



UNILASALLE
CENTRO UNIVERSITÁRIO LA SALLE



VALERIO MIGUEL GRANDO

**ESTUDO DA CORRELAÇÃO ENTRE O CONSUMO DE EXPLOSIVOS E A
PRODUÇÃO DE AGREGADOS EM PEDREIRAS DE ROCHAS VULCÂNICAS NO
RIO GRANDE DO SUL**

CANOAS, 2014

VALERIO MIGUEL GRANDO

**ESTUDO DA CORRELAÇÃO ENTRE O CONSUMO DE EXPLOSIVOS E A
PRODUÇÃO DE AGREGADOS EM PEDREIRAS DE ROCHAS VULCÂNICAS NO
RIO GRANDE DO SUL**

Dissertação de mestrado apresentada para a banca examinadora do Programa de Pós-Graduação em Avaliação de Impactos Ambientais do Centro Universitário La Salle - UNILASALLE, como exigência para a obtenção do título de Mestre em Avaliação de Impactos Ambientais.

Orientação: Prof. Dr. Silvio Roberto Taffarel

Co-orientação: Prof. Dr. Rubens Muller Kautzmann

CANOAS, 2014

VALERIO MIGUEL GRANDO

**ESTUDO DA CORRELAÇÃO ENTRE O CONSUMO DE EXPLOSIVOS E A
PRODUÇÃO DE AGREGADOS EM PEDREIRAS DE ROCHAS VULCÂNICAS NO
RIO GRANDE DO SUL**

Dissertação de mestrado apresentada para a banca examinadora do Programa de Pós-Graduação em Avaliação de Impactos Ambientais do Centro Universitário La Salle - UNILASALLE, como exigência para a obtenção do título de Mestre em Avaliação de Impactos Ambientais.

Aprovado pela banca examinadora em 19 de novembro de 2014.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Silvio Roberto Taffarel
Orientador - UNILASALLE

Coorientador - UNILASALLE
Prof. Dr. Rubens Muller Kautzmann

Prof. Dr. Leandro Fagundes
UFPel

Prof. Dr. Sydney Sabedot
UNILASALLE

Prof. Dr. Carlos Otávio Petter
UFRGS

RESUMO

A Compensação Financeira pela Exploração de Recursos Minerais (CFEM) é uma contraprestação sobre a utilização ou comercialização de recursos minerais. O fator gerador da CFEM é calculado sobre o valor de faturamento resultante da venda do produto mineral; ou o custo, quando utilizado na forma de insumo em cadeia produtiva. Cabe ao Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) a competência para fiscalizar sua arrecadação. Este trabalho está direcionado ao controle e fiscalização da produção de agregados para a construção civil (brita), no estado do Rio Grande do Sul. O objetivo é estudar um possível indicador que permita ao fiscal correlacioná-lo ao nível de produção real, ou seja, quantificar o volume lavrado, usando como parâmetro o consumo de explosivos utilizados no desmonte da rocha. As atividades de pesquisa foram desenvolvidas parcialmente como tarefa vinculada às atividades da Divisão de Arrecadação do DNPM/RS, na forma de vistorias de fiscalização e coleta de dados. O estudo abrange quatro empresas produtoras de agregados, sendo três de basalto e uma de granito. A metodologia de pesquisa envolveu atividades de coletas de dados e informações das empresas com posterior tratamento estatístico, correlacionando os dados quantitativos de produção e consumo de explosivos. Os dados dos planos de fogo foram tabulados em planilhas Excel, sendo analisadas as correlações diretas entre os dados de consumo de explosivo (kg) e a massa de rocha desmontada (ton). Os resultados mostram que as quatro pedreiras se diferenciam com relação à razão de carga média, uma vez que a pedreira D trabalha com granito e as pedreiras A, B e C trabalham com basalto. A análise de variância (ANOVA) mostrou que existe diferença significativa entre as pedreiras. No entanto, o teste de TUKEY mostrou que na comparação entre as pedreiras A e C a hipótese de igualdade não é rejeitada. No período de um ano, a Pedreira "A" desmontou 45.555 toneladas, razão de carga (RC) de 0,48 kg/m³ e R² = 0,88. A pedreira "B" desmontou 87.803 toneladas, com RC de 0,57 kg/m³ e R² = 0,85. A pedreira "C" desmontou 52.496 toneladas, com RC de 0,50 kg/m³ e R² = 0,78. A título de comparação, foi incluída a pedreira "D" cuja substância minerada é o Granito, que desmontou 356.391 toneladas, com RC de 0,60 kg/m³ e R² = 0,93. Pelas correlações apresentadas, os dados de todas as pedreiras tiveram um forte ajuste ao Modelo de Regressão Linear, mostrando que a variabilidade da variável resposta (massa de basalto/granito) está diretamente relacionada com a variabilidade da massa de explosivo (variável independente). Com base nos estudos realizados foi possível encontrar um modelo que sirva como parâmetro inicial a ser utilizado para correlacionar a produção de agregados com base no consumo de explosivos nas pedreiras estudadas, que poderá ser utilizado como ferramenta para auxiliar na fiscalização da arrecadação de CFEM.

