Itaúna Ltda.		<Null>	49°14'46" W	16°50'22" S	0

Rejeito	Disposição	LicAmbien	RMR	GSI	Unbca_MPa	E_GPa	Poisson	Tração_KN	FotosLavra	FotoEnsaio
Material Inerte, Filler – 3000 MP/ano	Armazenado no Pátio da empresa a céu aberto	Estadual GUS 440/2007	75	51-60	102.2	39.1	0.2	24.62	C:\Anhangue	C:\Ensaio1.jpg
Filler (0,03 m3/ton)	Aterros	PROC. 5702.1091/84-1 LICENÇA GUS 777/05	58	40-48	83.5	34.8	0.23	21.85	C:\Araguaia.J	C:\Ensaio.jpg

Figura 61. Tela de consulta do banco de dados georreferenciado com as informações cadastradas

### 13.6. Apresentação pedreiras cadastradas

As pedreiras foram cadastradas e as informações foram inseridas no banco de dados georreferenciados, podendo ser consultadas como indica a Figura 62.

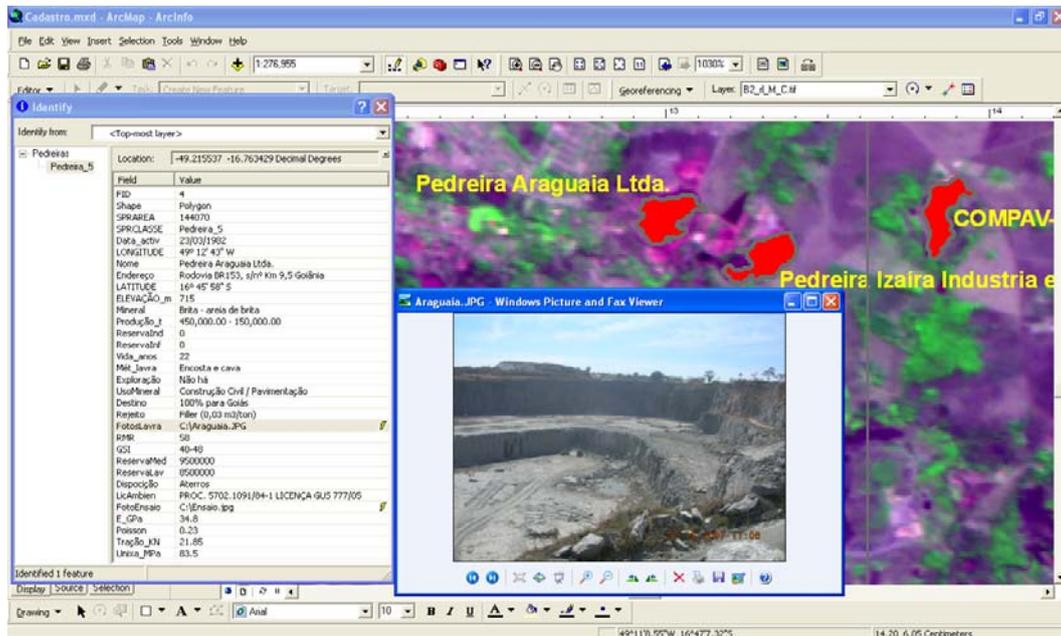


Figura 62. Tela do ArcMap mostrando o mapa de distribuição de pedreiras e as diversas informações cadastradas

A Tabela 16 apresenta dados como os nomes de cada uma das pedreiras, as que não foram visitadas se conferiram com informações disponibilizadas pela Diretoria de Outorga e Cadastro Mineiro – DICAM do Departamento Nacional da Produção Mineral - DNPM, já informações de coordenadas e áreas foram proporcionadas pelo próprio programa utilizado.

Tabela 16. Coordenadas geográficas e áreas das pedreiras

Nº Pedreira	Coordenadas Geográficas		Área (m <sup>2</sup> )
Pedreira_1	49°29'11" W	16°28'05" S	174354
Pedreira_2	49°06'10" W	16°31'37" S	93906
Pedreira_3	49°27'36" W	16°51'36" S	122253
Pedreira_4	49°14'46" W	16°50'22" S	54848
Pedreira_5	49°12'43" W	16°45'58" S	144070
Pedreira_6	49°12'27" W	16°45'59" S	135590
Pedreira_7	49°11'41" W	16°45'49" S	137776
Pedreira_8	49°10'35" W	16°47'10" S	94795
Pedreira_9	49°05'47" W	16°47'45" S	74406

### 13.7. Ensaios nos materiais coletados nas pedreiras

Na fase de caracterização dos materiais produzidos pelas pedreiras cadastradas foram coletadas amostras em sete pedreiras. Nas outras duas não foi possível a realização da coleta uma vez que estas estavam com suas atividades paralisadas.

Nas sete pedreiras foram coletadas amostras de areia, Brita-0 e Brita-1, além de amostras do resíduo, quando o mesmo era produzido.

Nos agregados os resultados dos ensaios de caracterização estão apresentados na Tabela 17. Pode-se observar que os valores de massa unitária e massa específica praticamente não variaram entre os materiais coletados e as diferentes pedreiras. Os valores de massa unitária variaram entre 1,34 e 1,59 kg/dm<sup>3</sup> e os de massa específica entre 2,65 e 2,70 kg/dm<sup>3</sup>. Estes valores estão dentro da faixa de variação dos agregados graníticos e calcários.

Os valores de absorção foram superiores para as areias britadas, com valores variando entre 0,8 e 2,1%, enquanto para as britas este valor não ultrapassou 0,9%. Segundo Farias et al. (2007) os valores de absorção estão diretamente relacionados à quantidade de vazios comunicantes ou à porosidade aparente dos grãos. Normalmente estes valores situam-se na faixa entre 0,5 e 1,0%. O que indica que as areias apresentaram valores superiores aos esperados. Este fato pode estar relacionada à metodologia do ensaio para determinação da absorção em agregados miúdos (NBR NM 30/2001).

Com relação ao teor de material pulverulento, as areias apresentaram valores superiores aos das britas. No entanto, tanto a areia quanto as britas atendem ao critério de aceitação da NBR

7211 (1983) relativo ao uso de agregados em concretos. Esta norma estabelece um valor máximo de 3,0% para concretos sujeitos a desgaste superficial e de 5,0% para os demais tipos de concreto. Segundo este critério todos os agregados podem ser aceitos para este fim.

Tabela 17. Resumo das principais características dos agregados coletados nas pedreiras

		Diâmetro Máximo (mm)	Módulo de Finura	Massa Unitária(kg/dm <sup>3</sup> )	Massa Específica (kg/dm <sup>3</sup> )	Absorção de água (%)	Material Pulverulento (%)
Pedreira 1	Areia	2,40	2,70	1,34	2,68	1,00	3,03
	B-0	12,50	-	1,38	2,69	0,60	0,80
	B-1	19,00	-	1,44	2,67	0,50	0,50
Pedreira 2	Areia	6,30	2,63	1,55	2,68	0,80	5,05
	B-0	9,50	-	1,45	2,69	0,40	0,50
	B-1	19,00	-	1,46	2,66	0,60	0,50
Pedreira 3	Areia	2,40	3,18	1,59	2,65	0,80	2,00
	B-0	12,50	-	1,48	2,66	0,40	3,40
	B-1	19,00	-	1,49	2,66	0,70	0,60
Pedreira 4	Areia	4,80	2,77	1,54	2,70	0,90	2,20
	B-0	12,50	-	1,41	2,68	0,70	1,80
	B-1	25,00	-	1,45	2,69	0,80	0,60
Pedreira 5	Areia	2,40	3,74	1,53	2,68	0,80	2,00
	B-0	9,50	-	1,42	2,67	0,70	1,02
	B-1	19,00	-	1,45	2,66	0,90	0,30
Pedreira 6	Areia	4,80	3,97	1,43	2,68	1,00	2,10
	B-0	12,50	-	1,39	2,69	0,70	5,06
	B-1	19,00	-	1,42	2,65	0,90	4,89
Pedreira 7	Areia	2,40	2,46	1,38	2,62	2,10	3,20
	B-0	9,50	-	1,39	2,68	0,90	0,80
	B-1	19,00	-	1,52	2,68	0,60	0,50
Valores Médios	Areia	-	3,05	1,48	2,67	1,06	2,80
	B-0	-	-	1,42	2,68	0,69	1,91
	B-1	-	-	1,46	2,67	0,71	1,13

Foram realizados ainda ensaios de granulometria em todas as amostras. As curvas granulométricas obtidas podem ver visualizadas nas Figuras 63 a 65.

Observa-se que das areias analisadas as das Pedreiras 1, 2, 3, 4 e 7 encontram-se dentro da faixa de areia média (NRB 7211, 1983), as das Pedreiras 5 e 6 atendem aos limites de areia grossa. O formato das curvas demonstra que as areias apresentam granulometrias uniformes com a maior parte das partículas pertencente a apenas uma faixa granulométrica.

O módulo de finura, obtido pela soma das percentagens retidas acumuladas nas peneiras da série normal dividida por 100, é interpretado como o tamanho médio ponderado da peneira na qual o material é retido, quanto mais grosso for o agregado, maior será o seu módulo de finura.

Normalmente, as areias muito grossas apresentam módulo de finura superior a 3,9; as grossas entre 3,3 e 3,9; as médias entre 2,4 e 3,3; e as finas, inferior a 2,4 (Petrucci, 1987). Desta forma, utilizando-se este critério de classificação, com exceção das Pedreiras 5 e 6, as demais seriam areias médias. Já as Pedreiras 5 e 6 se classificariam como areias grossas.

As britas B-0 e B1 apresentaram curvas muito próximas para todas as pedreiras. Em algumas pedreiras os limites estabelecidos pela NBR 7211 (1983) foram ultrapassados. No caso da B-0 algumas pedreiras apresentaram granulometria inferior ao limite especificado. Já para a B-1, ocorreu o contrário e algumas curvas apresentaram granulometria superior ao limite da norma.

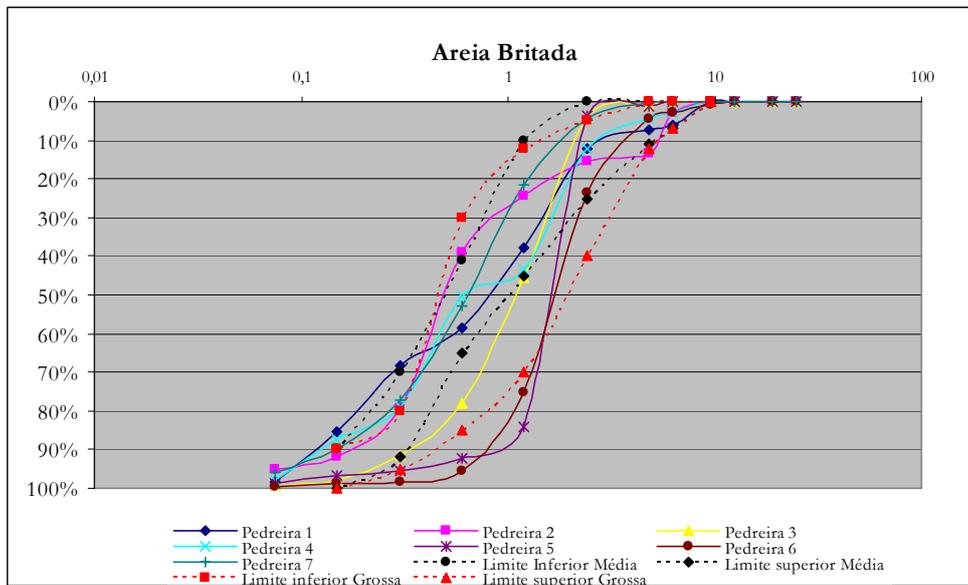


Figura 63. Curvas granulométricas das areias

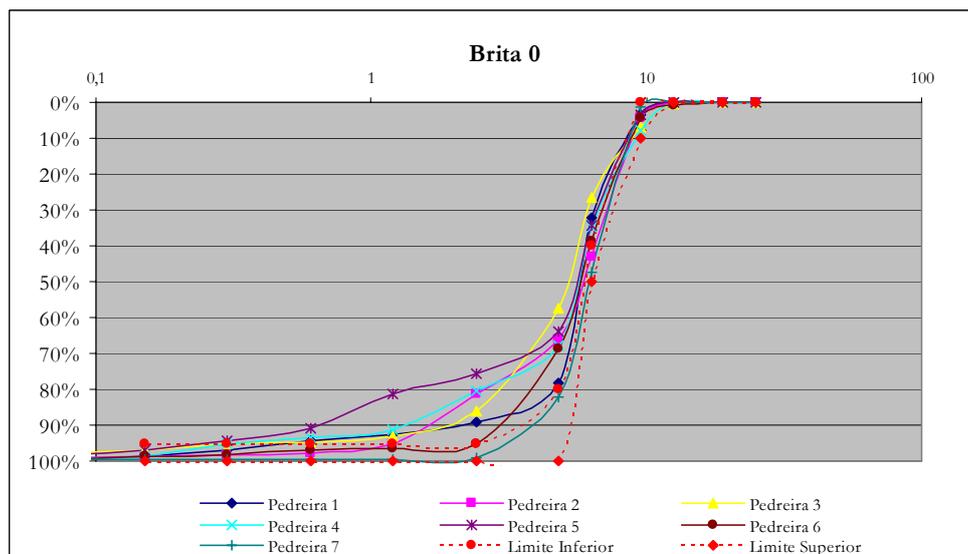


Figura 64. Curvas granulométricas da brita B-0

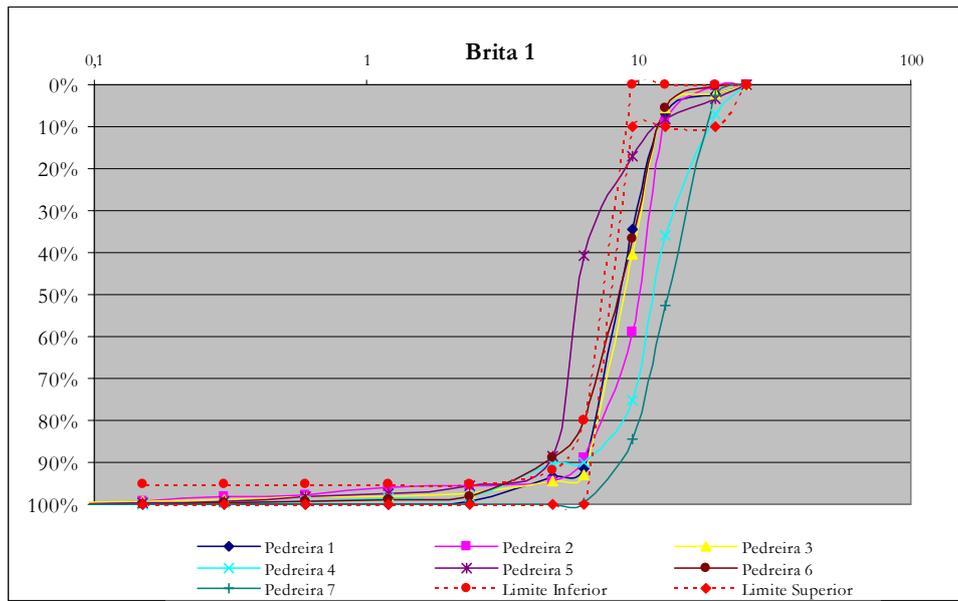


Figura 65. Curvas granulométricas da brita B-1

As análises dos resíduos são mostradas na Tabela 18.

Tabela 18. Resumo das principais características dos resíduos coletados nas pedreiras

Ensaio	Resíduo					
	Pedreira 1	Pedreira 3	Pedreira 5	Pedreira 6	Pedreira 7	
% partículas com diam. < 0,075 mm	34	85	68	72	65	
Dimensão máxima (mm)	0,3	0,15	0,3	0,15	0,3	
Massa Específica (kg/m <sup>3</sup> )	2,66	2,73	2,68	2,67	2,69	
Área Específica (cm <sup>2</sup> /g)	164	1471	158	897	234	
Composição Química (%)	SiO <sub>2</sub>	45,87	7,14	32,08	23,41	21,37
	CaO	4,87	33,09	29,45	30,98	23,67
	MgO	0,33	12,4	0,88	2,34	3,1
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,98	-	-	-	-
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,93	0,04	0,34	0,87	2,11
	Metais Pesados	-	-	-	-	-
	Perda ou Rubro	45,02	44,08	34,6	40,19	47,4
	Insolúvel em HCl	-	3,25	2,3	1,8	2,4

### 13.8. Resultados da Aplicação dos Resíduos na Pavimentação

#### 13.8.1. Caracterização física dos rejeitos

As amostras em função do ponto de coleta foram denominadas de Rejeitos 01 e 02, 03, 04, 05 e 06 coletadas dentro da barragem (Figura 66) e o Rejeito 07 na pilha de estocagem.

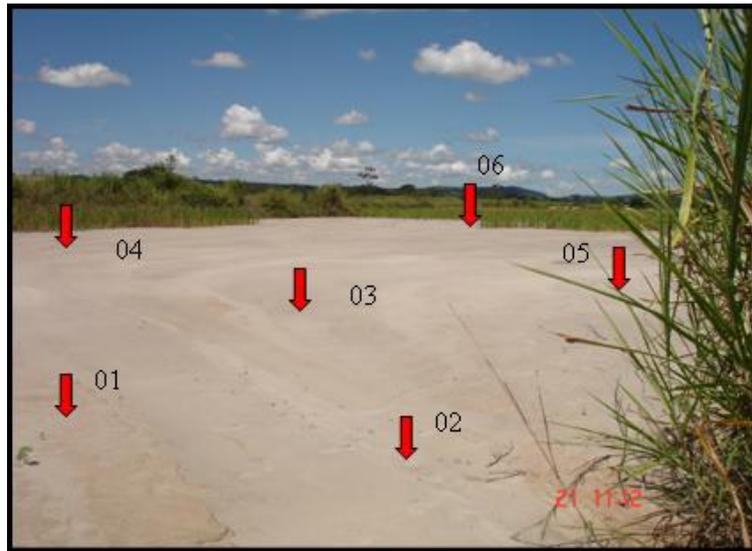


Figura 66. Localização dos pontos de coleta das amostras na barragem

As Tabelas 19 e 20 apresentam os resultados dos ensaios de caracterização realizados com as 7 amostras de rejeito, coletadas ao longo da barragem e da pilha. Na Figura 64 são apresentadas as curvas granulométricas obtidas para cada uma destas amostras.

Tabela 19. Caracterização física dos resíduos

Amostra	Consistência dos Solos			Massa Específica (KN/m <sup>3</sup> )	Profundidade (m)
	WL (%)	WP (%)	IP (%)		
Rejeito 01	NP	NP	NP	26,93	0,5
Rejeito 02	NP	NP	NP	27,12	0,5
Rejeito 03	NP	NP	NP	27,15	2,0
Rejeito 04	NP	NP	NP	27,21	1,0
Rejeito 05	NP	NP	NP	27,08	1,0
Rejeito 06	NP	NP	NP	27,23	1,0
Rejeito 07	NP	NP	NP	27,15	Variável

NP = Não plástico

Tabela 20. Caracterização física dos rejeitos em função da análise granulométrica.

Amostras	Composição granulométrica % da fração, com defloculante								Índices Granulométricos	
	Pedregulho Grosso	Pedregulho Médio	Pedregulho Fino	Areia Grossa	Areia Média	Areia Fina	Silte	Argila	CNU	CC
Rejeito 01	0,0	0,0	4,2	13,1	20,7	45,2	13,7	3,1	3,2	1,3
Rejeito 02	0,0	0,0	0,0	0,0	3,5	46,1	45,2	5,2	5,02	1,73
Rejeito 03	0,0	0,0	0,0	0,0	2,1	26,6	65,9	5,4	4,82	1,03
Rejeito 04	0,0	0,0	0,0	0,1	2,7	42,9	49,7	4,6	3,7	1,13
Rejeito 05	0,0	0,0	0,0	0,1	1,1	28,6	64,2	6,0	6,9	1,2
Rejeito 06	0,0	0,0	0,0	0,0	3,4	40,4	51,6	4,6	5,09	1,42
Rejeito 07	0,0	0,4	1,9	1,7	16,4	45,0	30,0	4,6	4,1	1,4

O rejeito fino de pedreira apresentou em todas as amostras analisadas, um valor de peso específico dos sólidos ( $\gamma_s$ ) muito homogêneo, com pouca variação, independente do ponto de coleta, sendo o valor médio de 27,12 kN/m<sup>3</sup>.

Com relação à plasticidade, verificou-se que o rejeito não apresenta esta propriedade, sendo considerado material não plástico (NP).

É importante ressaltar, que embora a maioria das amostras do rejeito apresente uma quantidade apreciável de partículas finas, em média 50 a 60 % de grãos menores que 0,075 mm, trata-se de um material oriundo do processo de britagem de uma rocha e não formado por processos de alterações com o tempo como o que ocorre com os solos naturais. Este fato é bastante significativo, pois poderá ocorrer que a fração granulométrica argilosa ou siltosa, presente no rejeito, não expresse, na prática, o comportamento relativo aos solos naturais que contém estas frações em sua composição. Neste caso, a análise do comportamento de plasticidade é fundamental para avaliar estas propriedades.

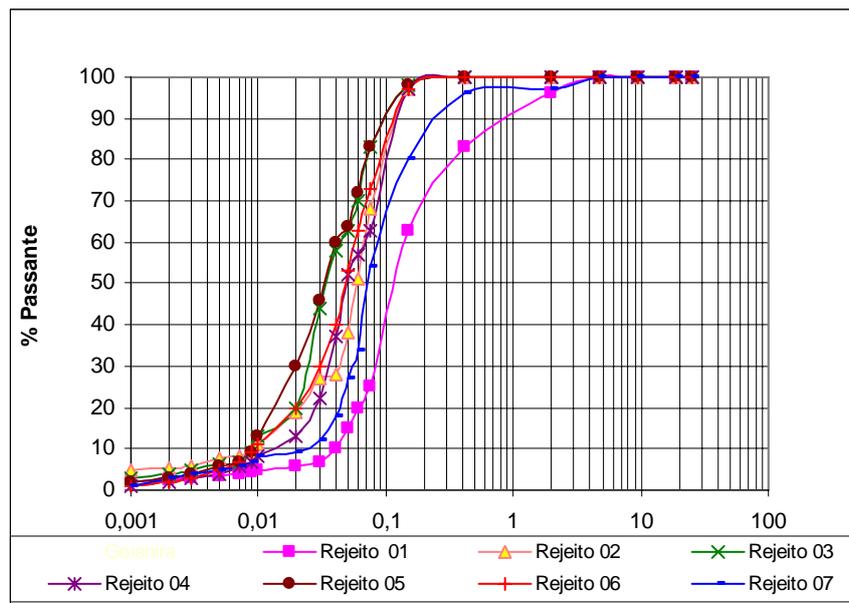


Figura 67. Resultados da análise granulométrica do rejeito com defloculante

Outra observação a ser destacada é com relação à heterogeneidade granulométrica deste material. Nos resultados apresentados, observa-se que ocorre uma modificação entre os teores de silte, areia média e areia fina, nas amostras analisadas. O processo de segregação hidráulica, ocorrido durante a deposição do rejeito na barragem e as possíveis modificações nas características do maciço rochoso, são fatores que contribuem para esta heterogeneidade.

### 13.8.2. Caracterização física das amostras de solo natural e das misturas

Os solos naturais analisados nesta pesquisa foram obtidos em regiões próximas à pedreira. As misturas foram definidas com base nas experiências já adquiridas a partir de outras associações de solos naturais e rejeitos, foram adotados como 15, 25 e 35 % de resíduo.

Neste sentido, igualmente ao rejeito, os solos das três regiões, o solo granular (cascalho) e as respectivas misturas foram submetidos aos mesmos ensaios de caracterização.

A partir desses resultados observa-se que a faixa granulométrica obtida para o rejeito fino corresponde a um material mais fino que os solos estudados em estado natural, ou seja, sem o uso do defloculante. Nota-se também que as curvas granulométricas dos dois tipos de material são paralelas.

Granulometricamente o solo de Caturai, quando da utilização de defloculante, caracterizou-se como sendo uma areia argilosa ou areia argilo-siltosa. Alternativamente, visando avaliar a influência dos óxidos e hidróxidos, que promovem a cimentação e a agregação das partículas sólidas nos solos tropicais, foi realizado o ensaio sem o uso do defloculante. Os resultados destes ensaios (Figura 68) revelaram uma alteração na classificação granulométrica desta amostra, sendo neste caso classificada como uma areia (84%) com presença de argila, silte e pedregulho.

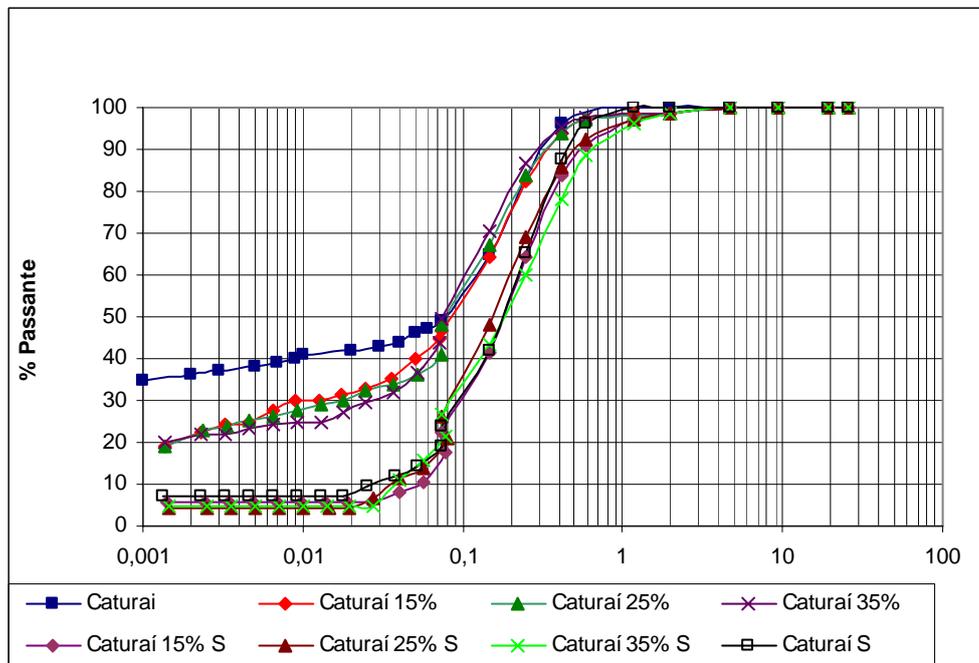


Figura 68. Resultados da análise granulométrica do solo e Composições de Caturai com o uso e sem o uso de defloculante

O solo de Goianira foi caracterizado granulometricamente, como sendo uma argila silto-arenosa, quando o ensaio foi realizado com o uso de defloculante (Figura 69). Entretanto, quando não adotou o uso deste agente dispersor, a amostra apresentou-se como uma areia (83,9%).

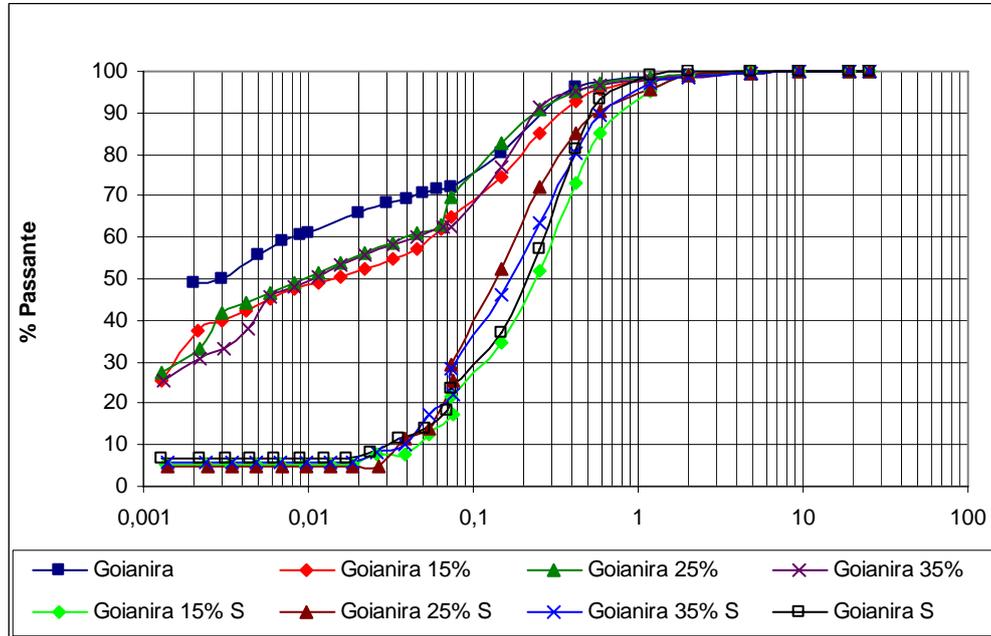


Figura 69. Resultados da análise granulométrica do solo e composições de Goianira com o uso e sem o uso de defloculante.

O solo de Inhumas apresentou-se granulometricamente como sendo uma argila (51%) com presença de areia e silte (Figura 70). Quando avaliada no ensaio sem o uso do defloculante, a amostra do solo de Inhumas apresentou-se como sendo uma areia (84%), constatando ainda, presença de argila e silte.

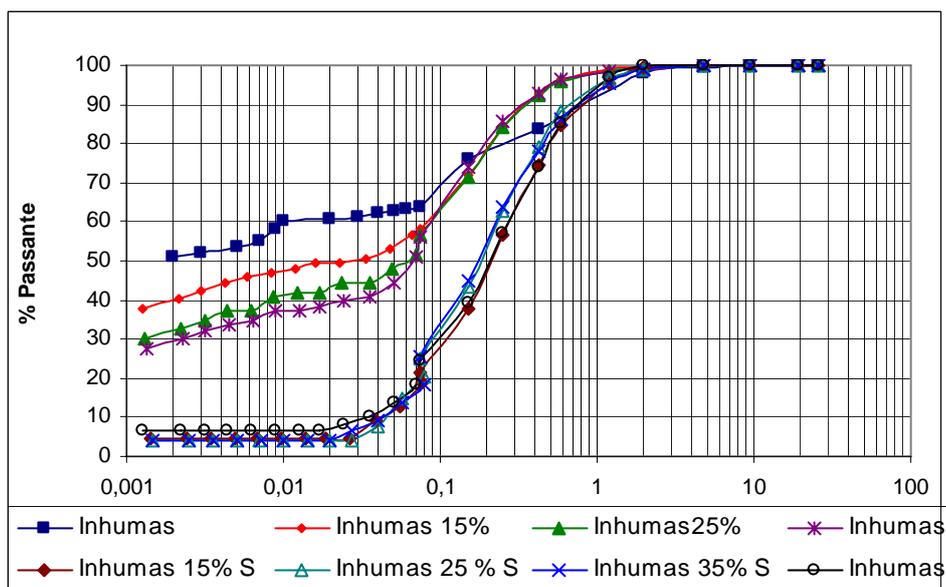


Figura 70. Resultados da análise granulométrica do solo e composições de Inhumas sem e com o uso de defloculante

Considerando a distribuição granulométrica obtida para cada amostra, a Tabela 21 apresenta um resumo das porcentagens das diferentes frações obtidas para os solos naturais, e associações com o rejeito para o ensaio de granulometria com uso de defloculante.

Tabela 21. Caracterização física dos solos, em função da análise granulométrica

Amostras	Composição granulométrica % da fração , com defloculante.								Índices Granulométricos	
	Pedregulho Grosso	Pedregulho Médio	Pedregulho Fino	Areia Grossa	Areia Média	Areia Fina	Silte	Argila	CNU	CC
Caturai	0,0	0,1	0,2	4,5	30,3	15,3	11,6	38,0	ND	ND
Caturai 15%	0,0	0,0	1,2	1,6	23,7	31,4	21,0	21,1	ND	ND
Caturai 25%	0,0	0,2	1,2	1,7	21,5	37,6	16,6	21,2	ND	ND
Caturai 35%	0,0	0,1	1,1	1,2	19,1	39,0	18,2	21,3	ND	ND
Goianira	0,0	0,0	0,6	3,8	16,5	7,3	27,7	44,1	ND	ND
Goianira 15%	0,0	0,0	1,0	3,1	15,9	19,3	25,1	35,6	ND	ND
Goianira 25%	0,0	0,2	0,7	2,1	10,2	24,3	30,6	32,0	ND	ND
Goianira 35%	0,0	0,4	0,8	2,2	12,5	22,2	32,3	29,7	ND	ND
Inhumas	0,0	0,0	0,2	1,6	14,7	14,1	18,4	51,0	ND	ND
Inhumas 15%	0,0	0,1	0,4	3,0	18,4	22,9	15,5	39,7	ND	ND
Inhumas 25%	0,0	0,0	1,0	3,0	18,1	28,1	17,7	32,1	ND	ND
Inhumas 35%	0,0	0,1	1,0	2,6	16,4	32,2	18,1	29,5	ND	ND
Cascalho	8,2	19,8	8,1	5,9	11,0	15,1	12,6	19,3	588,0	1,19
Cascalho 15%	6,9	15,4	7,0	3,7	12,0	23,3	15,9	15,8	176,5	5,30
Cascalho 25%	7,7	10,8	7,4	4,1	11,0	27,1	16,8	15,1	137,5	7,10
Cascalho 35%	6,2	8,8	5,8	2,2	12,0	31,5	19,8	13,7	22,9	2,51

O solo de Caturai foi classificado pelas metodologias TRB, SUCS e MCT, respectivamente, em A-6, CL, LG', apresentando Índice de Grupo (IG) de 5,0( índice relativo a metodologia TRB). O peso específico dos sólidos foi de 26,99 kN/m<sup>3</sup> (Tabela 4.4), valor que reflete a sua mineralogia, composta por minerais principais, quartzo e gibsita, e minerais subordinados, caulinita ; sendo estas informações mineralógicas, obtidas em ensaio do raio-X a ser apresentado posteriormente. Em relação à consistência este solo apresentou o índice de plasticidade igual a 15,2%, valor coerente com o teor da fração argila existente, em torno de 38%.

O solo de Goianira, considerando também a metodologia preconizada pela ABNT, foi classificada nas metodologias TRB, SUCS e MCT respectivamente em: A-7-6, CL e LG', com Índice de Grupo igual a 11,8. O peso específico dos sólidos foi de 28,39 kN/m<sup>3</sup>, com índice de plasticidade de 16,2%. Estes valores refletem a presença de gibsita, goethita, e caulinita, constatadas no ensaio de raios-X, a ser detalhado posteriormente.