ABSTRACT

The Financial Compensation for Exploration of Mineral Resources (CFEM) is a consideration on the use or sale of mineral resources. The CFEM generator factor is calculated on the resulting billing amount from the sale of the mineral product; or the cost when used as input in the production chain. It is for the National Department of Mineral Production (DNPM) the jurisdiction to review its collection. This work is directed to the control and supervision of the aggregates production for the construction industry (gravel) in the state of Rio Grande do Sul. The aim is to study a possible indicator that allows the tax correlate it to the level of actual production, ie, quantify the carved volume, using as a parameter the explosives consumption used in rock blasting. The research activities were developed partly as a task linked to the activities of the Collection Division of the DNPM/RS, in the form of surveillance and data collection surveys. The study covers four producers of aggregates companies, three of basalt and one of granite. The research methodology involved data collection activities and information of companies with subsequent statistical analysis, correlating data of production and consumption of explosives. Data from fire plans were tabulated in Excel spreadsheets, and analyzed the direct correlations between the data of explosive consumption (kg) and the mass of collapsed rock (ton). The results show that four grooves are different in relation to the ratio of the load average, once the groove D work with granite and the grooves A, B and C work with basalt. The analysis of variance (ANOVA) showed a significant difference between the grooves. However, the TUKEY Test showed that the comparison between the grooves A and C the null hypothesis of equality is not rejected. Within a year, the groove "A" dismantled 45,555 tonnes with loading ratio (RC) of 0.48 kg/m³ and R² = 0.88. The groove "B" dismantled 87,803 tons, RC 0.57 kg / m³ and R² = 0.85. The groove "C" dismantled 52,496 tons, RC 0.50 kg / m³ and R² = 0.78. By comparison, has included the groove "D" whose substance is mined granite, which dismantled 356,391 tons, RC 0.60 kg / m³ and R² = 0.93. For these correlations, the data from all the grooves had a strong adjustment to Linear Regression Model, showing that the variability of the response variable (basalt/granite mass) is directly related of the variability of explosive mass (independent variable). Based on studies, it was possible to find a model that serves as initial parameter to be used to correlate the aggregates production based on explosives consumption in grooves studied, which can be used as a tool to assist in monitoring the CFEM collection.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mercado de agregados artificiais: segmentos e participação no mercado brasileiro de 2011	15
Figura 2 – Evolução da produção de agregados 2007 a 2022 (milhões de toneladas).....	16
Figura 3 – Preço da brita nº 1 (R\$/m ³) pedra/fornecedor, sem frete,.....	17
Figura 4 – Evolução da Arrecadação da Compensação Financeira pela Exploração de Recursos Minerais – CFEM, no Brasil*	19
Figura 5 – Evolução da Arrecadação da Compensação Financeira pela Exploração de Recursos Minerais – CFEM, no Rio Grande do Sul*	19
Figura 6 – Esquema de uma Plano de fogo	26
Figura 7 – Croqui mostrando o efeito de geração de repé devido a planos de fraquezas sub horizontais	32
Figura 8 – Croqui mostrando o efeito dna fragmentação excessiva devido a planos de descontinuidades horizontais, bastante pequeno e de maciço altamente fraturado .	33
Figura 9 – Croqui mostrando o efeito de descontinuidades inclinadas e ortogonais à face, causando má fragmentação pelo escorregamento de blocos	33
Figura 10 – Etapas do processo produtivo de uma pedra para Brita	35
Figura 11 – Modelo de Regressão Linear (MRL)	37
Figura 12 – Vista da frente de avanço de lavra da Pedreira “A”	60
Figura 13 – Vista em detalhe do maciço da Pedreira “A” (rocha vulcânica).....	61
Figura 14 – A Pedreira “B” (vista geral da pedra).....	61
Figura 15 – Detalhe do sistema de fraturas da pedra B	62
Figura 16 – Pedreira “C” (a)	63
Figura 17 – Pedreira “C” (b)	63
Figura 18 – Pedreira “D”	64
Figura 19 – Vista geral da pedra “D”	64
Figura 20 – Gráfico Box-Plot das Pedreiras A, B, C e D.	68
Figura 21 – Gráfico de Intervalo de confiança para a Média das Razões de Carga das pedreiras A, B, C e D.....	70
Figura 22 – Gráfico de Efeitos para as pedreiras A, B e C.....	71
Figura 23 – Papel de Probabilidade do Teste Anderson-Darling para as pedreiras A, B e C.	72
Figura 24 – Histograma de Resíduos versus frequências para as pedreiras A, B e C.....	72
Figura 25 – Gráfico de Resíduos versus Valores Ajustados para as pedreiras A, B e C.....	73
Figura 26 – Gráfico de Resíduos versus Ordem de Coleta para as pedreiras A, B e C.....	74
Figura 27 – Intervalos de Confiança para as médias das razões de carga das pedreiras A, B e C.....	75
Figura 28 – Gráfico de dispersão dos dados da Pedreira A e o MRL ajustado.	78

Figura 29 – Gráfico Qui-Quadrado (QQ-plot) dos resíduos no MRL da pedraira A...	79
Figura 30 – Box-plot dos pontos de alavanca (Leverage) para a pedraira A.	82
Figura 31 – Gráfico dos pontos de alavanca (leverage h_{ii}) versus nº da observação para a pedraira A.....	82
Figura 32 – Gráfico dos resíduos padronizados versus valores ajustados para a pedraira A.....	83
Figura 33 – Gráfico dos resíduos studentizados versus valores ajustados para a pedraira A.....	83
Figura 34 – Gráfico DFFITS versus valores ajustados para a pedraira A.	84
Figura 35 – Gráfico D-COOK versus observações para a pedraira A.	84
Figura 36 – Gráfico dos resíduos studentizados versus valores ajustados para a pedraira A.....	85
Figura 37 – Gráfico de dispersão dos dados da pedraira A e o MRL reajustado.	86
Figura 38 – Gráfico de dispersão dos dados da Pedreira B e o MRL ajustado.	88
Figura 39 – Gráfico de dispersão dos dados da Pedreira B e o MRL reajustado.....	88
Figura 40 – Gráfico de dispersão dos dados da Pedreira C e o MRL ajustado.....	90
Figura 41 – Gráfico de dispersão dos dados da Pedreira C e o MRL reajustado.....	91
Figura 42 – Gráfico de dispersão dos dados da Pedreira D e o MRL ajustado.....	93
Figura 43 – Gráfico de dispersão dos dados da Pedreira D e o MRL reajustado.....	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Agregados artificiais e produtos de pedreiras	14
Tabela 2 – Consumo de agregado por tipo de obra	17
Tabela 3 – Análise da variância da regressão (ANOVA).....	40
Tabela 4 – Medidas para o cálculo da estatística de Shapiro-Wilk	45
Tabela 5 – Valores críticos do teste de Durbin-Watson.	50
Tabela 6 – Densidades da rocha das pedreiras estudadas	56
Tabela 7 – Configuração das bancadas das frentes de lavra das pedreiras estudadas.....	59
Tabela 8 – Variáveis extraídas dos planos de fogo utilizadas no estudo, acrescida da observação do grau de fraturamento, observado em campo	66
Tabela 9 – Intervalo de confiança para a Média das Razões de Carga das pedreiras A, B, C e D.	69
Tabela 10 – Resultados da ANOVA para as pedreiras A, B e C.....	71
Tabela 11 – Intervalo de confiança dos Efeitos para as pedreiras A, B e C.....	71
Tabela 12 – Resultados da ANOVA do teste de Tukey para as pedreiras A, B e C..	74
Tabela 13 – Intervalo de confiança para a diferença das médias das Razões de Carga para as pedreiras A, B e C.	75
Tabela 14 – Tabela ANOVA para o MRL da Pedreira A.	76
Tabela 15 – Tabela de Coeficientes para o MRL da Pedreira A.	77
Tabela 16 – Tabela de Coeficientes de Determinação para o MRL da Pedreira A. ..	77
Tabela 17 – Tabela de Intervalos de Confiança para os Coeficientes do MRL da Pedreira A.	77
Tabela 18 – Teste de normalidade dos resíduos para o MRL dos dados da pedreira A.....	78
Tabela 19 – Teste de independência dos resíduos.....	80
Tabela 20 – Teste de homocedasticidade pela estatística de Breusch-Pagan.	81
Tabela 21 – Teste de homocedasticidade pela estatística de Goldfeld-Quandt.....	81
Tabela 22 - Teste de outliers para a pedreira A.	83
Tabela 23 – Tabela de Coeficientes para o MRL da Pedreira B.	87
Tabela 24 – Tabela de Coeficientes de Determinação para o MRL da Pedreira B. ..	87
Tabela 25 – Tabela de Coeficientes para o MRL da Pedreira C.	89
Tabela 26 – Tabela de Coeficientes de Determinação para o MRL da Pedreira C. ...	90
Tabela 27 – Tabela de Coeficientes para o MRL da Pedreira D.	92
Tabela 28 – Tabela de Coeficientes de Determinação para o MRL da Pedreira D. ...	92

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	REFERENCIAL TEÓRICO	13
2.1	Agregados	13
2.1.1	Produção Agregados	15
2.1.2	Gestão da produção de agregados no Brasil	18
2.2	Desmonte com explosivos	20
2.2.1	Explosivos	20
2.2.2	Plano de fogo	25
2.2.3	Ação dos explosivos	27
2.3	Características da rocha em pedreiras	28
2.3.1	Resistência da Rocha	29
2.3.2	Propriedades Elásticas (Mecânicas)	30
2.3.3	Propriedades de absorção	30
2.3.4	Descontinuidades estruturais	31
2.4	Lavra e Beneficiamento em pedreiras	34
2.5	Modelos de Regressões	35
2.6	Análise de Regressão Linear	36
2.6.1	Suposições para o modelo	37
2.6.2	Teste de hipóteses e Intervalo de confiança	38
2.6.3	Coeficiente de determinação	40
2.6.4	Análise dos Resíduos	41
3	METODOLOGIA	54
3.1	Levantamento de dados	54
3.1.1	Ambiente Geológico	54
3.1.2	Plano de Fogo – Método de Lavra	55
3.1.3	Produção de agregados	56
3.2	Tratamento dos dados	57
3.3	Estudo de correlação	57
4	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	59
4.1	Condições geológicas das pedreiras	59
4.2	Planos de Fogo	65
4.3	Tratamento dos Dados	68
4.3.1	ANOVA	70
4.3.2	Teste TUKEY	74
4.4	Correlação do consumo de explosivo e produção das pedreiras	76

4.4.1	Modelo de Regressão Linear para a Pedreira A	76
4.4.2	Modelo de Regressão Linear para a Pedreira B	86
4.4.3	Modelo de Regressão Linear para a Pedreira C	89
4.4.4	Modelo de Regressão Linear para a Pedreira D	91
5	CONCLUSÕES	95
6	TRABALHOS FUTUROS	97
7	REFERÊNCIAS	98
8	APÊNDICE A	102

1 INTRODUÇÃO

Os agregados, tais como a areia e a brita, são vitais e estratégicos para o desenvolvimento de uma região ou país. São os principais insumos para construção de infraestruturas de transporte, energia, indústria e urbanização.

O valor do setor de produção de agregados para a sociedade pode ser medido pelo volume de sua produção. A cada ano, mais de vinte bilhões de toneladas de agregados são produzidas no mundo; este valor é cinco vezes superior à produção de outros minerais não combustíveis (FANTIN, 2011).

No Brasil, devido à disponibilidade de recursos e reservas de rochas para a produção comercial de agregados, as unidades produtoras tendem a se localizar o mais próximo ao mercado, que são as regiões e áreas metropolitanas (CALAES et al., 2007). Este tipo de indústria se diferencia dos demais, pois há uma grande dispersão das empresas produtoras que atendem a uma vasta gama de consumidores, e em muitos casos a relação comercial se dá de maneira informal.

Cabe ao Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), a competência para outorgar e fiscalizar esta atividade de mineração, onde se inclui a fiscalização sobre a arrecadação da Compensação Financeira pela Exploração de Recursos Minerais (CFEM).

A CFEM é uma contraprestação à utilização ou comercialização de recursos minerais, amparada na Constituição Federal. Este *royalty*, para a lavra de agregados, corresponde a 2% do faturamento líquido da empresa de mineração, cuja maior parcela (65%) é destinada ao município que abrigam em seus territórios atividades de lavra. Para estes municípios a CFEM é um item de arrecadação, creditado um mês após a efetivação da comercialização do bem mineral, depositado diretamente na conta única da prefeitura, e que não implica em qualquer gasto administrativo.

A fiscalização do recolhimento deste *royalty* é feita através de informações prestadas pela própria empresa ao DNPM, as quais apresentam dificuldade para serem aferidas, através de fiscalizações aos empreendimentos ou por processos demorados de auditoria fiscal e de produção.

A motivação da presente pesquisa é estudar a possibilidade de utilizar o parâmetro consumo de explosivo, vinculado à produção de agregados industriais

(brita), com a finalidade de aferir a correção das informações prestadas sobre o montante da produção e conseqüente recolhimento da CFEM.

A escolha da informação do consumo de explosivo se justifica por ser um dos insumos da produção de brita que recebem um rígido controle por parte do Ministério da Defesa, através do Exército. A garantia da qualidade da informação de consumo de explosivo se dá também pela prática usual, entre as mineradoras produtoras de brita, da contratação de serviço de terceiros para fornecer o material explosivo e executar o carregamento e operação de desmonte. Este procedimento é acompanhado de relatórios técnicos, do plano de fogo executado, o que torna a informação de consumo de explosivos confiável, permitindo utilizá-la como parâmetro de controle.

O estudo tem como objetivo geral correlacionar o consumo de explosivos em operações de lavra para a produção de agregados.

Como objetivos específicos à pesquisa têm:

1. Levantamento de informações em pedreiras de produção de brita referente ao consumo de explosivo previsto e executado, através dos respectivos planos de fogo, produção de rocha desmontada e de brita e a avaliação das condições de geológicas e estruturais da frente de lavra.
2. Tabulação das informações quantitativas extraídas dos planos de fogo e informações do RAL.
3. Analisar os dados através de testes estatísticos básicos, estatística inferencial e análise de variâncias (ANOVA).
4. Avaliar a correlação existente entre os parâmetros de consumo de explosivo, operacionais do plano de fogo e de produção.

A atividade de gestão pública das atividades de mineração necessita utilizar procedimentos expeditos que permitam, de forma mais ágil e menor custo, abranger o maior número de empresas a partir de informações que dispõe ou possui acesso. A partir da análise e do confronto das informações de produção e consumo de explosivos espera-se ser possível indicar se as mesmas são consistentes ou válidas. Este procedimento de fiscalização documental permitirá ao DNPM planejar ações de fiscalização em campo mais efetivas e eficazes sobre empresas com indício de má informação e com sonegação de CFEM.

É necessário racionalizar métodos operacionais, de planejamento e gestão, objetivando desenvolver processos de produção e aperfeiçoar os produtos, de forma

a atenuar os impactos negativos associados à atividade produtiva (CAVALCANTI; RIBEIRO, 2011). A experiência na atividade de fiscalização do setor mineral mostra que: as empresas com boa gestão financeira, corretas no recolhimento de impostos e taxas são também aquelas que melhor realizam a gestão ambiental da sua atividade.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A humanidade ao longo da História sempre necessitou das substâncias minerais como fontes de matéria prima para a sua sobrevivência e desenvolvimento.

Dependemos de cerca de 350 diferentes substâncias ou recursos minerais. O consumo humano de insumos minerais varia de 2.000 a 20.000 kg por habitante/ano (FANTIN, 2011).

Considerando um consumo médio de 10 ton./ano de bens minerais, para atender ao conforto e uso da tecnologia atual, cada ser humano necessita de: brita (4,2 ton.), areia e cascalho (3,9 ton.), cimento (363 kg), argila (222 kg), rocha fosfática (140 kg), ferro e aço (547 kg) e outros não metálicos (486 Kg). Os agregados minerais são os insumos mais produzidos e consumidos no mundo (81%), essenciais à civilização e ao desenvolvimento socioeconômico (CAVALCANTI; RIBEIRO, 2011).