Para a condição preconizada pela norma, o solo Inhumas foi classificado pelas metodologias TRB, SUCS e MCT em: A-7-6, CL e LG', respectivamente, com Índice de Grupo 13,6. O peso específico dos sólidos de 27,87 kN/m<sup>3</sup> reflete a mineralogia dos solos tropicais, que apresenta a presença de gibsita, goethita, quartzo, hematita e caulinita. O índice de plasticidade foi

de 19,4%, refletindo a presença de minerais de ferro e o elevado teor da fração argila existente no solo.

Levando-se em consideração os índices de grupo e a classificação obtida no sistema de classificação TRB, todas as amostras analisadas podem ser classificadas como materiais aptos a serem aplicados em reforço de subleito. Contudo, adotando a mesma metodologia de classificação estes solos são considerados fracos a pobres para uma aplicação em camadas de sub-base e base.

Nos resultados obtidos para o cascalho (Figura 71), percebe-se que o mesmo enquadra-se granulometricamente como um pedregulho quartzoso, apresentando ainda presença das frações, argila, areia e silte. A porcentagem de partículas retidas na peneira 4,8 mm (Pedregulho) encontra-se em torno de 36,1%, sendo o mesmo classificado conforme os sistemas TRB e SUCS em A-2-6 e GM, respectivamente.

Analisando as curvas granulométricas características destes materiais, observa-se um aspecto descontínuo entre as dimensões 2,0 a 0,40 mm, não havendo uniformidade na distribuição das frações existentes. O cascalho apresenta um índice de plasticidade de 12,5% e peso específico dos sólidos de 26,86 kN/m<sup>3</sup>, valores estes influenciados pelo menor teor de argila no solo e pela mineralogia com presença de quartzo, caulinita, muscovita, goetita.

Observa-se que o rejeito adicionado não é capaz de suprir essa descontinuidade das curvas granulométricas dos solos, sendo esta suprimida de forma parcial nos solos naturais mais finos.

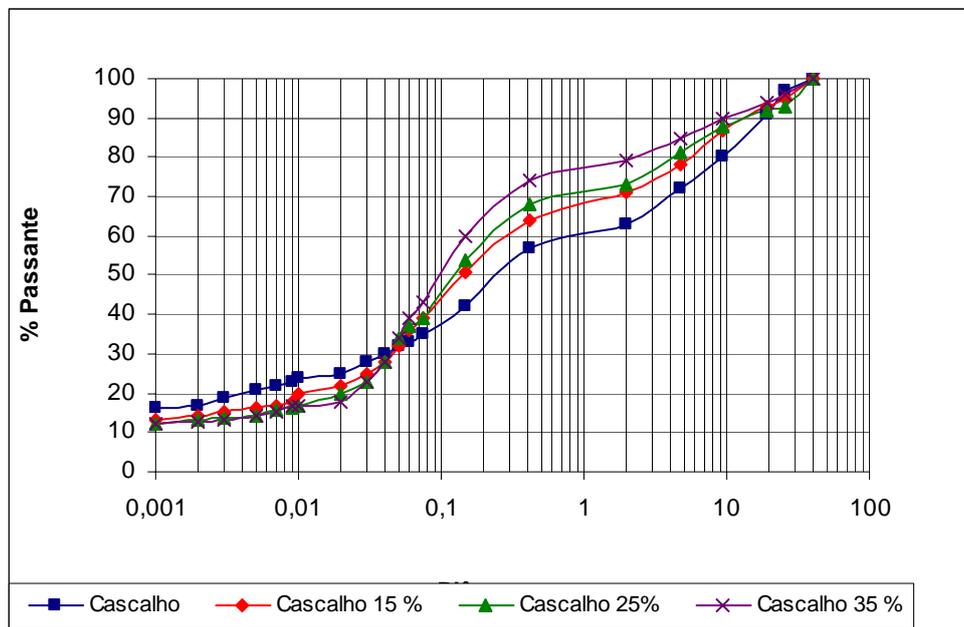


Figura 71. Resultados da análise granulométrica do solo granular denominado de cascalho com o uso de defloculante.

Com a incorporação de rejeito em todos os solos, nos teores de 15, 25 e 35%, pode-se observar modificações semelhantes nas características granulométricas, no peso específico

dos sólidos e na plasticidade dos solos analisados. Estas associações acarretaram alterações em quase todas as amostras em relação à sua classificação original nos sistemas propostos.

Com a adição do rejeito à massa do solo, ocorreu a redução do peso específico dos sólidos em relação ao valor obtido para o solo na condição original. Observou-se que quanto maior a quantidade de rejeito adicionado ao solo natural, maior foi a redução no valor do peso específico da composição. Para as amostras dos solos naturais de Goianira e Inhumas a adição de 35% de rejeito propiciou uma redução de 5% do peso específico em relação ao valor do solo natural, possivelmente pela presença do quartzo no rejeito.

O solo fino de Caturai e o cascalho foram os materiais que tiveram menores reduções em seu peso específico em relação ao valor do solo natural, quando da adição do rejeito, comparados aos demais solos pesquisados. Acredito que devido à proximidade entre os pesos específicos do rejeito e destes dois solos a variação no peso específico foi pouco significativa, evidenciando uma pequena redução no valor do peso específico destas misturas em relação ao solo natural.

Em relação aos solos de Goianira e de Inhumas que sofreram maiores alterações em seu peso específico, pode-se considerar a mesma interpretação. Ambos os solos possuem gibsitita e os óxidos e hidróxidos de ferro como minerais principais e subordinados, divergindo do mineral principal do rejeito que é quartzo e os feldspatos.

A propriedade de plasticidade foi também afetada pela incorporação do rejeito à massa dos solos. Em todas as composições o índice de plasticidade foi reduzido quando comparado aos mesmos índices obtidos para os solos na condição natural. Na maioria absoluta das amostras observou-se que quanto maior o teor de rejeito adicionado, menor foi o índice de plasticidade obtido. Esta tendência se justifica pela redução do teor de argila e aumento dos teores de areia e silte, frações predominantes no rejeito.

Em relação à distribuição granulométrica, os ensaios realizados com o uso do defloculante permitiram verificar que a adição de rejeito proporcionou um aumento percentual nos teores das frações de areia fina e silte, com a redução no teor da fração argila. No solo granular (cascalho), observou-se uma redução do teor da fração pedregulho, sendo mais acentuada quando da inclusão de 35% de rejeito.

Em relação aos solos naturais e suas respectivas misturas, quando analisadas granulometricamente sem o uso do defloculante, verifica-se que a adição de rejeito aos solos naturais praticamente não alterou os percentuais das frações granulométricas do solo natural. Os teores da fração areia permaneceram praticamente inalterados, mantendo um percentual médio de 82%. As frações silte e argila sofreram uma variação percentual máxima de 4% entre a amostra do solo natural e suas misturas com rejeito.

Quando comparadas as duas condições de ensaio, com e sem o uso do defloculante, verificou-se que as amostras ensaiadas sem este agente dispersor apresentaram uma característica mais granular, com maior presença de areia em detrimento aos percentuais de silte e argila. Este comportamento tende a comprovar a ação da cimentação natural dos óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio presentes nos solos.

Em relação à tentativa de se realizar a classificação das misturas através dos sistemas de classificação usuais e através da realização dos ensaios de MINI-MCV ME-258 (DNER,1994), perda de massa por imersão ME 256 (DNER,1994) e da norma CLA 259 (DNER,1996), foi observado que a inclusão de rejeito a massa do solo natural proporcionou modificações no comportamento da mistura o que conduziu a enquadrar o material resultante em outro grupo de classificação, principalmente quando a adição de rejeito ocorreu em teores mais elevados. Nos solos da cidade de Caturai e Goianira, observou-se inclusive mudanças da classe laterítica para não laterítica, relativa ao sistema MCT.

Como na metodologia proposta de trabalho não foram previstos e nem realizados ensaios compactação e de Mini-CBR, ensaios de permeabilidade, de absorção e contração não foi possível correlacionar o comportamento das misturas com aquele preconizado para os solos naturais pela CLA 259 (DNER,1996), fazendo-se necessária a realização futura destas investigações.

Ressalta-se que estas metodologias de classificações são propostas para solos naturais, e que as misturas são resultados destes materiais com adição de compostos minerais, podendo apresentar limitações nas interpretações dos resultados.

### **13.8.3. Caracterização química e mineralógica do rejeito e dos solos naturais**

As análises químicas e mineralógicas tiveram como objetivo avaliar de forma mais precisa as possíveis interações entre o rejeito e os solos naturais. Os resultados destes ensaios encontram-se apresentados nas Tabelas 22 e 23.

Em relação aos ensaios de pH realizados em cloreto de potássio (KCl) e em água (H<sub>2</sub>O), verifica-se que a diferença entre o pH obtido em solução de cloreto de potássio e realizado em água, apresenta valores positivos. Este comportamento indica a predominância de óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, o que foi comprovado no ensaio de raio-X.

Tabela 22. Resultados da análise química e de pH do rejeito e dos solos pesquisados.

Amostra	Óxidos presentes em (%)			Ki = (SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	Kr = (SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	pH H <sub>2</sub> O	pH KCl	Diferença KCl – H <sub>2</sub> O
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>					
Rejeito	21,78	2,84	0,93	13,04	10,78	8,0	8,8	0,8
Caturai	14,67	3,41	6,92	7,31	3,18	4,3	5,6	1,3
Cascalho	14,78	14,20	6,26	1,77	1,38	5,5	6,3	0,8
Goianira	17,11	8,36	5,92	3,48	2,39	4,4	5,2	0,8
Inhumas	13,12	5,27	4,24	4,23	2,79	4,7	5,5	0,8

Tabela 23. Resultados da análise por difratometria de raios-X.

Amostra	Composição Mineralógica - Raio - X
Rejeito	Quartzo(SiO <sub>2</sub> ), Muscovita(kNa)(AlMgFe) <sub>2</sub> (Si <sub>3</sub> AlO <sub>9</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> , feldspatos, clorita e esmectita
Caturai	Quartzo, Caulinita( Al <sub>2</sub> SiO <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub> ), Gibsita ( Al(OH) <sub>3</sub> ),Hematita(Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) e Montmorilonita
Cascalho	Quartzo, Muscovita, Caulinita, Goetita( FeO(OH)),Hematita, magnetita( Fe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> ) e ilita Kal <sub>2</sub> Si <sub>3</sub> AlO <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>
Goianira	Caulinita,Gibsita, Goetita
Inhumas	Quartzo, Caulinita, Gibsita, Goetita, Hematita, Magnetita

É importante ressaltar que o ensaio de ataque químico por ácido sulfúrico é bastante empregado em estudos agrônomicos para avaliar o grau de intemperização dos solos e permite ainda a determinação das relações moleculares sílica/alumínio (Ki) e sílica/sesquióxidos (Kr). Estes valores fornecem informações sobre o grau de intemperismo sofrido pelos solos e tendem a complementar as informações sobre a mineralogia e a química dos solos e do rejeito.

No ensaio de ataque por ácido sulfúrico é possível também determinar a porcentagem do elemento químico em forma de óxidos presente na amostra. Já no estudo a partir das difrações de raios-X, busca-se a determinação da presença do mineral e dos argilos-minerais, presentes nas amostras, não quantificando os mesmos em termos percentuais.

Destaca-se, portanto a necessidade de realizar outros ensaios de caracterização química e mineralógica, tal como o ensaio de raio-x, cuja proposta é a de definir de forma mais precisa a composição do solo. Em relação a esta técnica de análise é conveniente destacar que a mesma fornece resultados pontuais, ou seja, a análise é referente a uma fração específica da amostra.

Através de análise dos gráficos de difração de raio-X foi possível obter algumas informações relevantes dos materiais analisados. No rejeito, o quartzo e o feldspato são os minerais principais e a muscovita, o mineral subordinado, apresentando ainda, traços de clorita e esmectita.

Na amostra de cascalho a caulinita, o quartzo e os óxidos de ferro são os minerais primários. Para o solo de Caturai os minerais principais são os quartzos e a gibsita; os subordinados, a caulinita e a hematita, com traços de montmorilonita. A amostra de Goianira por sua vez, apresenta como mineral principal a gibsita, sendo a goethita e a caulinita os minerais subordinados. Inhumas apresenta a gibsita como sendo o seu mineral principal, goethita, caulinita, quartzo e hematita como minerais subordinados e a magnetita o traço.

A amostra de Caturai foi a que apresentou os maiores teores de quartzo e gibsita. A caulinita tem seu maior teor no cascalho, sendo seu teor nos demais solos, praticamente iguais. O solo com maior teor de ferro é o de Inhumas, seguido pelo cascalho. A gibsita apresenta teor bem próximo para os solos de Goianira, Inhumas e para o cascalho; e o quartzo é praticamente igual no solo de Inhumas e no cascalho.

#### **13.8.4. Compactação, CBR e Expansão**

Após a caracterização física e química dos materiais a pesquisa direcionou-se para o estudo do comportamento mecânico e de expansibilidade dos solos naturais e das misturas de solo com adição de rejeito. Neste contexto, foram realizados ensaios de compactação nas amostras de solos naturais nas energias do Proctor normal, intermediário e modificado e para as misturas foram utilizadas apenas as energias intermediária e modificada.

Além da determinação dos parâmetros de compactação ( $w_{ot}$  e  $\gamma_{dmax}$ ), avaliação do aspecto e forma da curva de compactação, foram realizados ensaios de expansão e CBR em todas as amostras.

Adicionalmente, complementando estas investigações, foram realizados ensaios de compactação, expansão e CBR com adição de cal hidratada, nos teores de 2 e 4% em peso da amostra nas composições que apresentaram melhores desempenhos.

Os resultados dos ensaios de compactação, expansão e CBR realizados nas amostras de solos de Caturai e nas respectivas misturas com os diferentes teores de rejeito estão apresentados nas Tabelas 24 e 25 e ilustrados nas Figuras 72 e 73.

Nas composições pesquisadas para o solo de Caturai, a umidade ótima foi reduzida com o aumento do teor de rejeito adicionado ao solo natural. Porém, o peso específico aparente seco máximo obtido para adições de 15 e 25% de rejeito, ficou bem próximo, inclusive em relação ao valor obtido para o solo natural, com valores de 17,71 kN/m<sup>3</sup>, 17,88 kN/m<sup>3</sup> e 17,78 kN/m<sup>3</sup> para o solo natural, adição de 15 e 25 % de rejeito, respectivamente.

Tabela 24. Resumo dos resultados, compactação, CBR e Expansão para o solo de Caturai.

Material	Caturai		
	Com Imersão	Com Imersão	Sem Imersão
Energia Aplicada.	E.N.	E.I.	E.I.
$\gamma_{dm\acute{a}x}$ Médio (kN/m <sup>3</sup> )	17,00	17,71	17,71
w <sub>ot</sub> Média (%)	17,8	16,8	16,8
CBR Médio (%)	11	17	21
Desvio Padrão	0,35	1,81	1,29
Expansão Média (%)	0,0	0,0	-
Desvio Padrão	0,02	0,00	-
Índice de vazios Médio.	0,63	0,53	0,52
Grau de Saturação (%)	100,0	88,0	85,9

Tabela 25. Resumo dos resultados, compactação, CBR e Expansão para o solo de Caturai com adições de rejeito.