2.1 Agregados

O Agregado é um material particulado sem forma definida, não coesa, de atividade química praticamente inerte. Não deve conter constituintes que reajam com o cimento, nem sofrer variações de volume com a umidade nem possuir incompatibilidade térmica entre seus grãos e a pasta endurecida. As partículas são constituídas de uma ou mais substância, cobrindo diversa gama de tamanho (MENDES, 2002). Muitas outras definições podem ser encontradas, em normas específicas para atividades de engenharia civil ou tipificando um bem mineral.

Quanto à origem, os agregados podem ser naturais, artificiais e industrializados (ALMEIDA; LUZ, 2009).

Os naturais, encontrados na natureza sob a forma definitiva de utilização, como a areia, os seixos rolados, cascalhos e os pedregulhos.

Os agregados artificiais são materiais encontrados em seu estado natural, rochoso. Para produzir necessitam passar por processos de beneficiamento a partir da fragmentação (britagem moagem) de vários tipos de rochas.

Quanto à dimensão de suas partículas, a Norma Brasileira define como Agregado Miúdo a areia de origem natural, a resultante do britamento de rochas estáveis, ou a mistura de ambas, cujos grãos passam pela peneira ABNT de 4,8 mm e retidos na 0,075 mm.

O Agregado Graúdo é o pedregulho natural, a pedra britada proveniente do britamento de rochas estáveis, ou a mistura de ambos, cujos grãos passam pela peneira ABNT 152 mm e retidos na 4,8 mm.

Para a produção de agregados, as rochas devem ter características de alta consistência, resistência mecânica e uniformidade da matriz mineral. Geram produtos como (ALMEIDA; LUZ, 2009):

Tabela 1 – Agregados artificiais e produtos de pedreiras

PRODUTOS DAS PEDREIRAS	
Rachão, Pedra da mão ou Pedra Marroada	Material obtido após o desmonte da rocha com explosivos, também denominado Rachão de Praça
Gabião ou Rachão de Gabião	Dimensões entre 100 mm e 150 mm
Brita Graduada	Mistura de tamanho zero (0) até o máximo especificado com controle de granulometria definido pelo consumidor
Brita 0 ou Pedrisco	Granulometria variando de 4,8 mm a 9,5 mm
Brita 1	Granulometria variando de 9,5 mm a 19 mm
Brita 2	Granulometria variando de 19 mm a 25 mm
Brita 3	Granulometria variando de 25 mm a 50 mm
Brita 4	Granulometria variando de 50 mm a 76 mm
Brita 5	Granulometria variando de 76 mm a 100 mm
Bica Corrida	Mistura de tamanhos com dimensões variando de zero (0) a 300 mm; sem exigência de composição granulométrica
Pó de Pedra	Fração de finos de britagem, dimensões variando de zero (0) a 5 mm, com alto teor de finos (máximo 20%) passantes na malha 200 (0,074 mm)
Areia de Brita	Pó de pedra sem partículas abaixo da malha 200 (0,074 mm), a retirada dos finos é por lavagem do pó

Fonte: Quaresma, Luís Felipe (2009).

A rocha é um material consolidado composto por um conjunto de minerais resultantes de um determinado processo geológico. Podem ser dispostos segundo as condições de temperatura e pressão existentes durante a sua formação (CALAES et al., 2007).

2.1.1 Produção Agregados

A produção mundial de agregados minerais é de aproximadamente 22,3 bilhões de toneladas anuais (FANTIN, 2011). Cada europeu requer durante toda a vida, mais de 500 toneladas de agregados, sendo o bem mineral mais consumido naquele continente (ALMEIDA; LUZ, 2009).

O Brasil responde por apenas 3% desta produção, com 268 milhões de toneladas produzidas e consumidas no ano de 2011 (LIMA; NEVES, 2012). A produção de agregado no Brasil é uma das mais importantes atividades extrativas do setor mineral brasileiro. O volume produzido é comparável ao volume de produção do minério de ferro, principal produto mineral brasileiro de exportação.

A produção de agregados está relacionada às construções de residências, obras de saneamento básico, pavimentação de rodovias, ferrovias, hidrovias, pontes, portos, aeroportos, viadutos, etc. (ALMEIDA; LUZ, 2009). A Figura 1 mostra os diversos segmentos de mercado para os agregados artificiais, por participação na demanda.

Figura 1 – Mercado de agregados artificiais: segmentos e participação no mercado brasileiro de 2011



Fonte: LIMA; NEVES, 2012.

Em 2010 a Associação Nacional das Entidades Produtoras de Agregados para Construção Civil – ANEPAC estimou a existência de cerca de 500 empresas produtoras de agregados que geram em torno de 20.000 empregos diretos. A

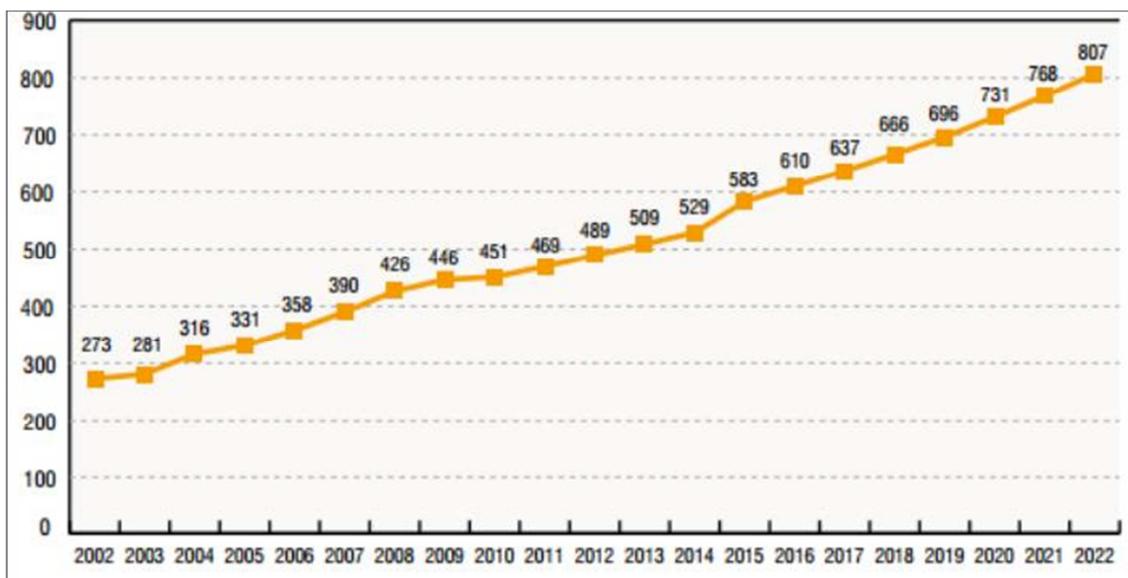
ANEPAC no ano de 2009 estimou que o consumo de agregados no Brasil fosse um pouco acima de 2 t/hab./ano (ANEPAC, 2013).

Quanto ao porte, 60% das empresas produzem menos de 200.000 toneladas/ano; 30% produzem entre 200.000 e 500.000 toneladas/ano e 10% produzem mais do que 500.000 toneladas/ano. Ainda segundo a ANEPAC (2013), os tipos de rochas utilizadas na produção de brita são a granito e gnaisse – 85%; calcário e dolomita – 10% e basalto/diabásio – 5%.