Material	Caturai + 15% rejeito	Caturai + 15% rejeito	Caturai + 25% rejeito	Caturai + 25% rejeito	Caturai + 35% rejeito	Caturai + 35% rejeito
	Com Imersão	Sem Imersão	Com Imersão	Sem Imersão	Com Imersão	Sem Imersão
Energia Aplicada.	E.I.	E.I.	E.I.	E.I.	E.I.	E.I.
$\gamma_{dm\acute{a}x}$ Médio (kN/m <sup>3</sup> )	17,88	17,88	17,78	17,78	17,67	17,67
w <sub>ot</sub> Média (%)	16,1	16,0	13,7	13,7	12,8	12,8
CBR Médio (%)	17	22	13	28	12	28
Desvio Padrão	1,13	0,52	0,35	0,28	0,13	0,30
Expansão Média (%)	0,0	-	0,1	0,0	0,0	-
Desvio Padrão	0,02	-	0,02	0,00	0,01	-
Índice de vazios Médio.	0,47	0,5	0,48	0,48	0,48	0,48
Grau de Saturação (%)	98,2	89,8	94,6	75,1	98,5	68,1

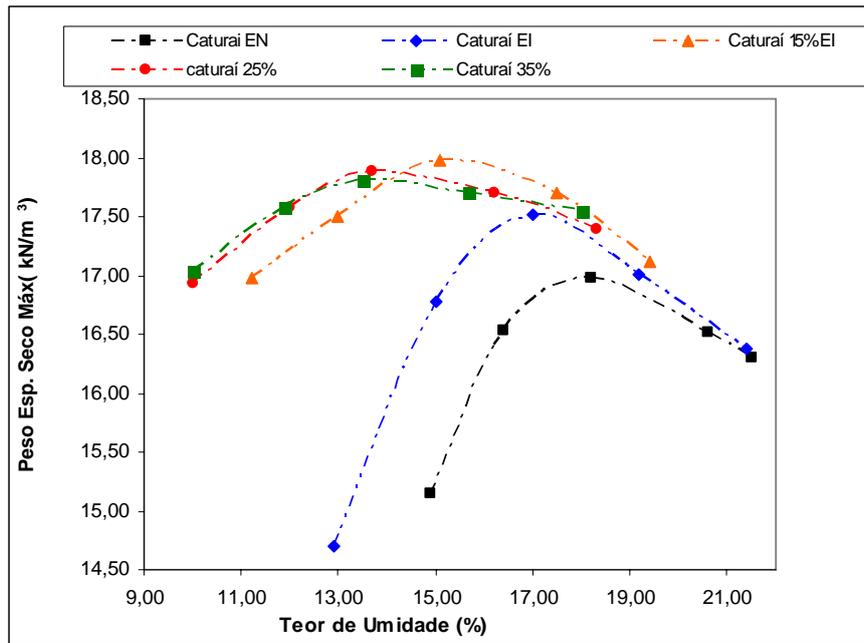


Figura 72. Curvas de compactação médias das amostras de Caturai

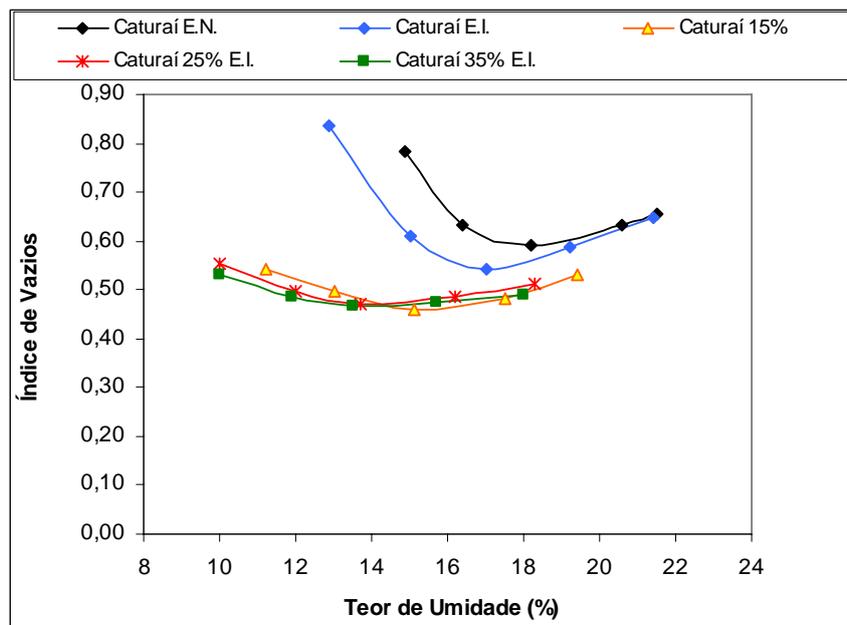


Figura 73. Curva do índice de vazios médio das amostras de Caturai

A partir da adição do teor de 35% de rejeito ao solo o valor do  $\gamma_{dm\acute{a}x}$  apresentou redução de 0,7% em relação aos valores obtidos com as demais misturas e com o solo natural. O mesmo comportamento foi observado para a variação da umidade ótima, que reduziu em 1% em relação à composição que recebeu adição de 25% de rejeito. Nos estudos de mineralogia, verifica-se que tanto o solo de Caturai como o rejeito, possuem com mineral primário o quartzo; aliado a esta análise da mineralogia do solo de Caturai e do rejeito verifica-se que o primeiro apresenta-se como

sendo o mais arenoso dos solos naturais analisados, característica também do rejeito. Estes fatores provavelmente influenciaram nesta pequena variação, observada nos valores dos pesos específicos.

O índice de vazios das composições correspondente à adição de 15 e 25% de rejeito, na umidade ótima, ficou muito próximo, da ordem de 0,47 e 0,48, sendo estes valores menores do que o obtido para o solo natural ( $e = 0,53$ ).

À medida que se adicionava maior porcentagem rejeito ao solo de Caturai, as curvas de compactação foram sofrendo modificações, ficando mais abatidas e, tornando-se mais suaves. Este fato tende a evidenciar comportamento de um solo mais arenoso.

Para as composições de Goianira com a adição de rejeito observou-se também a redução da  $w_{ot}$  e o aumento do  $\gamma_{dm\acute{a}x}$ . O aumento da dimensão das frações granulométricas na mistura permitiu a redução da quantidade de água para se atingir a umidade ótima de compactação. As formas das curvas de compactação apresentaram alterações em suas conformações ficando mais inclinadas, características de argilas arenosas.

Em média, a composição que recebeu adição de 35% de rejeito, apresentou o maior  $\gamma_{dm\acute{a}x}$  (17,16 kN/m<sup>3</sup>) e menor  $w_{ot}$  (19,7%) e menor índice de vazios para condição ótima, da ordem de 0,57. Comparando os valores obtidos na condição natural e para esta adição de rejeitos o  $w_{ot}$  reduziu de 27,4% para 19,7% e  $\gamma_{dm\acute{a}x}$  aumentou de 15,62 kN/m<sup>3</sup> para 17,16 kN/m<sup>3</sup>. O índice de vazios médio das misturas sofreu também uma redução considerável quando comparado ao índice médio do solo natural de 0,82 para 0,57. Verificou-se que a adição do rejeito proporcionou um melhor arranjo de grãos pelo preenchimento dos vazios existentes na compactação na condição natural, avaliação esta, confirmada no ensaio do MEV a serem reportadas posteriormente

Na composição de Inhumas, o comportamento específico a destacar, foi em relação à redução do  $\gamma_{dm\acute{a}x}$ , após a adição de 35% de rejeito ao solo natural, mesmo sendo presenciada a redução da umidade ótima, isto quando comparado aos valores obtidos nas composições que receberam adição de 15 e 25% de rejeito. Porém, esta redução de peso específico e de umidade ótima, foi muito pequena, atingindo apenas um percentual de 0,7% para o peso específico e 0,4 % para a umidade ótima.

A adição de 25 % de rejeito ao solo natural proporcionou o maior aumento no peso específico aparente seco máximo. Para o material sem adição de rejeitos o valor obtido foi de 17,09 kN/m<sup>3</sup> enquanto que a adição de 25% de rejeitos elevou o valor deste parâmetro para 18,05 kN/m<sup>3</sup>. A adição deste mesmo teor de rejeitos gerou uma redução da umidade ótima de 19,8% para 16,9%.

O índice de vazios também foi reduzido, variando de 0,63 para 0,48, valor este atingido quando da adição de 25 e 35% de rejeito em relação à compactação do solo de Inhumas na condição natural.

Em relação às formas das curvas de compactação, a adição de rejeito no solo de Inhumas fez com que as curvas obtidas se tornassem mais suaves e menos inclinadas. Assim, a adição de rejeitos neste solo proporcionou um menor efeito da variação do teor de umidade na variação do peso específico seco.

Para o solo granular (cascalho), quando as amostras foram compactadas na energia intermediária, foi observada a redução do teor de umidade ótima, nas misturas que continham adição de rejeito em relação ao teor ótimo para a amostra de solo natural. Porém para a adição de 35% de rejeito a umidade ótima apresentou um aumento, contrariando a tendência esperada com o aumento do teor de rejeitos associado ao solo natural. No caso do cascalho a adição de um maior teor de rejeitos reduziu de forma considerável a porcentagem de material granular. Para uma adição de 15% o  $\gamma_{dm\acute{a}x}$  obtido praticamente não se alterou em relação ao valor obtido do solo natural, permanecendo em  $18,62 \text{ kN/m}^3$ , justificando assim o comportamento descrito anteriormente.

As curvas de compactação não sofreram modificações nas suas configurações, a exceção da composição com adição de 35% de rejeito, onde foi observada uma inclinação menos acentuada, ou seja, uma curva mais suave.

O índice de vazios apresentou um valor médio constante de 0,44, para as amostras de solos naturais e com adições de 15 e 25% de rejeito, sofrendo um leve acréscimo quando da adição de 35% de rejeito. Observa-se que os valores dos pesos específicos dos sólidos e dos pesos específicos secos máximos entre o cascalho natural e as misturas contendo adição de 15 e 25% de rejeitos se apresentaram bastante próximos e a conseqüente constância no valor do índice de vazios para a condição ótima.

Na energia modificada as adições de 15% e 25% de rejeito ao cascalho conduziram a uma redução do  $\gamma_{dm\acute{a}x}$  de 19,14 para 18,96  $\text{kN/m}^3$ , o que corresponde a uma redução percentual de 1%. Com relação ao  $w_{ot}$ , foi observada também uma pequena redução para estas mesmas adições de rejeito, sendo o  $w_{ot}$  igual a 12,7 % para a adição de 15% e 12,0% para adição de 25%.

O aspecto das curvas de compactação apresentou pouca variação considerando o solo natural e as misturas. O índice de vazios permaneceu praticamente inalterado variando de 0,41 para 0,40 para as todas as amostras.

O índice de vazios e o peso específico seco máximo, praticamente não sofreram alterações quando comparados aos valores obtidos nas amostras de solos naturais com as misturas que receberam a inclusão de 15 e 25% de rejeito. A umidade ótima sofreu redução de 14,4% na condição natural para 12% em média nas duas adições.

A inclusão de 35% de rejeito ao solo natural além de promover o decréscimo do valor do CBR, reduziu o peso específico seco máximo e provocou um aumento na umidade ótima em relação às demais misturas.

Avaliando-se as curvas granulométricas das composições e do solo granular (cascalho), constata-se que a inclusão do rejeito, em teores de 15 e 25%, propiciou a redução do teor de pedregulho em média de 36 para 27% e do teor de argila de 19 para 15%, e o aumento no teor de areia de 32 para 40%, e do teor de silte, 13 para 16%. Embora ocorridas estas alterações nas frações granulométricas, a manutenção do índice de vazios na condição ótima poderia justificar, de certa forma, as pequenas variações observadas nos resultados do ensaio de CBR. Além disto, substituição de parte da fração argila pela fração areia contida no rejeito reduziu a plasticidade, que contribui para um melhor desempenho mecânico do solo.

Em relação à expansão, observa-se que a adição de rejeito ao cascalho, levou o valor da expansão a sofrer um ligeiro aumento, porém este índice é inferior a 0,5%, valor máximo permitido pela ES 303 (DNER, 1997) para os solos aplicados em camadas de base.

Analisando os resultados obtidos nas amostras que receberam adição de 2% cal, verificou-se que o comportamento foi similar às demais composições anteriormente analisadas.

Em resumo, após a análise de todas estas composições, verifica-se que apenas na composição de Caturai (com imersão) o rejeito provocou prejuízos no comportamento mecânico do material não prejudicando as demais composições quando respeitadas as devidas proporções adicionadas aos solos naturais.

#### **13.8.5. Ensaio de Sucção**

Os ensaios de sucção nas amostras de solos naturais e nas misturas que apresentaram melhores comportamentos tiveram como objetivo inicial avaliar a influência da sucção nos valores de CBR encontrados, nas condições não saturadas. Buscou-se também justificar o comportamento verificado em algumas amostras, onde percebeu-se a redução considerável no valor do CBR, quando as mesmas sofreram processo de saturação.

Embora a adição de rejeito aos solos naturais venha a gerar a formação de outro material com características diferentes do solo natural, a pesquisa se propôs a avaliar quais as modificações reais ocorridas nos parâmetros de sucção, quando da adição do rejeito aos solos naturais, comparando também a influência da sucção nos valores de CBR encontrados em todas estas amostras.

Foi usada também uma avaliação da sucção através da curva característica corrigida pelo índice de vazios, proposta por Camapum de Carvalho e Lerouril (2000). A curva característica

corrigida permite determinar o valor da sucção de um solo, estando o mesmo em diferentes graus de saturação e índice de vazios. Considerando esta proposta, os resultados a serem apresentados estão expressos em função do grau de saturação pelo valor da sucção na unidade kPa e pelo grau de saturação percentual pela sucção na unidade  $\log H_2O$  cm.

A Tabela 26 apresenta os valores da sucção média obtida a partir da curva característica corrigida. Nesta mesma tabela são apresentados os valores dos CBR médios obtidos para cada corpo de prova dos solos analisados.

Complementando os estudos de sucção são apresentadas as curvas características de retenção de água, realizadas nas diversas amostras pesquisadas, com apresentação das curvas de sucção convencionais e corrigidas em função do índice de vazios.

Em relação ao solo de Caturai, foram escolhidas as amostras de solo natural, e a mistura contendo adição de 35% de rejeito. Esta mistura, quando em condição não saturada apresentou um valor de CBR superior ao solo natural e quando em condição saturada percebeu-se a inversão dos resultados. Este comportamento conduziu a realização da investigação da sucção destas amostras no sentido de quantificar a influência da sucção no comportamento do CBR para estes materiais.

Tabela 26. Resultado da sucção média obtida na curva característica.

Material	CBR (%)	Índice Vazios( $\epsilon$ )	Sr (%)	e x pf	Sucção em (pf)	Sucção em (kPa)
Caturai	21	0,53	85,7	1,25	2,36	22,5
Caturai Saturada	17	0,52	88,9	1,05	2,02	10,3
Caturai + 35% rejeito	28	0,48	68,2	1,30	2,7	49,2
Caturai +35% rejeito saturada	12	0,48	99,5	1,0	2,08	11,8
Goianira	23	0,83	94,2	1,70	2,06	11,3
Goianira saturada	13	0,81	99,2	1,22	1,48	3,0
Goianira + 25% rejeito	24	0,61	92,4	1,68	2,73	52,7
Goianira + 25% rejeito saturada	20	0,62	96,2	1,50	2,43	26,1
Inhumas	24	0,63	86,7	1,67	2,66	44,8
Inhumas saturada	10	0,65	96,2	1,30	2,01	10,0
Inhumas + 15% rejeito	20	0,52	91,5	1,35	2,61	40,0
Inhumas + 15% rejeito saturada	15	0,51	99,7	0,77	1,49	3,2

A Figura 74 ilustra a curva de sucção obtida pelo método convencional para as composições com a amostra de Caturai.

Observa-se nas amostras de Caturai que a sucção influenciou o valor do CBR da composição que recebeu adição de 35% de rejeito nas condições não saturadas. Este material apresentou um menor grau de saturação (67%) bem como um menor índice de vazios em relação ao solo na condição natural, conferindo um maior valor de sucção e um conseqüente aumento no valor do CBR.

Quando saturado, o solo contendo adição de 35 % de rejeito não apresentou o mesmo desempenho mecânico observado na condição de não saturação, apresentando uma queda significativa no valor do CBR de 28 para 12%.

Embora se tratando, de amostras distintas, é interessante destacar que em condições não saturadas as maiores sucções proporcionaram maiores valores de CBR. Neste contexto, observou-se que a amostra contendo adição de rejeito apresentou maior sucção e maior CBR do que a amostra de solo natural. Concluí-se que o principal fator que modificou a sucção foi a redução do grau de saturação.

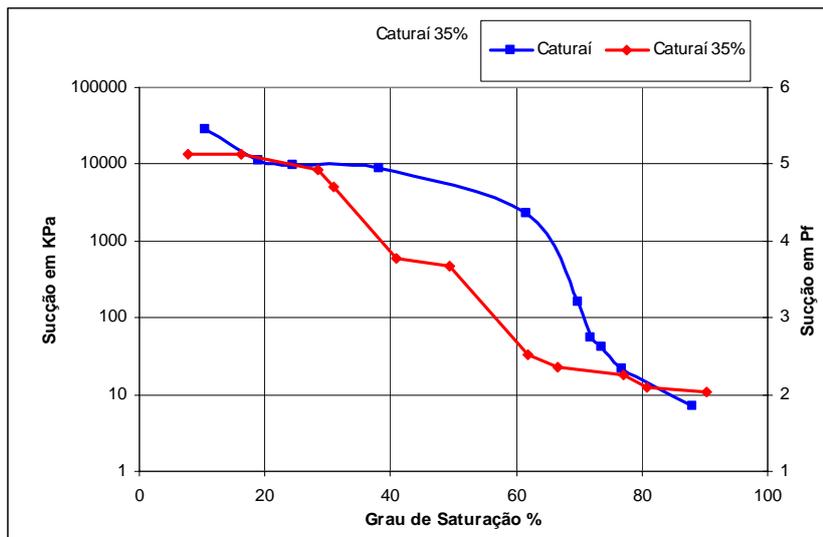


Figura 74. Curvas de sucção das composições de Caturai.

Em relação aos solos de Goianira foram escolhidos para análise da sucção, a amostra de solo natural e a amostra contendo adição de 25% de rejeito. Esta ultima composição foi escolhida em decorrência de ter apresentado o maior valor de CBR em condição saturada. É importante ressaltar que o solo de Goianira foi o que apresentou uma maior modificação de comportamento quando associado ao rejeito.

Verifica-se, que o melhor desempenho em termos de CBR alcançado pela amostra de solo que recebeu adição do rejeito foi em decorrência da redução do índice de vazios. Esta constatação pode ser também esclarecida, através dos resultados obtidos na avaliação da microscopia eletrônica

de varredura, realizada nas duas amostras. Estes resultados que serão apresentados no próximo item confirmam a redução do índice de vazios do solo quando o mesmo recebeu adição de rejeito.

Em relação ao estudo da sucção, desenvolvidos para os solos de Inhumas, foram escolhidos além do solo natural, a mistura contendo adição de 15% de rejeito. A amostra com 15% de rejeito foi escolhida em função da execução da pista experimental realizada em Inhumas utilizando esta mesma porcentagem de rejeitos.

Em relação a estes materiais, os resultados apontam a influencia do grau de saturação no valor obtido da sucção bem como no comportamento mecânico do solo. O solo natural foi ensaiado com um grau de saturação de 86,7% e apresentou uma sucção de 70 kPa. O solo com adição de 15% de rejeito foi ensaiado com um grau de saturação de 91,5%, apresentando uma sucção de 57 kPa.

Ao considerar os valores do grau de saturação e identificá-los na curva característica corrigida pelo índice de vazios foi obtida uma sucção de 44,8 kPa, para o solo natural de Inhumas, e um valor de 40 kPa para a composição com adição de 15% rejeito, valores obtidos. Constata-se que a sucção no solo natural foi maior que a da mistura nas duas condições analisadas, com e sem correção. Este comportamento foi, provavelmente, em decorrência da influência do maior teor da fração argila existente no solo natural, e pelo grau de saturação menor, superando a influência do índice de vazios que foi menor para a composição que recebeu adição de rejeito.

Apesar de estarem com valores muito próximos, os resultados dos ensaios demonstram que a sucção influenciou no valor do CBR em condições não saturadas, ou seja, a amostra que apresentou maior valor de sucção apresentou também um maior valor de CBR. Outra constatação foi a de que a sucção também influenciou o comportamento resiliente, observando-se maiores módulos para valores de sucção mais elevados.

#### **13.8.6. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)**

Os resultados dos ensaios de MEV foram realizados para complementar as investigações das composições que apresentaram melhores e piores desempenhos e tiveram como objetivo compreender melhor os efeitos da adição de rejeito nos solos naturais. Neste sentido, quatro amostras foram submetidas a esta investigação, o solo natural de Goianira, o solo de Goianira com adição de 25% de rejeito, solo de Caturai e o solo de Caturai com 35% de rejeito.

Esta investigação apresentou subsídios para o entendimento da estrutura das composições e do comportamento mecânico verificado nos ensaios de CBR. Os resultados desta investigação serão apresentados numa seqüência de figuras, sendo cada amostra analisadas individualmente.

As Figuras 75 a 78 ilustram os resultados da investigação realizada no MEV para o solo de Caturai e a associação com 35% de rejeito em diferentes ampliações.

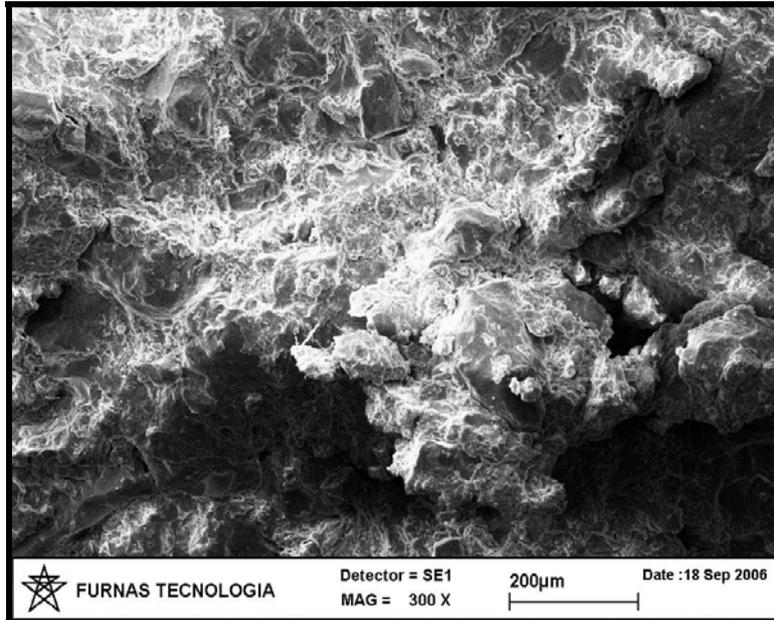


Figura 75. Imagem do MEV na amostra de Caturai com ampliação de 300X.

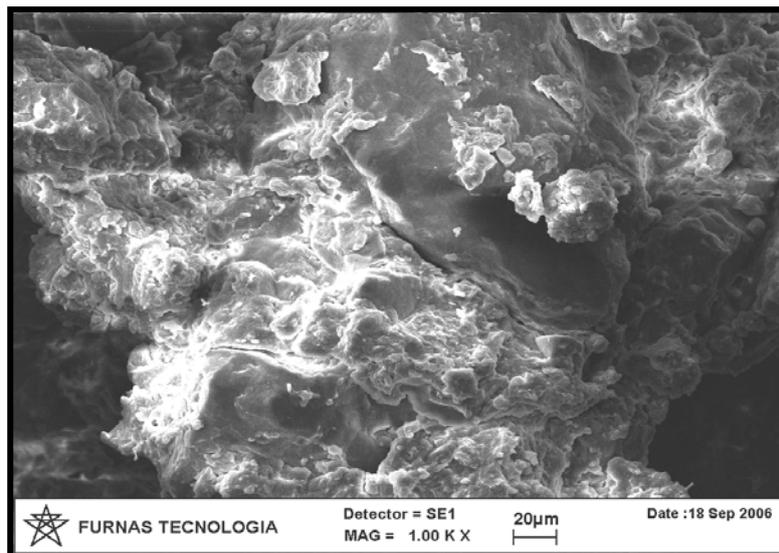


Figura 76. Imagem do MEV na amostra de Caturai com ampliação 1000X

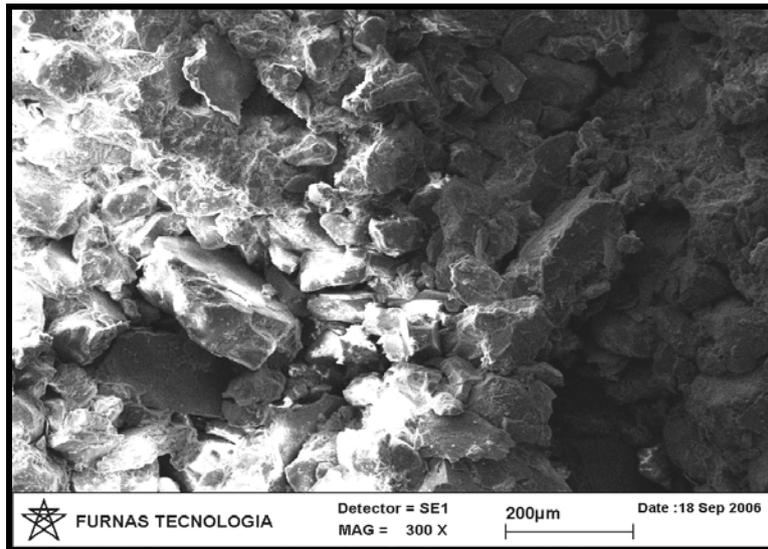


Figura 77. Imagem do MEV na amostra de Caturai com 35% de rejeito com ampliação de 300X.

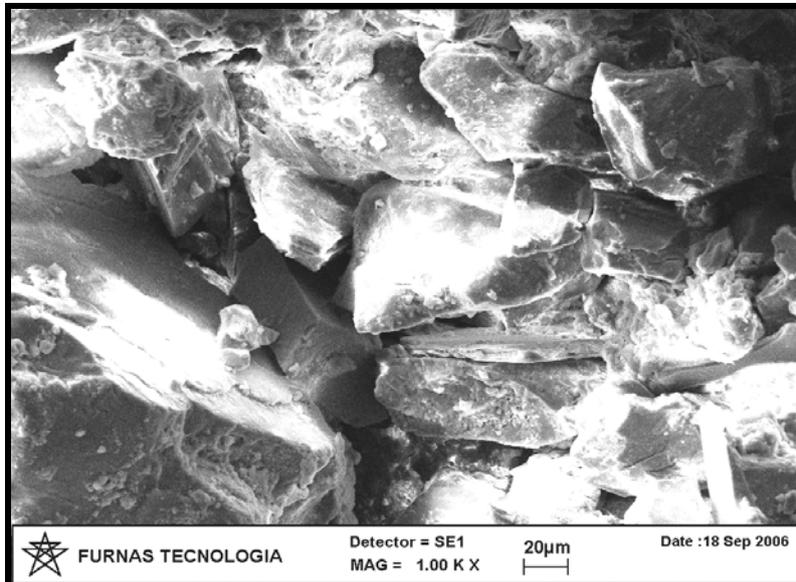


Figura 78. Imagem do MEV, amostra de Caturai com 35% de rejeito com ampliação de 1000X

Quando a amostra de solo natural de Caturai foi avaliada no MEV, verificou-se a presença de uma estrutura densa, caracterizada pelo contato entre as partículas sólidas envolvidas por camada cimentante. Estes elementos foram também detectados nos ensaios de difração de raio X. Esta cimentação, conforme pode ser observada nas Figuras 75 e 76 atuam na ligação entre as partículas e provavelmente contribuiu para o índice de CBR deste solo na condição natural, conduzindo a uma pequena perda de suporte com a saturação da amostra.

Nas imagens do solo que recebeu adição de 35% de rejeito, Figuras 77 e 78, percebe-se nitidamente uma estrutura mais compacta, mostrando um maior contato entre as partículas sólidas e uma redução da cimentação natural. A inclusão de rejeito não contendo em sua composição a presença de elementos cimentantes, tais como o ferro e o alumínio, reduziu o teor destes elementos, existentes no solo natural. Desta forma, a resistência apresentada nas condições não

saturadas para a associação contendo 35% de rejeito se deve basicamente ao contato entre as partículas, além de outros fatores já abordados, como a sucção e do índice de vazios.

Em relação ao comportamento das composições de Goianira, a técnica do MEV muito contribuiu para o entendimento das modificações percebidas no comportamento físico e mecânico do solo quando da adição do rejeito. O solo de Goianira apresenta uma estrutura porosa, composta de macro e micro poros, com a presença de cimentação envolvendo as partículas maiores e a formação de grumos. Esta estrutura observada no MEV esclarece o maior índice de vazios registrados nesta amostra. Além disso, comparando as estruturas do solo natural com a que foi adicionada rejeito, observa-se a presença de uma maior porosidade do solo natural em relação ao solo que recebeu adição de rejeito.

Com a inclusão do rejeito no solo é perceptível a presença das partículas sólidas do rejeito modificando a estrutura do solo. Percebe-se um maior contato entre os grãos sólidos e a redução da cimentação. Verifica-se ainda, que mesmo com a inclusão do rejeito ao solo natural permanecem ainda a presença de micro e macro poros embora em menores proporções que no solo na condição natural. Este fato poderia justificar o aumento no valor do CBR para solo com adição de 25 % de rejeito.

#### **13.8.7. Módulo de Resiliência**

Os estudos do comportamento resiliente foram realizados nas amostras de Goianira, Goianira com adição de 25% de rejeito, em função destas amostras terem apresentados comportamentos bastantes distintos e nas amostras de Inhumas, Inhumas com adição de 15% de rejeito, o cascalho e cascalho com adição de 15% de rejeito, devido a utilização na execução da pista experimental.

Os índices denominados de K1, K2, K3, e K4 são denominados de parâmetros de resiliência, sendo obtidos nos gráficos do ensaio, conforme as diretrizes apontadas na norma ME 131 (DNER, 1994). Estes índices são utilizados para o cálculo do módulo de resiliência de cada solo e mistura analisada nesta pesquisa.

Através dos resultados obtidos, verifica-se que para qualquer tensão confinante aplicada, o valor do módulo resiliente do cascalho será superior ao valor da mistura contendo adição de rejeito fino de pedreira.

Para tensões confinantes mais elevadas, percebe-se a redução nos valores dos módulos resilientes do cascalho em relação à mistura. A adição de rejeito, contendo frações equivalentes a um solo silteoso em sua composição, e a redução no teor de pedregulho no cascalho foram sem dúvida às razões para o decréscimo no valor do módulo resiliente.

Em relação aos resultados obtidos para a composição de Goianira, de acordo com as recomendações do Manual de Pavimentação do Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes (DNIT, 2006) para a classificação resiliente dos solos finos, estas composições seriam enquadradas no Grupo II, sendo credenciados para uso em subleito ou reforço de subleito. Verifica-se que a adição de rejeito ao solo natural de Goianira não prejudicou o seu comportamento resiliente, ficando ambas as composições no mesmo grupo de classificação proposto pelo DNIT (2006).

Para as composições da cidade de Inhumas as amostras foram classificadas conforme a recomendação do DNIT (2006) como solos do grupo II, solos com características resilientes de material de reforço e de subleito. Embora com a uma característica limitada de utilização do solo de Inhumas a adição do rejeito não inviabilizou uso deste material para confecção de camada de subleito ou reforço.

#### **13.8.8. Ensaios de Campo**

Como forma de avaliar tecnicamente o pavimento foram realizados ensaios de campo destinados ao controle executivo de duas pistas experimentais com e sem adição de rejeito. Foram realizados ensaios de controle de compactação, avaliação das bacias de deflexões com o uso da viga Benkelman e a determinação do coeficiente de rigidez da camada e do módulo de elasticidade do material, sendo estes dois últimos parâmetros determinados pelo uso do aparelho Geogauge.

##### **a) Controle de Compactação**

Para determinar o grau de compactação e o desvio de umidade ótima foi utilizada a metodologia do frasco de areia e do Speedy.

Os pavimentos foram constituídos de uma camada de subleito e de uma camada de base com e sem adição de rejeito. Em todas estas camadas foi adotada a energia de compactação do Proctor intermediário e controle de campo foi realizado em furos espaçados de no mínimo 20m. Os resultados desta investigação estão apresentados na Tabela 27.

Tabela 27. Resultados dos ensaios de controle de compactação do campo

Camada	Trecho	$\gamma_{\text{campo}}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_{\text{dmáx.}}$ (kN/m <sup>3</sup> )	G.C.(%)	$W_{\text{campo}}$ (%)	$w_{\text{ot}}$ (%)	$\Delta w$ (%)
Subleito	Com Rejeito	17,73	18,02	98,4	16,8	17,3	-0,5
Subleito	Com Rejeito	17,7	18,02	98,2	16,7	17,3	-0,6
Subleito	Com Rejeito	17,65	18,02	97,9	16,7	17,3	-0,6
Base	Com Rejeito	18,90	18,62	101,5	12,4	12,7	-0,3
Base	Com Rejeito	18,86	18,62	101,1	12,5	12,7	-0,2
Base	Com Rejeito	19,04	18,62	102,3	12,6	12,7	-0,1
Subleito	Sem Rejeito	17,11	17,09	100,1	19,6	19,8	-0,2
Subleito	Sem Rejeito	17,03	17,09	99,6	19,7	19,8	-0,1
Subleito	Sem Rejeito	16,92	17,09	99,0	19,6	19,8	-0,2
Subleito	Sem Rejeito	17,09	17,09	98,1	19,5	19,8	-0,3
Subleito	Sem Rejeito	16,87	17,09	98,7	19,6	19,8	-0,2
Base	Sem Rejeito	18,86	18,62	101,3	14,7	14,4	0,3
Base	Sem Rejeito	18,80	18,62	100,7	14,5	14,4	0,1
Base	Sem Rejeito	18,62	18,62	100,0	14,4	14,4	0,0
Base	Sem Rejeito	18,58	18,62	99,7	14,9	14,4	0,5
Base	Sem Rejeito	18,50	18,62	99,3	14,6	14,4	0,2

Os resultados demonstraram que praticamente todos os pontos investigados, apresentaram um grau de compactação (GC) e desvio de umidade ( $\Delta w$ ) dentro das recomendações adotadas.

Após a execução da compactação da camada do subleito com adição de rejeito e da realização dos ensaios para o controle de compactação, esperou, devido aos problemas de transporte do material de jazida, um período de 36 horas para realizar o lançamento e espalhamento do cascalho sobre esta camada. Assim, durante este período foi observado a formação de trincas em todas à superfície da camada de subleito que recebeu adição do rejeito.

Como forma de correção do referido problema, foi realizada uma raspagem da camada com a motoniveladora, a uma profundidade de 3 cm, observando a redução das trincas. Após a remoção desta camada foi então lançado e espalhado o cascalho sobre a mesma, permanecendo este material sobre o subleito até a execução da base.

É importante também destacar que os ensaios de controle de compactação haviam sido realizados 36 horas antes do aparecimento das trincas e que em nenhum momento houve molhagem superficial da camada de subleito. Ressalta-se ainda que nestes ensaios já havia indícios de redução de umidade de campo em relação à umidade ótima do material.

#### b) Viga Benkelman

Os resultados obtidos da avaliação das deflexões ocorridas nas duas pistas experimentais para a condição natural e com adição de rejeito estão apresentados nas Tabelas 28 e 29,

respectivamente. A Figura 79 ilustra as bacias de deflexões médias obtidas nas duas pistas experimentais.

Avaliando a Figura 79, observa-se que a inclusão do rejeito ao cascalho e ao solo fino do subleito praticamente não alterou as bacias de deflexões do pavimento. Este comportamento comprova que a adição em volume de 15% de rejeito ao solo natural não prejudicou o comportamento das camadas do pavimento.