Os agregados pétreos são produtos de baixo valor unitário e alto custo no transporte, é necessário que a produção destes insumos seja realizada nas proximidades dos centros consumidores. Desta maneira evita-se que ocorra um aumento dos preços que serão repassados, prejudicando programas sociais como habitação, transporte, saneamento básico, etc. (SILVA, 2002).

A previsão de crescimento na produção de agregados no Brasil de 56% entre 2007 a 2016. A indústria de agregados foi um dos poucos setores que não sofreu com a crise internacional de 2008 (IBRAM, 2012).

Figura 2 – Evolução da produção de agregados 2007 a 2022 (milhões de toneladas)



Fonte: ANEPAC – 2012 (apud IBRAM, 2012, p. 17).

Conforme o Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM, 2012) o insumo básico às obras de construção civil, o agregado mineral (natural ou artificial) está no início da cadeia produtiva da construção civil. Segundo estudos realizados pelo SINDIPEDRAS (Sindicato da Indústria de Mineração de Pedra Britada do Estado de São Paulo) a brita representa em torno de 2% do custo de uma edificação, mas

compreende 60% do seu volume. Nas obras de pavimentação, sua participação no custo chega a 30%. A seguir a Tabela 2 mostra a necessidade de consumo de agregado por tipo de obra.

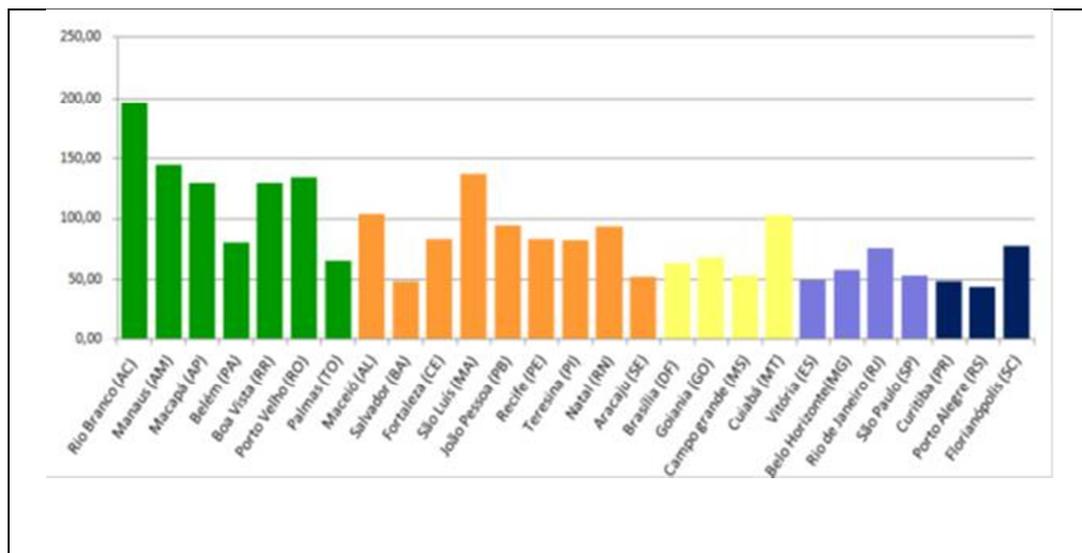
Tabela 2 – Consumo de agregado por tipo de obra

TIPO DE CONSTRUÇÃO	QUANTIDADE DE AGREGADOS CONSUMIDA
Unidade construída de 35 m ²	21 toneladas
Habitacões populares de 50m ²	68 toneladas
Obras de 1120 m ² (escolas)	1.675 toneladas
Manutenção de via municipais	100 toneladas/km
Estradas e rodovias	3.000 toneladas /km
Pavimentação Urbana, Cidade de baixa densidade	0,166 m ³ /m ²
Pavimentação Urbana; Cidade de Alta densidade	0,326 m ³ /m ²

ANEPAC – 2012 (apud IBRAM, 2012, p. 17).

A figura 3, a seguir apresenta o valor em peso do agregado industrial limitada e também o gasto com transporte, o que implica na concentração de pedreiras, o mais próximo possível de regiões metropolitanas.

Figura 3 – Preço da brita nº 1 (R\$/m³) pedra/fornecedor, sem frete, Agosto/2012 ADIMB



Fonte: ADIMB, 2012.

A importância desta cadeia é revelada pela Comissão de Economia e Estatística da Câmara Brasileira da Indústria da Construção (CEE/CBIC) que avalia sua participação em torno de 20% do Produto Interno Bruto. Considerando-se que,

em 2008, o Produto Interno Bruto - PIB girou em torno de US\$ 1 trilhão, adicionando à economia brasileira valores da ordem de US\$ 200 bilhões.

2.1.2 Gestão da produção de agregados no Brasil

Segundo Valverde (apud FERREIRA; PEREIRA, 2009, p. 6) “qualquer estudo sobre reservas de agregados, deve-se levar em conta o planejamento local existente e/ou as restrições que a sociedade impõe à atividade”. Não adianta existir reservas de ótima qualidade, quantidade e localização, se sua exploração não é sustentável ambientalmente.

A fonte oficial dos dados de produção de agregados é o RAL (Relatório Anual de Lavra), documento que as empresas mineradoras e produtoras de bens minerais devem apresentar ao DNPM (Departamento Nacional da Produção Mineral) todo o mês de março do ano seguinte (ALMEIDA; LUZ, 2009). Mesmo considerando aceitáveis estes dados, mercedores de auditagem pelo DNPM e demais órgãos de fiscalização tributária, muitas empresas mineradoras estão autorizadas a extrair e produzir agregados através do Regime de Licenciamento que não obriga a apresentação do RAL. A produção representada pelo Regime de Extração destinado a produção para atender os órgãos públicos, também não são informados. A este quadro deve se acrescentar a ilegalidade ou clandestinidade na extração e comercialização do insumo agregado (ADIMB, 2014).

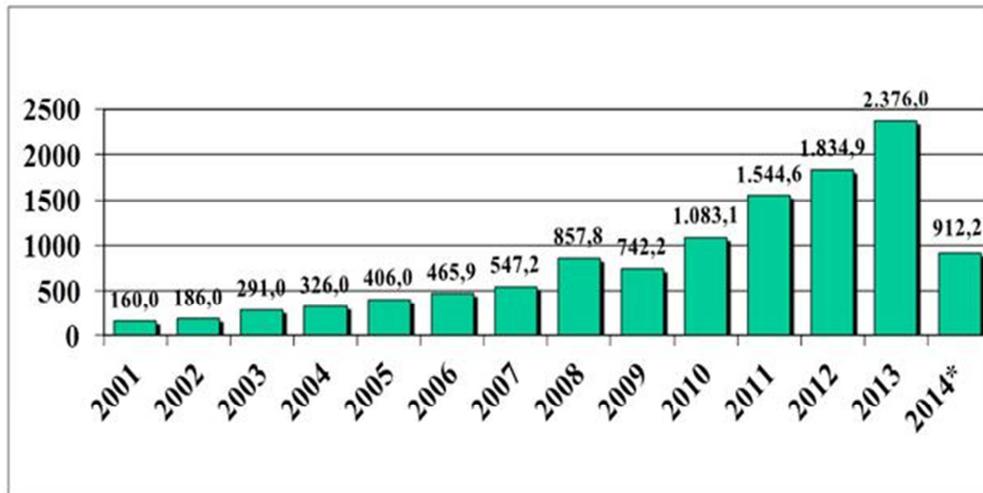
Portanto, as informações do RAL devem ser tomadas com certo cuidado e conhecimento do setor e seu grau de informalidade. O órgão de governo responsável pela gestão pública da mineração é o DNPM, sob as condicionantes de permissão ambiental do IBAMA¹, ou órgão estadual ou municipal competente.