Tabela 28. Resultados das bacias de deflexões da pista sem o uso do rejeito

Pontos de Análise (centímetros)		Deflexão nos Pontos em cm. mm					Média (cm .mm)	Desvio Padrão
		Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 5		
0	D <sub>0</sub>	170	166	162	176	190	173	10,92
25	D <sub>25</sub>	124	102	98	138	140	120	19,67
50	D <sub>50</sub>	74	52	58	68	66	64	8,66
75	D <sub>75</sub>	34	30	26	34	28	30	3,6
100	D <sub>100</sub>	16	18	12	16	16	16	2,23
150	D <sub>150</sub>	4	4	8	4	8	6	2,23
300	D <sub>300</sub>	0	0	0	0	0	0	0
500	D <sub>500</sub>	0	0	0	0	0	0	0
700	D <sub>700</sub>	0	0	0	0	0	0	0

Tabela 29. Resultados das bacias de deflexões da pista com o uso de rejeito

Pontos de Análise (centímetros)		Deflexão nos Pontos em cm .mm.					Média (cm .mm)	Desvio Padrão
		Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 5		
0	D <sub>0</sub>	152	156	158	188	168	164	14,45
25	D <sub>25</sub>	122	130	130	154	154	128	14,97
50	D <sub>50</sub>	52	56	82	82	74	69	10,98
75	D <sub>75</sub>	20	26	42	38	48	35	11,54
100	D <sub>100</sub>	10	16	28	18	20	18	6,55
150	D <sub>150</sub>	6	4	16	4	6	7	5,02
300	D <sub>200</sub>	0	0	0	0	0	0	0
500	D <sub>300</sub>	0	0	0	0	0	0	0
700	D <sub>500</sub>	0	0	0	0	0	0	0

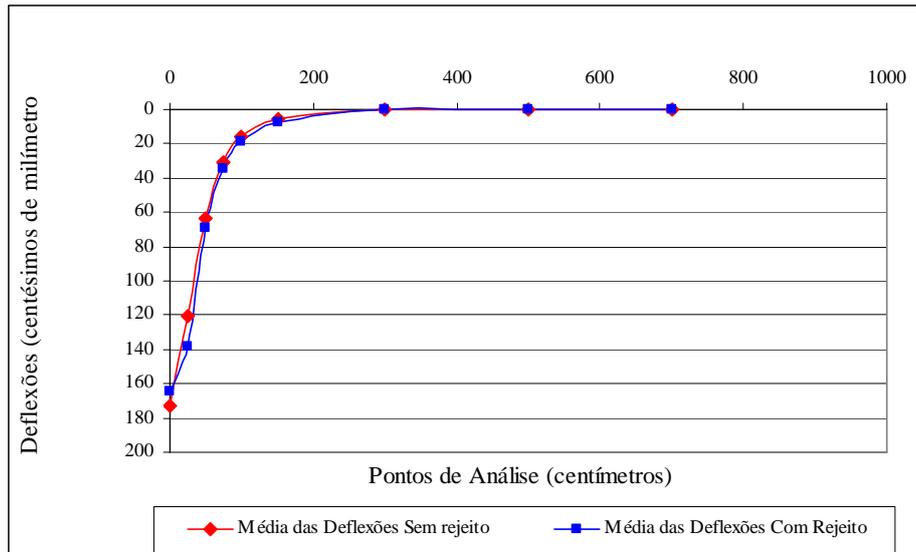


Figura 79. Gráficos das bacias de deflexões médias, obtidos nas pistas experimentais com o uso do rejeito e sem o uso do rejeito.

O trecho experimental construído com adição de 15% de rejeito apresentou um raio de curvatura superior ao trecho realizado sem adição do rejeito, sendo de 120 metros para o trecho com rejeito e de 60 metros para o trecho sem rejeito. O que indica uma melhor condição física do pavimento que recebeu adição de rejeito se for considerado aos valores preconizados pela norma PRO 011 (DNER, 1979). Esta norma recomenda que um pavimento em bom estado de conservação deva apresentar raio de curvatura superior a 100 metros e deflexões de projeto menores que as deflexões admissíveis de campo.

### c) Rigidez e Módulo de Elasticidade

O coeficiente de rigidez representa o valor da força máxima aplicada ao solo para promover uma deflexão sem que se ocorra uma deformação permanente. O coeficiente de rigidez é uma propriedade da estrutura do pavimento, sendo influenciado pela espessura da camada, pelo módulo de elasticidade do solo e pelas condições limites de restrição da camada. Assim, quanto maiores os valores do coeficiente de rigidez e do módulo de elasticidade melhor será o comportamento da estrutura de um pavimento.

Neste trabalho, devido à frequência de funcionamento do aparelho Geogauge, a profundidade máxima de investigação do comportamento da estrutura foi de 25 cm. Desta forma, foi apenas avaliado o parâmetro da camada da base das duas pistas experimentais, não sendo possível avaliar a camada do subleito. As Tabelas 30 e 31 apresentam os resultados do coeficiente de rigidez ( $\alpha$ ) e do módulo de elasticidade (E) da camada de base executada com o solo na condição natural e com a adição de rejeitos.

Tabela 30. Resultados dos ensaios rigidez e módulo de elasticidade sem o rejeito.

Local	Rigidez (MN/m)	Rigidez Média Pista (MN/m)	Desvio Padrão	Módulo Young (MPa)	Módulo de Young Médio (MPa)	Desvio Padrão
Trecho 01	17,2	15,1	1,28	155,0	136,0	11,53
Trecho 02	14,1			127,0		
Trecho 03	14,1			127,0		
Trecho 04	14,8			133,0		

Tabela 31. Resultados dos ensaios de rigidez e módulo de elasticidade com o rejeito

Local	Rigidez (MN/m)	Rigidez Média Pista (MN/m)	Desvio Padrão	Módulo Young (MPa)	Módulo de Young Médio (MPa)	Desvio Padrão
Trecho 01	22,2	20,2	2,17	199,0	181	19,1
Trecho 02	20,4			181,0		
Trecho 03	17,9			162,0		

Verifica-se que os índices de rigidez e o módulo de elasticidade obtidos na pista experimental construída com o uso do rejeito foram mais elevados em relação aos obtidos na pista experimental que não recebeu adição de rejeito. De uma forma geral, este comportamento traduz a presença de materiais menos deformáveis, representando maiores benefícios para a durabilidade do pavimento com menores deformações resilientes.

Embora o aumento nestes índices não tenha sido muito expressivo, verifica-se que a adição deste teor de rejeito ao solo não prejudicou a estrutura deste pavimento. Se avaliados os resultados de todos os ensaios realizados em campo conclui-se que ambas as composições apresentaram índices muito próximos, demonstrando que a inclusão do rejeito fino de pedra não prejudicou o desempenho do solo utilizado como material de base e nem da estrutura global do pavimento.

#### **d) Análise da viabilidade econômica da adição do rejeito à camada de base**

Após a conclusão da investigação da capacidade técnica do uso do rejeito na estabilização de solos tropicais, esta pesquisa direcionou-se para a avaliação da viabilidade econômica desta adição na produção de um pavimento urbano com volume de tráfego leve. Esta análise visou complementar a análise técnica no sentido de aferir quais seriam os ganhos financeiros e ambientais com o reaproveitamento do rejeito.

Na primeira etapa desta proposta, foi avaliada a viabilidade econômica da adição de 15% em volume do rejeito ao solo granular (cascalho), visando à construção somente da camada de base de todo o pavimento executado naquele empreendimento imobiliário.

Como não houve estudos geotécnicos e de projetos, o dimensionamento do pavimento não considerou qualquer metodologia técnica. Neste caso, utilizou-se apenas a experiência prática regional, sendo estipuladas às espessuras das camadas do pavimento em:

- Revestimento 2,5 cm em tratamento superficial duplo;
- Camada de base 20 cm de espessura;
- Reforço ou regularização de subleito 20 cm de espessura.

Com base nestas espessuras foram realizadas análises visando verificar quais seriam os custos relativos das duas situações, uma executada com adição de 15% em volume de rejeito e a outra sem adição.

Os custos comuns referentes a estes dois tipos de construção não foram considerados por possuírem o mesmo valor econômico. Assim, os custos com a implantação da camada de brita para o tratamento duplo e o banho de emulsão desta camada não foram computados.

Os índices considerados nos custos entre os dois pavimentos foram:

- O valor do momento de transporte, expresso em reais por  $m^3.km$ ;
- O valor do custo com exploração e limpeza de jazida, expresso em reais por  $m^2$ ;
- O valor de consumo de asfalto diluído (CM-30) para imprimação da camada de base, expresso em reais por tonelada do produto;
- Valor na compra dos materiais de jazida (cascalho) e do rejeito.

Para o cálculo da quantidade de rejeito médio adicionado ao solo granular foi adotada a seguinte proposta de dimensionamento. A pista experimental que utilizou o rejeito apresentava dimensões de 72 m de comprimento, 06 metros de largura e 20 cm de espessura, com talude 3:2. Esta configuração de projeto confere uma área compactada de camada de base de  $1,26 m^2$  e um volume compactado de  $91m^3$ .

O coeficiente de empolamento do cascalho, foi de 1,20 para uma umidade higroscópica de 4,2%. O coeficiente de inchamento do rejeito determinado foi de 1,35 e a umidade média no ensaio de inchamento do rejeito foi de 5% .

Através do coeficiente de empolamento foi possível obter o volume de solo natural necessário para executar a referida camada na pista experimental.

Foram transportados aproximadamente de 22 m<sup>3</sup> de rejeito úmido para a pista experimental, sendo este espalhado sobre a camada de solo natural, assim determinou-se o volume seco aproximado de rejeito que foi adicionado ao cascalho.

$$\text{Volume do rejeito seco} = \frac{VH}{I}$$

Onde:

VH= volume do rejeito úmido em m<sup>3</sup>;

I= Coeficiente de inchamento.

Obteve-se um volume seco de cascalho solto de aproximadamente 105 m<sup>3</sup>, sendo adicionado 16 m<sup>3</sup> de rejeito seco a este volume de solo, traduzindo um percentual de adição aproximado de rejeito em volume de 15%.

A área total pavimentada foi de 14.830,44 m<sup>2</sup>, o que representa uma extensão total de 2.472m. Para uma espessura de base adotada de 20 cm, a área da seção da pista compactada foi de 1,26 m<sup>2</sup>. Considerando o coeficiente de empolamento obtido para o cascalho de 1,20, obtém-se um volume solto de cascalho de 3840m<sup>3</sup>. Este volume representa a quantidade necessária de material para a construção de toda a camada de base do pavimento.

Considerando primeiramente a não inclusão do rejeito na camada de base tem-se os custos de execução apresentados na Tabela 32.

Tabela 32. Custo dos itens relativos da camada de base executada sem adição do rejeito ao solo granular.

Atividade desenvolvida	Quantitativo	Preço unitário (R\$)	Custo total (R\$)
Momento de Transporte do cascalho (m <sup>3</sup> .km)	100.746,24	1,00	100.746,24
Momento de Transporte do rejeito (m <sup>3</sup> .km)	0,00	0,00	0,00
Serviços de jazidas (m <sup>2</sup> ).	4.800	0,26	1.248,00
Serviço de imprimação (t)	14,830	1.540	22.838,00
Compra de cascalho (m <sup>3</sup> ).	3.840	2,50	9.600,00
Compra de rejeito (m <sup>3</sup> ).	0,00	0,00	0,00
<b>Custo total</b>			<b>134.432,00</b>

Com a inclusão do rejeito na camada de base na camada de base serão apresentados os mesmos itens de custos analisados anteriormente. É importante notar que no caso da adição de 15 % de rejeito o volume de cascalho será 85% da quantidade calculada para a execução desta camada. Na Tabela 33 são apresentados os custos relativos confecção da camada de base utilizando a composição com 15 % de rejeito.

Tabela 33. Custo dos itens relativos da camada de base executado com adição de 15% em volume do rejeito ao solo granular.

Atividade	Quantitativo	Preço unitário (R\$)	Custo total (R\$)
Momento de Transporte do cascalho (m <sup>3</sup> .km)	85.634	1,00	85.634,00
Momento de Transporte do rejeito (m <sup>3</sup> .km)	10.066	0,35	3.523,00
Serviços de jazidas (m <sup>2</sup> ).	4.080	0,26	1.061,00
Serviço de imprimação (t)	16,313	1.540,00	25.123,00
Compra de cascalho (m <sup>3</sup> ).	3.264	2,50	8.160,00
Compra de rejeito (m <sup>3</sup> ).	778	3,00	2.334,00
<b>Custo total</b>			<b>125.835,00</b>

Este valor é inferior ao custo relativo à confecção do pavimento com o solo na condição natural, sem adição de rejeitos. A diferença de custo entre as duas composições é de 6,4%.

Deve-se ainda destacar que não foram computados neste trabalho, custos relativos aos ganhos ambientais, com a utilização do rejeito. A valoração do ganho ambiental é ainda bastante difícil de ser estimada, não sendo possível arbitrar um valor econômico preciso para quantificá-lo. Contudo, sabe-se que a possibilidade de aproveitamento destes materiais representa uma redução no volume de material a ser estocado nas pilhas e/ou barragens e um grande ganho ambiental.

Constata-se ainda que os principais itens mensuráveis para redução de custo quando da adição do rejeito ao solo granular foram relativos ao momento de transporte bem como com as atividades de exploração da jazida. A distância de transporte é sem dúvida um elemento que influenciou na redução do custo deste pavimento. Se esta distância fosse reduzida em 2,6 Km para o transporte do cascalho, a diferença no custo praticamente não existiria.

O rejeito possui um custo de compra mais elevado do que o cascalho regional, isto certamente contribui negativamente para a sua competitividade. Outra desvantagem do uso econômico do rejeito é com relação ao consumo de asfalto diluído, utilizado para imprimação da base. Por conduzir a uma base com características mais arenosas, verificou-se no campo a necessidade de se aumentar a taxa de imprimação com o uso do CM-30, o que aumentou sensivelmente o custo para a realização desta operação.

Adicionalmente, percebe-se que a adição de rejeito nos solo de Inhumas gerou um acréscimo médio de 5 unidades percentuais no valor do CBR. Este acréscimo quando analisado sob o ponto de vista de projeto reduziria a espessura das camadas subjacentes, o que implicaria na redução de custos deste pavimento. Uma espessura mais reduzida proporcionaria um menor volume de material a ser escavado e transportando, além de uma menor degradação ambiental da área de

extração. Pode-se considerar que adição de rejeito neste caso implicaria em uma redução de custos de cerca de 15% do total gasto sem a adição de rejeito.

Deve-se ressaltar que outros custos devem ser considerados, alguns a favor da inclusão do rejeito nestas camadas e outros contrários.

Como custo favorável, poderia ser apontada a redução no custo da hora-máquina, bem como no custo de manutenção das mesmas, principalmente aquelas utilizadas nos serviços de limpeza e exploração de jazidas e transporte de jazida.

Em relação a custos desfavoráveis, a utilização do rejeito é bastante minuciosa, exigindo tempo de secagem, e processos mais criteriosos de mistura e compactação. Além disso, é necessária uma maior experiência dos profissionais na manipulação do rejeito para evitar erros de execução, conforme ocorreu na execução da pista experimental desta pesquisa.

Finalizando esta análise, verifica-se que para esta situação apresentada à adição do rejeito ao solo seria viável economicamente. Para outras situações haveria a necessidade de se realizar estudos específicos, avaliando-se se esta adição conduziria a melhorias no comportamento mecânico, ou pelo menos a manutenção das mesmas, e também se a mesma promoveria a redução de custo.

### **13.9. Resultados da Aplicação dos Resíduos Finos de Pedreira em Fundações**

A Engenharia de Fundações vem sofrendo grande avanço nos últimos anos. As fundações profundas, em especial as estacas escavadas, ganharam produtividade, melhorando qualidade e desempenho. A estaca hélice contínua é um exemplo dessa evolução. Surgida no final da década de 80, na Europa, vem sendo largamente utilizada no Brasil devido a sua alta produtividade e a ausência de choques e vibrações durante seu processo executivo. O concreto normalmente utilizado neste tipo de estaca apresenta um slump entre 200 e 240 mm, consumo mínimo de cimento de 400 kg/m<sup>3</sup> e  $f_{ck}$  mínimo de 20 MPa. Estas características são facilmente obtidas com o uso do Concreto Auto-Adensável (CAA). Esse concreto caracterizado pela grande fluidez, elevada viscosidade e alta resistência à segregação, utiliza os mesmos materiais dos concretos convencionais, porém com maior adição de finos e de aditivos químicos. A adição de finos proporciona melhoria em diversas propriedades, tanto no estado fresco como no estado endurecido. Estes finos podem ser adições minerais ou filer, como o resíduo gerado pelas pedreiras no processo de fabricação de areia artificial, cuja demanda tem crescido em função da carência de agregados miúdos naturais. A utilização desse resíduo, produzido em grandes quantidades nas pedreiras, poderá contribuir para o avanço tecnológico e desenvolvimento sustentável do concreto. Nesta etapa do trabalho os resíduos finos de pedreira foram utilizados

como adição mineral para obtenção de CAA para confecção de estacas escavadas tipo hélice contínua.

### 13.9.1. Dosagem do Concreto Auto-Adensável (CAA)

A dosagem do CAA seguiu a metodologia apresentada anteriormente. Os resultados obtidos nesta fase serão apresentados a seguir. Para se avaliar o fluxograma adotado nos ensaios, a Figura 80 apresenta um esquema das etapas.