O principal retorno social da atividade de mineração, sob a gestão e fiscalização do DNPM é a CFEM (Compensação Financeira pela Exploração de Recursos Minerais). A CFEM é uma contraprestação pela utilização dos recursos minerais amparada na Constituição Federal e estabelecida pela Lei 8876/94. O montante arrecadado é distribuído à União (13%), às Unidades da Federação, ao Distrito Federal (23%) e aos Municípios (65%).

¹ Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis.

A Figura 4, a seguir mostra a evolução da arrecadação da CFEM no Rio Grande do Sul no século XXI.

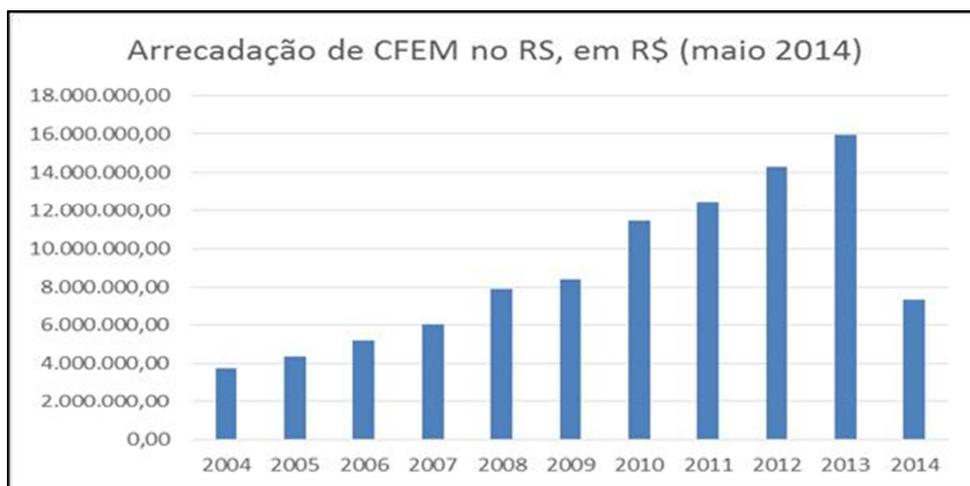
Figura 4 – Evolução da Arrecadação da Compensação Financeira pela Exploração de Recursos Minerais – CFEM, no Brasil*



(*até 30/06/2014; em R\$ Milhões). Fonte: site do DNPM

No ano de 2013, o estado ocupou a 10ª (décima) posição em arrecadação, com a quantia de R\$15.976.016,77 que correspondeu 0,67 % do total arrecadado no Brasil R\$2.375.660.264,08 (DIPAR, 2014).

Figura 5 – Evolução da Arrecadação da Compensação Financeira pela Exploração de Recursos Minerais – CFEM, no Rio Grande do Sul*



(*até 31/05; em R\$ Milhões). Fonte Site do DNPM

2.2 Desmonte com explosivos

O desmonte de rocha em pedreiras é realizado por meio de explosivos. Embora possam existir problemas de ordem ambiental, como ruído, ultralanchamentos e vibrações, a sua utilização está associada à eficiência da técnica e aos custos envolvidos, muito menores do que no desmonte mecânico.

O planejamento do desmonte é influenciado por diversos fatores, que necessitam de controle para que os objetivos pretendidos sejam efetivamente alcançados. A escolha do método e equipamentos de perfuração, a distribuição, o diâmetro, profundidade dos furos, tipo de explosivo a ser utilizado e a qualificação do pessoal empregado no desmonte são fatores relevantes para seu sucesso, porém as condições geológicas têm papel fundamental e sempre devem ser consideradas no projeto (ALMEIDA; LUZ, 2009).

Para compreender os aspectos que envolvem o desmonte, é necessário entender os processos da fragmentação. A fragmentação da rocha depende do tipo do explosivo, a geometria da furação o padrão de iniciação da detonação.

As novas técnicas introduzidas no sistema de desmonte dos maciços rochosos (razão de carregamento, altura e inclinação das bancadas, controle da inclinação de furação, uso de explosivos mais eficientes, retardos, etc.), fez com que diminuísse consideravelmente os impactos de vibração, ultralanchamento de material e ruído (FERREIRA, 2006).

2.2.1 Explosivos

As primeiras notícias sobre a utilização de explosivos vieram da China, aproximadamente no ano de 220 a.C., quando a pólvora foi descoberta. É considerado o explosivo mais antigo, formado por nitrato de sódio, enxofre e carvão vegetal. Segundo Bacci (2000) em meados do ano 1500 foi utilizada em desmontes de rocha, sendo o único explosivo utilizado em escavações até meados do século XIX.

O marco para a evolução do explosivo foi o ano de 1845, com a descoberta da nitroglicerina por Ascanio Sobrero. Wilbrand em 1863 inventou o TNT (trinitrotolueno), explosivo de grande potência, mas de difícil manuseio (DINIS, 2004).

Em 1865, Alfred Nobel foi um dos primeiros cientistas a utilizar a nitroglicerina, em seu estado líquido, como explosivo em escavações. Por causa da grande sensibilidade desse material ocorriam vários acidentes fatais, vitimando inclusive o pai de Nobel. Misturando a nitroglicerina a um material fóssil (*diatomácia*) Nobel observou que ela perdia a sensibilidade, mas conservava a potência explosiva, originando o nome popular de Dinamite (SANTOS, 2009).

Mais recente, por volta de 1953, desenvolveu-se o explosivo ANFO (*ammonium nitrate fueloil*), mais seguro, com grande poder de detonação e a baixo custo. O uso do ANFO é limitado por sua pouca resistência à água e baixa densidade, fatores que devem ser bem conhecidos antes da sua introdução em um sistema de desmonte (DAVIS, 1943).

Em 1956, Cock e Farnam desenvolveram um novo tipo de explosivo na forma gelatinosa “*water gel*” ou “*slurry*”, também a base de Nitrato de Amônio. Este explosivo permitia a utilização com boa resistência à água, que não era observada nos demais a base de ANFO (SANTOS, 2009).

Na década de 1970 iniciou-se a comercialização das emulsões explosivas, a base de nitrato de amônio em mistura com óleo mineral, que resultou em um produto com grande eficiência e resistente à água (SANTOS, 2009).

A propensão atual recomenda que na “fabricação de explosivos industriais sejam utilizados componentes que isoladamente não sejam substâncias explosivas, para garantir a completa segurança dentro das fábricas” (ARAUJO, 2014, p. 1980).

2.2.1.1 Explosivos para mineração

Os explosivos para mineração classificam-se em três categorias; os Explosivos Iniciadores, os Altos Explosivos e os Baixos Explosivos, os quais serão elucidados a seguir (RICARDO; CATALANI, 2007):

Os Explosivos Iniciadores ou primários são sensíveis, produzem uma onda de choque muito intensa, capaz de iniciar a detonação da massa explosiva. Não são suficientes para executar o trabalho de rompimento da rocha. São considerados “acessórios de detonação”.