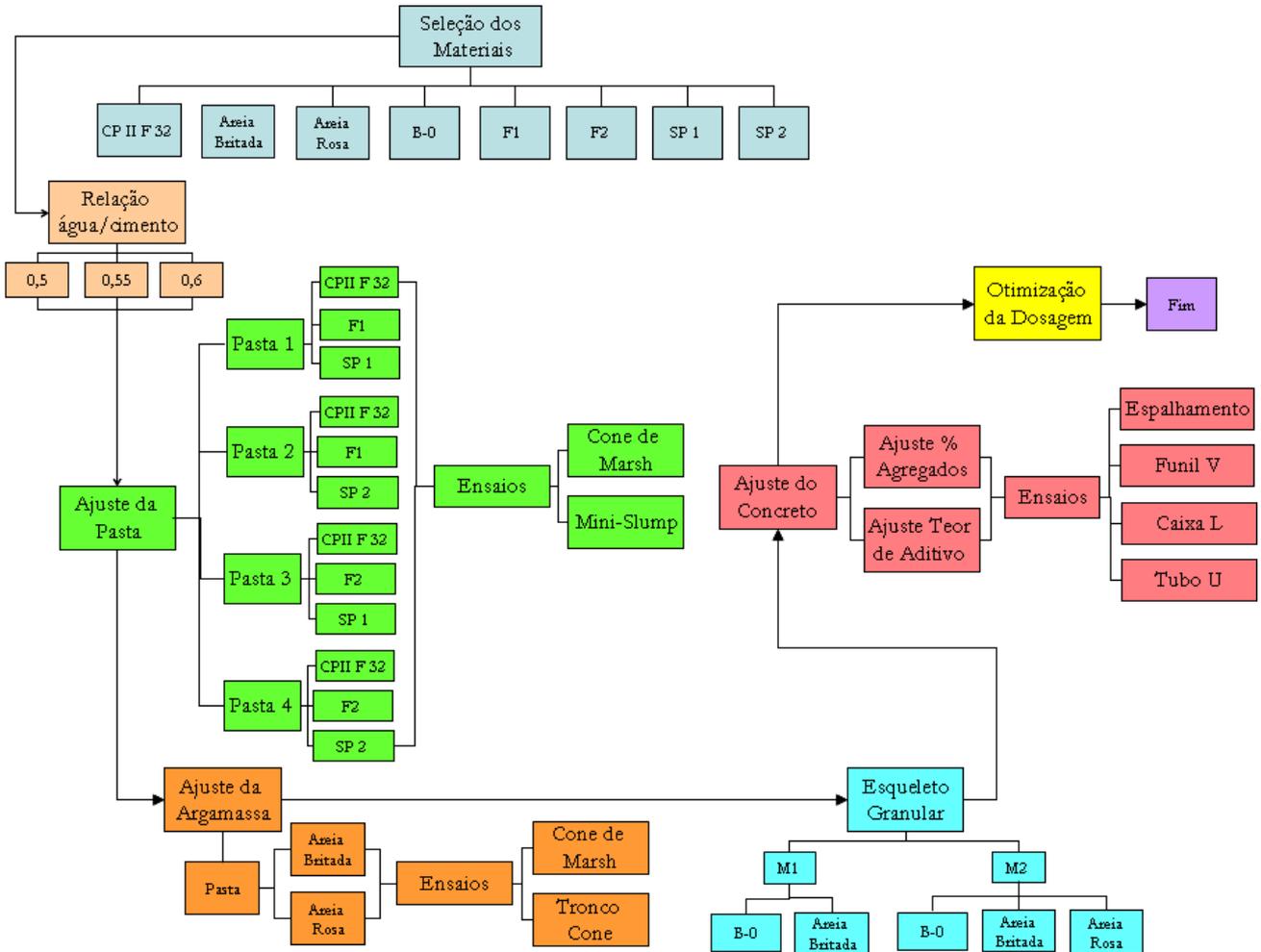


Figura 80. Fluxograma de dosagem do CAA

### 13.9.2. Estudos para ajuste das pastas

Dos estudos da pasta foram obtidos os teores de filer e de aditivo superplastificante. Os resultados desta fase serão apresentados a seguir.

## a) Teor de finos

O teor ideal de finos para cada relação a/c foi determinado para que fosse obtida uma pasta no limite da segregação dos sólidos (cimento e filer). Através da análise visual da pasta chegou-se aos teores de 35% para relação a/c de 0,5; 40% para a/c de 0,55; e 45% para a/c de 0,6. Estes valores foram obtidos sem utilização de aditivos. Desta forma variou-se estes valores 5% para mais e para menos. O teor de filer aumentou com o aumento da relação água/cimento devido ao maior teor de água disponível nas misturas.

## b) Saturação do aditivo

Inicialmente foi avaliado o teor de aditivo pelo Cone de Marsh, observando-se o tempo de escoamento das pastas em função do acréscimo do aditivo.

Na Figura 81 estão ilustradas as curvas tempo de escoamento x teor de aditivo, obtidas no ensaio do Cone de Marsh. Os números ao lado das curvas representam a denominação da mistura, de acordo com a Tabela 9.

O ponto de saturação dos aditivos foi considerado como o ponto a partir do qual não houve variação significativa no tempo de escoamento. Os resultados estão apresentados na Tabela 34, considerando o uso dos dois aditivos SP-1 e SP-2.

Observa-se que o ponto de saturação diminui com o aumento da relação água/cimento e aumenta com o teor de resíduo na pasta. O filer F1 demandou menor quantidade de aditivo do que o filer F2. Conclui-se ainda que o uso do aditivo SP-1 é mais eficiente do que o SP-2.

Continuando o estudo nas pastas, foram realizados ensaios de Mini-slump. Os resultados estão mostrados na Tabela 35.

Tabela 34. Teor de saturação dos aditivos SP-1 e SP-2 pelo ensaio do Cone de Marsh

Relação a/c	% Finos	SP-1		SP-2	
		Filer		Filer	
		F1	F2	F1	F2
0,5	30	0,4	0,5	0,7	0,9
	35	0,5	0,5	0,7	0,9
	40	0,5	0,6	0,8	1,0
0,55	35	0,4	0,5	0,6	0,8
	40	0,5	0,5	0,7	0,8
	45	0,6	0,6	0,8	0,9
0,6	40	0,3	0,4	0,5	0,7
	45	0,4	0,5	0,5	0,6
	50	0,4	0,5	0,5	0,6

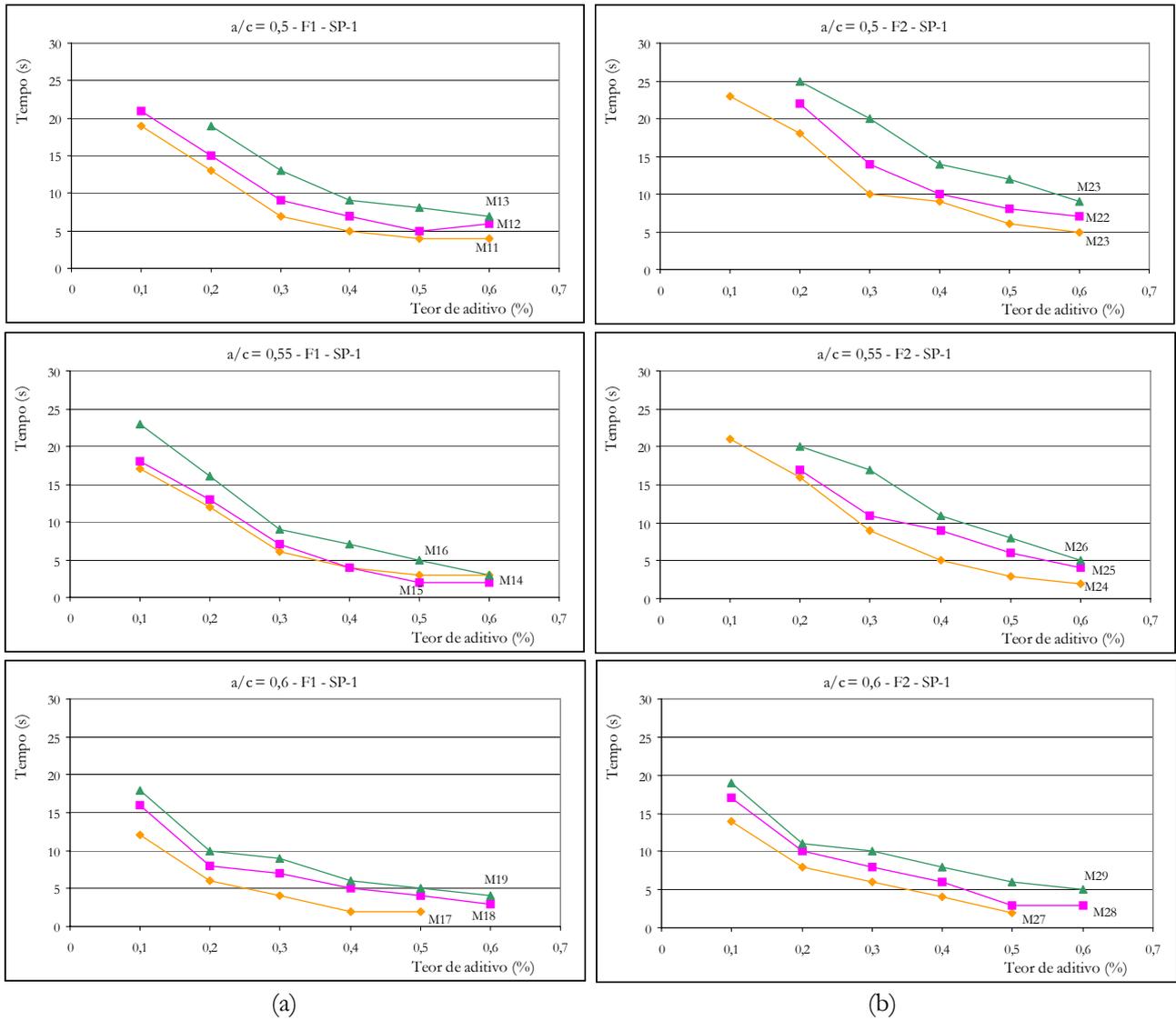


Figura 81. Curvas do ensaio do Cone de Marsh para o Superplastificante SP-1: (a) pastas com filer F1; (b) pastas com filer F2

Tabela 35. Teor de saturação dos aditivos SP-1 e SP-2 pelo ensaio do Mini-Slump

Relação a/c	% Finos	SP-1		SP-2	
		Filer		Filer	
		F1	F2	F1	F2
0,5	30	0,4	0,5	0,6	0,8
	35	0,5	0,7	0,8	0,8
	40	0,5	0,7	0,8	0,9
0,55	35	0,4	0,5	0,5	0,6
	40	0,4	0,6	0,6	0,7
	45	0,4	0,6	0,8	0,8
0,6	40	0,3	0,4	0,6	0,8
	45	0,4	0,5	0,6	0,8
	50	0,4	0,6	0,6	0,9

**13.9.3. Estudos em argamassas**

Foram realizados traços de argamassa com volumes de areia de 35, 40 e 50%. As argamassas foram preparadas a partir das pastas escolhidas na etapa anterior, considerando o teor de saturação do aditivo (SP-1 e SP-2) e a utilização dos dois resíduos para cada uma das relações a/c. Com estas argamassas foram realizados ensaios do Cone Marsh com abertura de 12 mm e o ensaio de espalhamento com o Tronco de Cone. Os resultados deste estudo estão apresentados nas Tabelas 36 a 39.

Tabela 36. Resultado dos ensaios em argamassas para o filer F1 e aditivo SP-1

Relação a/c	% Finos	% Agregado Miúdo	% Aditivo	Escoamento (s)	Espalhamento (mm)
			SP-1		
0,5	35	35	0,45	9,46	327
		40	0,45	26,58	251,5
		45	0,5	27,04	253
0,55	40	35	0,4	14,56	271,5
		40	0,4	20,3	244
		45	0,4	29,47	233,5
0,6	45	35	0,4	11,62	282
		40	0,4	24,67	271
		45	0,4	28,85	254

Tabela 37. Resultado dos ensaios em argamassas para o filer F1 e aditivo SP-2

Relação a/c	% Finos	% Agregado Miúdo	% Aditivo	Escoamento (s)	Espalhamento (mm)
			SP-1		
0,5	35	35	0,6	7,31	284,5
		40	0,6	11,34	261,2
		45	0,6	25,45	257
0,55	40	35	0,5	12,53	276
		40	0,5	20,62	255,4
		45	0,55	21,23	247,8
0,6	45	35	0,5	8,28	288
		40	0,5	15,67	259
		45	0,5	19,55	248,4

Tabela 38. Resultado dos ensaios em argamassas para o filer F2 e aditivo SP-1

Relação a/c	% Finos	% Agregado Miúdo	% Aditivo	Escoamento (s)	Espalhamento (mm)
			SP-1		
0,5	35	35	0,45	11,15	293
		40	0,45	29,07	249,5
		45	0,5	33,01	215,6
0,55	40	35	0,4	18,93	266,5
		40	0,4	25,66	229
		45	0,4	28,27	219,4
0,6	45	35	0,4	13,95	265
		40	0,4	22,48	243
		45	0,4	29,61	225,4

Tabela 39. Resultado dos ensaios em argamassas para o filer F2 e aditivo SP-2

Relação a/c	% Finos	% Agregado Miúdo	% Aditivo	Escoamento (s)	Espalhamento (mm)
			SP-1		
0,5	35	35	0,6	9,55	277,2
		40	0,6	14,22	254,1
		45	0,6	22,51	234
0,55	40	35	0,5	10,12	266
		40	0,5	19,05	243
		45	0,55	22,88	223,2
0,6	45	35	0,5	9,32	278
		40	0,5	15,61	233,5
		45	0,5	20,82	221,2

A partir desses resultados observou-se que na maioria das misturas o teor de 40% de agregado miúdo em relação ao volume da argamassa, atendeu simultaneamente aos parâmetros de escoamento (superior a 10s) e espalhamento (entre 200 e 280 mm). Desta forma, este foi o teor adotado para a próxima fase. Estes estudos foram feitos para a areia britada. Da mesma forma, foram feitos ensaios para uma mistura de areia britada e areia rosa, obtendo-se o mesmo percentual.

Para o teor definido de areia de 40% foram moldados 3 corpos-de-prova para realização do ensaio de resistência à compressão. Os resultados estão apresentados na Tabela 40. Pode-se observar que todas as argamassas atingiram resistência superior a especificada (20 MPa). As argamassas com filer F1 e com a mistura de areia britada e areia rosa, apresentaram resistência superior às confeccionadas com filer F2 e apenas com areia britada. Provavelmente a maior finura do filer F1 e o melhor empacotamento da mistura, favoreceram o efeito filer, modificando positivamente a microestrutura da pasta.

Tabela 40. Resistência à compressão das argamassas

Relação a/c	% Finos	40% Agregado Miúdo	Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)	
			F1	F2
0,5	35	Areia Britada	42,28	40,76
		Areia Britada+Areia Rosa	46,78	44,89
0,55	40	Areia Britada	39,88	38,57
		Areia Britada+Areia Rosa	40,33	39,89
0,6	45	Areia Britada	33,54	31,27
		Areia Britada+Areia Rosa	35,34	34,55

A massa específica das argamassas variaram entre 2,17 e 2,25 kg/dm<sup>3</sup>, com valores ligeiramente superiores para as argamassas com filer F1. Comprovando o efeito filer provocado pelo resíduo F1.

### 13.9.4. Estudos em Concreto

Inicialmente foi determinado o teor de agregado graúdo utilizando-se os ensaios de espalhamento (slump flow) e de fluidez (Funil V), avaliando-se o teor de agregado graúdo que proporcionasse melhores resultados. Foram testados percentuais de acréscimo de 25, 27, 29 e 31% do volume de argamassa. Além disso, os concretos foram avaliados visualmente em termos de uniformidade e estabilidade da mistura. Desta forma o teor de 27% mostrou-se viável.

Definido o teor de agregado, foi realizado o ajuste do teor de aditivo, realizando-se os ensaios de espalhamento, Funil V e Caixa L, obtendo-se os valores da Tabela 41. Pode-se observar que todos os traços atenderam aos valores especificados.

Tabela 41. Ensaio de auto-compactibilidade dos concretos

Relação a/c	% Finos	% Aditivo SP-1	F1			F2		
			Espalhamento (mm)	Tempo de Escoamento (s)	H <sub>2</sub> /H <sub>1</sub>	Espalhamento (mm)	Tempo de Escoamento (s)	H <sub>2</sub> /H <sub>1</sub>
0,5	35	0,55	654,4	5,46	0,89	640,3	7,22	0,91
0,55	40	0,4	665,3	4,67	0,97	628	9,08	0,99
0,6	45	0,4	662	4,12	0,92	632	10,2	0,98

Para avaliar a possibilidade de segregação foi realizado para todos os traços o ensaio do Tubo U. Todos os concretos avaliados atenderam às especificações.

A massa específica dos concretos foi determinada e comparada aos valores encontrados para as argamassas, no entanto, não se verificou diferenças significativas entre os resultados.

Com relação à resistência à compressão e ao módulo de elasticidade dos concretos (Tabela 42), todos os concretos apresentaram resistência superior a 20 MPa. Para o filer F1 esta resistência foi atingida logo aos sete dias de idade. Para o filer F2, observou-se um ganho de resistência mais lento. No entanto, a evolução da resistência no tempo se dá de forma semelhante.

Tabela 42. Propriedades mecânicas dos concretos

Relação a/c	% Finos	F1			F2		
		fc 7 dias (MPa)	fc 28 dias (MPa)	Ec (GPa)	fc 7 dias (MPa)	fc 28 dias (MPa)	Ec (GPa)
0,5	35	35,43	42,89	28,67	23,56	29,44	28,13
0,55	40	30,55	37,03	26,54	20,31	24,88	22,77
0,6	45	26,77	32,33	25,12	19,39	22,97	23,22

### 13.9.5. Simulação Numérica das Estacas

Para a realização das simulações os parâmetros do solo foram obtidos a partir dos ensaios de campo e de laboratório. Os resultados dos ensaios de campo com CPT e SPT estão apresentados nas Figuras 82 e 83.

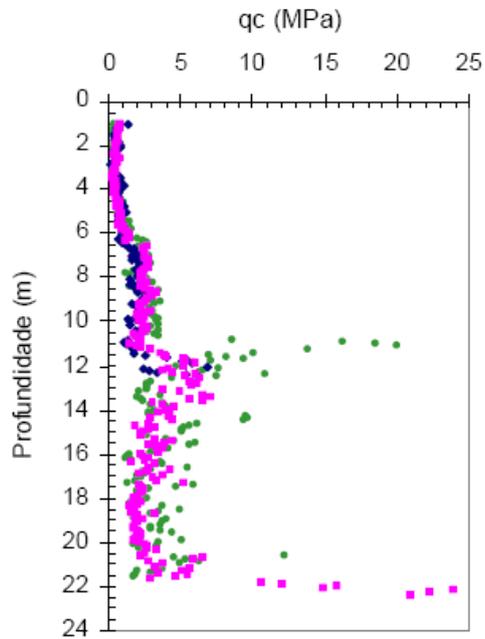


Figura 82. Resultados do ensaio do CPT

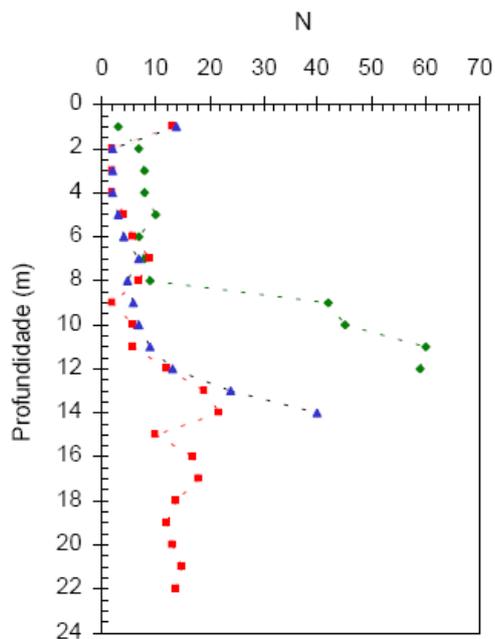


Figura 83. Resultados do ensaio do SPT

Para a análise foi considerado o perfil estratigráfico característico do campo experimental, conforme camadas estabelecidas na figura 84. As fundações foram posicionadas no solo a partir da escavação de 0,5 m de profundidade por 0,9 m de largura ao nível do terreno.

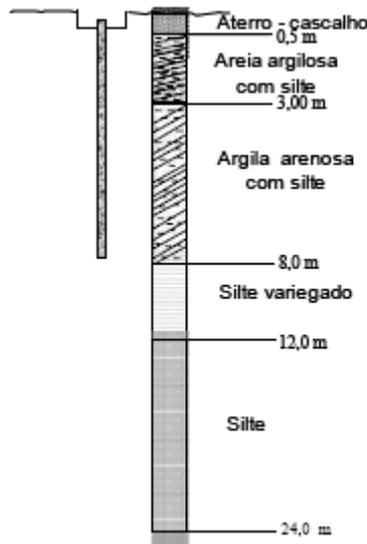


Figura 84. Perfil do solo utilizado para simulação numérica das estacas

A malha bidimensional do campo experimental foi composta por 1062 elementos triangulares de 6 nós, 2227 nós e 3186 pontos de Gauss. As condições de contorno se mantiveram constantes em todas as estacas simuladas no programa. Os deslocamentos horizontais nas laterais da malha foram restritos, enquanto que na base da malha (limite inferior) restringiu-se a deslocamentos verticais.

A interface solo-fundação foi considerada neutra (opção “Neutral”) e sua resistência rígida.

Na análise numérica foi possível representar com fidelidade as condições geométricas das fundações. Para simulação destas utilizou-se parâmetros característicos de um concreto convencional e do concreto auto-adensável, conforme Tabela 43, sendo  $E$  o módulo estrutural tangente inicial, referente a pequenas deformações, determinado em laboratório e similar ao módulo determinado na prova de carga, através de strain gages instalados no topo da estaca.

Tabela 43. Parâmetros de projeto adotados no PLAXIS

Parâmetro	Unidade	Valor Adotado
Comprimento da fundação	m	7,00
Diâmetro do fuste	m	0,30
Diâmetro da base	m	0,30
Resistência à Compressão Concreto Convencional	MPa	28,00
Módulo de Elasticidade Concreto Convencional	GPa	15,00
Resistência à Compressão Concreto Auto-adensável	MPa	32,33
Módulo de Elasticidade Concreto Auto-adensável	GPa	25,12
Coefficiente lateral ( $k_0$ )	-	0,25

A simulação das provas de carga foi realizada obedecendo as seguintes etapas:

- Entrada de dados no subprograma “Input”;
- Geração automática da malha;
- Geração das tensões iniciais a partir de  $k_0$ ;
- Entrada dos estágios de carga (no carregamento) equivalentes aos adotados nas provas de carga (rotina do subprograma “Calculation”);
- Retroanálise das provas de carga através de análise paramétrica utilizando os modelos constitutivos elástico linear e Mohr-Coulomb para representar o solo (por tentativa);
- Obtenção da curva carga-deslocamento no topo da fundação utilizando o subprograma “Curves”.
- Conclusão do ajuste da curva carga-deslocamento, visualizando-se os resultados de cálculo de elementos finitos com o subprograma “Output”.

Inicialmente para obtenção do módulo de Young (E) dos solos a partir de dados experimentais, determinou-se de forma interativa a retroanálise das provas de carga através de ajuste do trecho retilíneo, fase elástica, da curva carga-deslocamento, utilizando-se o modelo elástico linear para representar o solo.

Num segundo momento foi feito o ajuste do trecho não linear, fase elasto-plástica, utilizando-se o modelo Mohr-Coulomb para representar o solo de Brasília. Nesta etapa foram ajustados os parâmetros de resistência ( $c$  e  $\phi$ ) que melhor representam o solo da fundação ensaiada. Em seguida, obteve-se a interpretação de tensões e transferências de carga das fundações. Apresentam-se, a seguir, as curvas carga-deslocamento obtidas (Figura 85).

A previsão dos resultados a partir da retroanálise numérica dos ensaios mostra, em geral, a adequabilidade do uso deste método numérico para o solo em questão. Observaram-se ainda menores recalques para as estacas de concreto auto-adensável, uma vez que os valores do módulo para este concreto apresentaram valores ligeiramente superiores ao do concreto convencional.

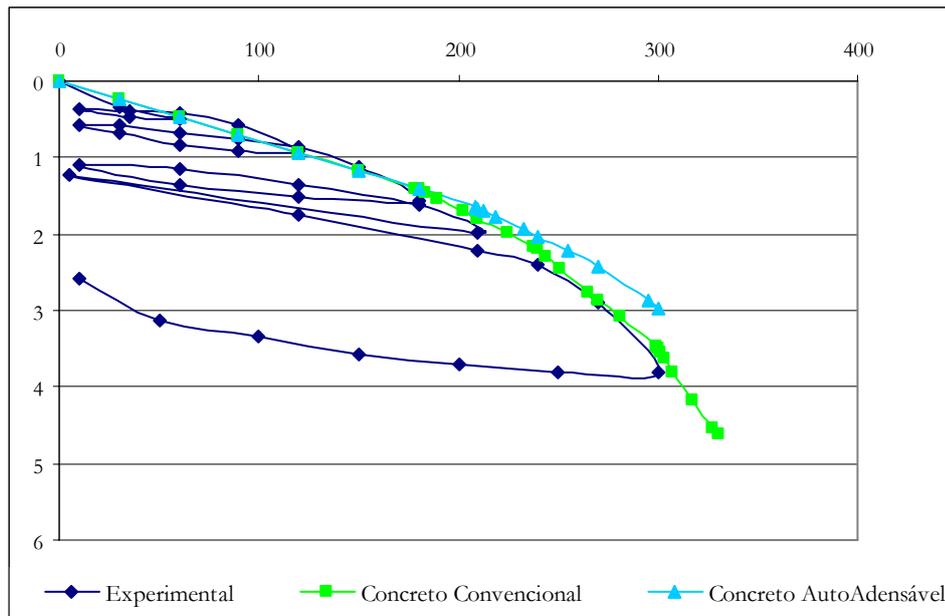


Figura 85. Perfil do solo utilizado para simulação numérica das estacas

## 14. PRINCIPAIS CONCLUSÕES

Este projeto de pesquisa teve como objetivo principal atuar junto ao setor de mineração (pedreiras) situadas no entorno do município de Goiânia, estado de Goiás, mapeando jazidas, definindo suas potencialidades e propondo sugestões para melhor aproveitamento dos recursos minerais. Adicionalmente, contribuir para o estabelecimento de tecnologias e procedimentos de laboratório para reutilização e redução dos resíduos gerados, avaliando a viabilidade técnica de sua utilização em pavimentação e concreto auto-adensável para fundações. O grande volume de rejeitos gerados nas pedreiras do estado de Goiás tem motivado a busca de utilização deste material como elemento alternativo em obras civis. Neste sentido esta pesquisa propôs a realização de investigações de campo e laboratório para avaliar o comportamento geotécnico de composições que visem o aproveitamento desses resíduos em obras de pavimentação e concretos para fundação. Assim, após a finalização das análises abordadas no desenvolvimento deste trabalho pode-se destacar algumas das principais conclusões a respeito do comportamento destes materiais.

### 14.1. Quanto ao mapeamento, cadastramento e caracterização das pedreiras

- O uso dos sistemas de informações geográficas SIG como ferramenta no gerenciamento de dados, deu bons resultados, com consideráveis ganhos de eficiência, qualidade e velocidade.

- O emprego de produtos de sensoriamento remoto foi indispensável na identificação das feições dos solos expostos que é fundamental na localização de pedreiras na fase de lavra.
- A criação de cartas temáticas e a distribuição das pedreiras permitiu identificar que o município de Aparecida de Goiânia apresenta o maior número pedreiras.
- Os agregados produzidos pelas pedreiras apresentaram características dentro dos limites previstos em norma.

#### **14.2. Quanto à aplicação em pavimentação**

- O comportamento do CBR e da expansão demonstrou que a inclusão do rejeito aos solos naturais não prejudicou o seu comportamento mecânico, chegando em alguns casos, a aumentar o valor destes índices, desde que respeitadas as devidas proporções de adição.
- Em relação aos resultados de campo obtidos nas pistas experimentais, verificou que tanto as deformações, verificadas através das bacias de deflexões médias, como o coeficiente de rigidez ( $\kappa$ ) da camada e o módulo de elasticidade do material (E) não sofreram grandes alterações com a inclusão do rejeito ao solo da camada de subleito e de base.
- Os rejeitos finos de pedreira apresentam potencial técnico para a estabilização dos solos tropicais regionais analisados neste trabalho, podendo apresentar vantagens econômicas na sua utilização para produção de estruturas de pavimentos urbanos de tráfego leve.

#### **14.3. Quanto à aplicação em Concreto Auto-adensável**

- Os resíduos finos de pedreira como adições minerais em concreto auto-adensável melhoram a estabilidade da mistura, atuando na microestrutura do concreto e melhorando suas propriedades mecânicas.
- Os teores de resíduos para a dosagem do concreto auto-adensável variam em função da relação água/cimento, sendo maior com o aumento do teor de água na mistura.
- O teor de aditivo determinado nas pastas necessitou apenas de pequenos ajustes para a fase do concreto.
- A simulação numérica variando o concreto das estacas em auto-adensável e convencional não apresentaram diferenças significativas.

Em conclusão pode ser aqui ressaltado que o Projeto foi desenvolvido com relativo sucesso, e com grande ganho de experiência a respeito das potencialidades dos resíduos de pedreira, em

particular nas condições relacionadas a problemas ambientais do município de Goiânia e entorno. No entanto, alerta-se que os resultados aqui apresentados são preliminares, necessitando ainda de ensaios complementares e de acompanhamento das aplicações por maiores períodos de tempo, de modo a garantir a viabilidade técnica, econômica e ambiental da utilização destes resíduos.

O sucesso aqui alcançado não foi fruto somente dos Coordenadores ou dos alunos e técnicos diretamente envolvidos, mas sim de um conjunto de pessoas, empresas e instituições, além é claro do apoio financeiro da Secretária de Geologia, Mineração e Transformação Mineral, que atuaram e apoiaram em diversas etapas do desenvolvimento deste trabalho.

## 15. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT (1986). Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização, Rio de Janeiro, RJ, 7 p.
- ABNT (1986 a). Solo – Determinação da massa específica aparente in situ com emprego do frasco de areia, NBR 7185, Rio de Janeiro, RJ, 7p.
- ALECRIM, A.U., & PESSA, T.G.F., (2005). Utilização de rejeitos de quartzito em bases e sub-bases de pavimentos flexíveis. 36ª Reunião Anual de Pavimentação, ABPv, Curitiba, PR, 1: 1 – 9.
- ANGELIM, R.R. (2000). Influência da adição de finos calcários, silicosos e argilosos no comportamento das argamassas de revestimento. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, UFGO Goiânia, GO, 145p.
- ASTM (1992). Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction) using filter paper, D5298, Philadelphia, E.U.A, 6p.
- BATALIONE GIOVANE, (2007). Estabilização de solos tropicais com a utilização de rejeitos finos de pedra de uma rocha granítica, 172p.
- CONDÉ, J.C.P., (2006). Utilização dos rejeitos de ardósia para confecção de concreto betuminoso usinado a quente. 37ª Reunião Anual de Pavimentação, RAPv, Goiânia, GO, 1: 1 – 9.
- DNER (1979). PRO 011. Avaliação Estrutural de Pavimentos Flexíveis, DNIT / DNER, Rio de Janeiro, RJ, 16p.
- DNER (1994 a). ES -300. Pavimentação – Reforço de Subleito. DNIT / DNER, Rio de Janeiro, RJ, 6p.
- DNER (1994 b). ME – 024 Pavimento. Determinação das deflexões pela viga Benkelman. DNIT / DNER, Rio de Janeiro, RJ, 06p.
- DNER (1994 c). ME – 131. Determinação do módulo de resiliência. DNIT/DNER, Rio de Janeiro, RJ, 8p.

- DNER (1994 d). ME – 228. Solos compactados em equipamento miniatura. DNIT/DNER, Rio de Janeiro, RJ, 14p.
- DNER (1994 e). ME – 256. Determinação da perda de massa por imersão. DNIT/DNER, Rio de Janeiro, RJ, 6p.
- DNER (1994 f). ME – 258. Solos compactados em equipamento miniatura, MINI – MCV. DNIT/DNER, Rio de Janeiro, RJ, 6p.
- DNER (1997 a) ES - 301. Pavimentação – Sub-base estabilizada granulometricamente. DNIT / DNER, Rio de Janeiro, RJ, 7p.
- DNER (1997 b). ME – 254. Solos compactados em equipamento miniatura, MINI – CBR e expansão. DNER, Rio de Janeiro, RJ, 14p.
- DNIT (2006). Publicação IPR – 719, Manual de Pavimentação, Rio de Janeiro, RJ, 294p.
- DNPM, (2006). Departamento Nacional de Produção Mineral - Anuário Mineral Brasileiro.
- ESPOSITO, T.J.(2000). Metodologia probabilística e observacional aplicada a barragens de rejeitos construídas por aterro hidráulico. Tese de Doutorado, publicação G.TD – 004A/00, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF – 363p.
- MENDES, K.S., (1999). Viabilidade de Emprego de Finos de Basalto em Concreto Compactado a Rolo. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 109p.
- Metha, P. K., Monteiro, P. J. M. (1994). Concreto: Estruturas, Propriedades e Materiais. PINI, São Paulo, SP, 573 p.
- NICHOLSON D.T. (1996). The visual impact of quarrying. Rock Products Magazine, III: 68-76.
- RIBEIRO, L.F.M. (2000). Simulação Física do Processo de Formação dos Aterros Hidráulicos Aplicados a Barragens de Rejeito. Tese de Doutorado, publicação GDM-005 A/00, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 235p.
- SÁ, J.A.G., (2004). Análise de Valor e Evolução de Ciclo de Vida: Base para um Modelo de Apoio a Decisão para Aproveitar Rejeitos de Pedreira. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 146p.

## **ANEXOS**

**ANEXO I**

**FICHA DE CADASTRO**



**FICHA DE CADASTRO**

**Código  
N°**

**1. INFORMAÇÃO DA EMPRESA**

Nome do titular/dono \_\_\_\_\_  
 Endereço \_\_\_\_\_  
 Data início da atividade \_\_\_\_\_

**2. INFORMAÇÃO DA PEDREIRA**

**2.1 IDENTIFICAÇÃO DA PEDREIRA**

COORDENADAS TOPOGRÁFICAS DA LAVRA PRINCIPAL				
LONGITUDE	LATITUDE	ELEVAÇÃO	ZONA	DATUM

**2.2 PRODUÇÃO E RESERVAS**

JAZIDAS NÃO METALICO (MARQUE CON X)	PRODUÇÃO t/ano
AREIA (de brita)	
BRITA	
CASCALHO	
OUTROS	

DETALHE	RESERVAS (TN)	OBSERVAÇÕES
MEDIDA		
INDICADA		
INFERIDA		
LAVRÁVEL		

Vida útil (anos) \_\_\_\_\_

**2.3 MÉTODOS DE LAVRA A CÉU ABERTO** \_\_\_\_\_

**2.4 EXPLORAÇÃO, MOVIMENTO DE TERRAS, ATIVIDADES**

**2.5 EXPLORAÇÕES**

ATIVIDADES	Unidades	PROGRAMADO	EXECUTADO	PROGRAMADO ANO SEGUINTE
PROGRAMA AMOSTRAGEM	N° amostras			
PERF. DIAMANTINA	m			
TRINCHEIRAS	m			
MAPEAMENTO SUPERFICIAL	HA / ESCALA			
OUTROS				

**3. OUTROS**

ATIVIDADES	
USO DO MATERIAL QUE PRODUZ	
DESTINO DO MATERIAL (EX: GO, DF, ETC)	
REJEITO QUE PRODUZ (TIPO E QUANTIDADE m3/)	
DISPOSIÇÃO DO REJEITO (LOCAL)	
LICENCIAMENTO AMBIENTAL (SE POSSUI)	
OUTROS	

DATA \_\_\_\_/\_\_\_\_/ 2007

**ANEXO II**

**RELATÓRIOS DE SONDAGENS**