Os Altos Explosivos ou secundários, detonam em uma velocidade de 2.500 a 7.500 m/s, com a formação de uma grande quantidade de gases a altas pressões, em torno de 100.000 atm. A detonação da origem a onda de choque causando

fissuras, que junto com a alta pressão dos gases quebra a rocha, empurrando para a face livre. São os utilizados em pedreiras de agregados.

Os Baixos Explosivos a reação de detonação é uma queima rápida sem a produção de onda de choque de grande intensidade. O único que ainda tem alguma importância é a pólvora negra que é utilizada no corte de blocos de rochas para revestimento e para paralelepípedos.

2.2.1.2 Tipos de Explosivos

A Dinamite, que era fabricada pela Du Pont², foi o explosivo mais conhecido pelo público leigo. Possuía consistência de semiplástica a sólida. Foi comercializada em dois tipos: puras e amoniacais. As dinamites puras eram compostas de nitroglicerina, nitrato de sódio, celulose e enxofre. Já as Amoniacaais possuíam uma parte da nitroglicerina substituída por nitrato de amônio.

A Pólvora Negra foi muito utilizada até a descoberta da Nitroglicerina. É de baixa velocidade, enquadrada com baixo explosivo, muito higroscópica, não podendo empregar em presença de água. A mesma é produzida de dois tipos, “A” e “B”. As do tipo “A”, contém nitrato de potássio, enxofre e carvão vegetal. É utilizada em escavações a céu aberto no corte de pedras para a produção de paralelepípedos e blocos para revestimento. Já as do tipo “B”, contém nitrato de sódio enxofre e carvão vegetal. É mais lenta e tem menor força que a do tipo “A”, e é utilizada na detonação de argilas e folhelhos (RICARDO; CATALANI, 2007).

Os ANFOS (Ammonium Nitrate + Fuel Oil) é uma mistura de nitrato de Amônia (94%) e óleo diesel (6%). Possui cerca de 70% da força da nitroglicerina, baixa densidade, baixo custo, não apresenta resistência à água, tendo que ser usado em locais secos e são recomendados para o preenchimento de carga de coluna (RICARDO; CATALANI, 2007).

As Lamas Explosivas possuem consistência de uma pasta fluída, formada por água e nitroglicerina (CLARK, 1980). Possuem alta densidade e a sua consistência permite obter uma elevada razão linear de carregamento através do preenchimento total dos furos (SANTOS, 2009).

² A DuPont é uma companhia com mais de 200 anos de vida, uma das mais antigas do mundo. Sua origem data da concretização do sonho do químico francês, discípulo de Lavoisier, Eleuthère Irénée du Pont de Nemours, que imigrou para os Estados Unidos e lá fundou uma fábrica de pólvora negra.

As Pastas ou Aquagel, são semelhantes a lamas explosivas, porém não possuem nenhuma sensibilização por nitroglicerina. O efeito deste explosivo é ampliado com a adição de finíssimas partículas metálicas que aumentam a quantidade de energia liberada (RICARDO; CATALANI, 2007).

As Emulsões são explosivos que foram desenvolvidos, cuja consistência facilita o carregamento dos furos com as mais variadas inclinações e níveis hidrostáticos. Apresenta excelente resistência à água, podendo ser utilizado em perfurações com 100% de água expulsando-a, bem como sua densidade permite preencher totalmente o furo (HISTRULID, 1999).

Os Granulados são formados geralmente de carbonitratos como explosivo básico. Exigem a sensibilização por um alto explosivo para que ocorra a detonação, ou seja, necessita a detonação prévia de uma carga para iniciar a detonação.

São de baixa densidade e não possui nenhuma resistência a água. Manuseáveis a granel e adequado ao carregamento pneumático de furos em cargas de coluna. Podem ser utilizado em todas as modalidades de desmonte a céu aberto e subterrâneo (RICARDO; CATALANI, 2007).

Os bombeados são pastas explosivas, granulados e emulsões que podem ser bombeados diretamente nas perfurações com equipamentos montados em caminhões. São explosivos seguros para o transporte, pois somente se tornam detonáveis após serem injetados nos furos, quando completa-se a reação química.

Estes explosivos permitem grande rapidez no carregamento e apropriados para o desmonte em grande escala. Necessita a utilização de um reforçador. Não é indicado em rochas fraturadas, pois existe fuga do material (RICARDO; CATALANI, 2007).

Os gelatinosos são de consistência plástica, permite boa acomodação dentro dos furos.

2.2.1.3 Características dos Explosivos

As principais características de um explosivo são: Força, Densidade e velocidade de detonação, havendo ainda outras características específicas importantes para o cálculo de um plano de fogo.

A Força é a quantidade de energia liberada na detonação e significa a capacidade do explosivo produzir trabalho de desmonte da rocha (RICARDO;

CATALANI, 2007). A sua utilização é controlada pelas leis de conservação de energia e massa (CLARK, 1980).

Conforme Santos (2009, p. 13) “é uma grandeza deduzida indiretamente por via teórica a partir da composição do explosivo ou medido diretamente por ensaios calorimétricos”. É expresso em unidade térmica (calor de expansão) ou mecânica (trabalho de explosão), referente a unidade de massa.

“Densidade é a relação entre massa e o volume de explosivos, e é expressa em Kg/m^3 ”. O explosivo de alta densidade permite maior concentração, possibilita introduzir maior número de quilos por metro de perfuração (SANTOS, 2009, p. 13).

Quando há necessidade de alta fragmentação é indicado um explosivo de alta densidade. Se não há necessidade de fragmentação, usa-se um explosivo de baixa densidade.

Um explosivo com densidade mais alta é usado em furos de pequeno diâmetro devido a sua boa concentração, ao contrário os de baixa densidade são indicados para furos de grande diâmetro (CLARK, 1980).

As densidades dos explosivos comerciais variam de $0,60\text{g/cm}^3$ a $1,45\text{g/cm}^3$ (CLARK, 1980). Quanto maior a densidade do explosivo, maiores serão o afastamento e o espaçamento. Para uma dada razão de carregamento, menor será a quantidade de furos.

A velocidade de detonação do explosivo ou velocidade do explosivo é aquela com que a frente da reação química avança num explosivo de forma cilíndrica. Ela varia de 1.500 a 7.500 m/s.

A velocidade de detonação é dependente de variáveis como o diâmetro da carga explosiva, grau e tipo de confinamento, tipo de iniciação, composição química, características físico-química como densidade, superfície específica, temperatura (RICARDO; CATALANI, 2007).

Acessórios ou iniciadores são altos explosivos ou explosivos primários, com velocidade de detonação mais baixa. São sensíveis ao calor, impacto e fricção, que sofrem detonação quando sujeitos a chama ou percussão.

São usados para iniciar, fornecer onda de choque para os altos explosivos menos sensíveis como as cargas explosivas usadas em pedreiras. Utiliza-se também para controlar corretamente uma detonação (VALENÇA et al., 2013). Como exemplo, trazemos as espoletas, os retardos, o cordel detonante, os boosters, etc.

2.2.2 Plano de fogo

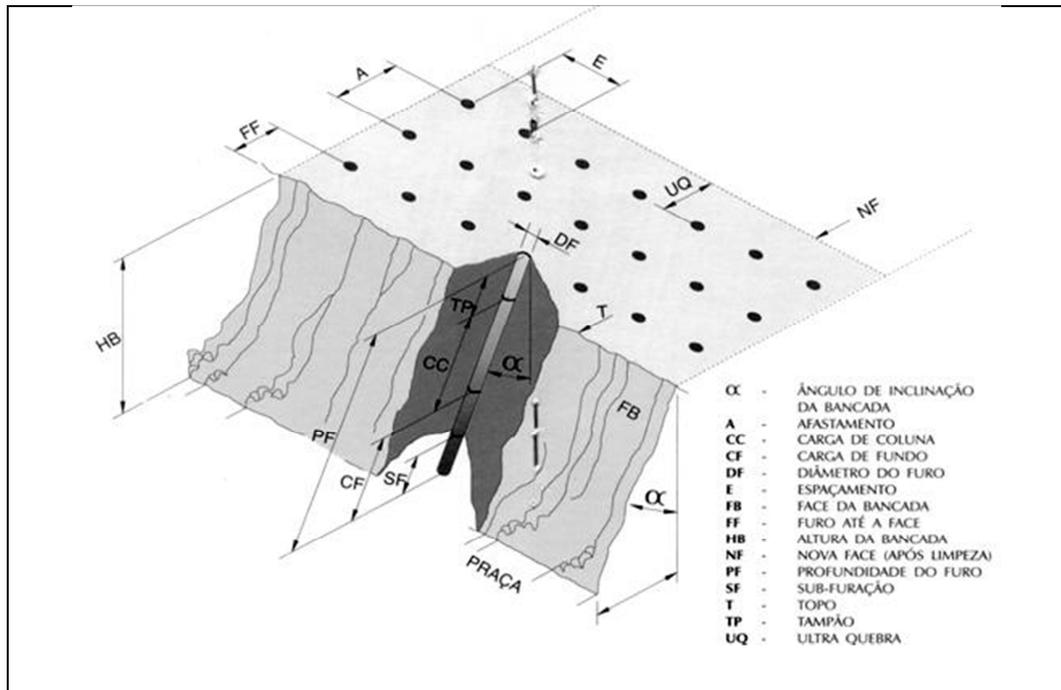
O plano de fogo é a ferramenta básica do engenheiro de minas. Ele quantifica a furação a ser feita, a quantidade de explosivos a ser carregada e o modo de fazê-lo, e o seqüenciamento das explosões. Nos desmontes em pedreiras o plano de fogo é estabelecido levando em consideração as características da rocha, como: estrutura do maciço rochoso (estratos, fraturas, microfraturas e planos de falha), e a densidade e coesão da rocha (SILVA, 2005).

O desmonte de rochas por explosivos deve ser estudado usando abordagem sistêmica. O resultado do desmonte em uma pedreira, principalmente o grau de fragmentação alcançado irá afetar diretamente as demais fases do processo produtivo da mineração, como: carregamento, transporte, e principalmente a alimentação na usina de britagem e moagem, chegando a influenciar também na granulometria ou tipos de agregado produzidos (GRIPP; MORAIS, 2004).

O plano de fogo deve ser elaborado de maneira que a energia liberada pelo explosivo na detonação seja transformada em trabalho útil, evitando que se dissipe pelo maciço sob a forma de vibrações, ruídos, gases, ultralancamento e danos ao maciço remanescente. Trata-se de um trabalho especializado, em muitos casos disponibilizados pelos próprios fornecedores de explosivos (FERREIRA, 2006).

A figura 6, a seguir, mostra o croqui de uma bancada e o arranjo da disposição da furação e carregamento de explosivos por furo (COLLANTES et al., 2004). Os parâmetros listados na figura 6 são inter-relacionados, combinando características do maciço, disposição de equipamentos de furação e limites no recebimento do material fragmentado no beneficiamento.

Figura 6 – Esquema de uma Plano de fogo



Fonte: (Britanite, 2012).

Dentre os parâmetros utilizados na elaboração de um plano de fogo os principais na execução do fogo e importantes para esta dissertação serão a seguir comentados:

A: Afastamento: distância entre linhas de furos; ($A \sim 45 DF$);

Bancada: forma dada ao terreno rochoso pelos fogos sucessivos e constantes;

E: Espaçamento: distância entre furos da mesma linha, ($E = K \times A$; $1 < K < 1,3$);

HB: Altura da Bancada: é a altura vertical medida do topo à praça da bancada, ($HB = 12 \text{ m}$ – Máxima permitida no RS);

PF: Profundidade do Furo: é o comprimento total perfurado, devido à inclinação e a sub – furação, será maior que a altura da bancada.

RC: Razão de Carga: a quantidade de explosivo usada para detonar certo volume ou toneladas de rochas (g/m^3 , kg/m^3 , g/ton. , kg/ton.) (ARAUJO 2006, adaptado).

O objetivo do desmonte é produzir um material bem fragmentado, que é aquele com tamanho máximo do fragmento que não excede ao tamanho máximo da abertura de alimentação do tipo de britador primário (DE BEM, 2006).

Dependendo da solicitação, as pedreiras podem alterar os parâmetros do plano de fogo com a finalidade de atingir a fragmentação desejada para cada detonação (GRIPP; MORAIS, 2004).

A malha de perfuração deverá estar adequada, pois é neste espaço pré-determinado em cálculos e testes de campo que a rocha estará em movimento e expansão. Com rochas em descontinuidades pouco espaçadas a fragmentação tende a ser controlada estruturalmente, por isso o aumento do furo pode ser conveniente (CAMERON & HAGAN, 1994).

2.2.3 Ação dos explosivos

A carga explosiva usada no desmonte de rocha está associada a duas fases distintas, a Dinâmica e a Quase Estática, as quais serão explicitadas a seguir (DINIS, 2004):

A Fase Dinâmica, correspondente à ação das ondas de choque no maciço rochoso. Inicia-se com a detonação do explosivo ao longo da extensão de cada furo carregado e a propagação da onda de choque concentricamente, atuando com pulsos de compressão até atingir uma face livre da bancada (KUZMENKO et al., 1993). Neste momento a onda é refletida e retorna ao maciço aplicando esforços de tração.

A sequência dos eventos promove o surgimento de fraturas radiais (efeito da compressão), seguido da geração de fraturas tangenciais que refletem tracionando o maciço. A pouca resistência à tração em maciços rochosos implica na necessidade da existência de faces livres para aproveitar a energia da explosão.

Fase Quase Estática é aquela que surge devido ao trabalho mecânico realizado pelos gases provenientes da reação química de decomposição do explosivo e é um processo relativamente lento. Nesta fase ocorre o desmonte, em função da influência da expansão dos gases resultantes de detonação dos explosivos que penetram nas gretas radiais e posteriormente nas tangenciais, separando os blocos e lançando a massa rochosa para frente da bancada (KUZMENKO et al., 1993).

Com a movimentação do volume frontal, ocorre um alívio de pressão, aumentando a tensão nas gretas primárias. Se o Afastamento não é muito grande, as gretas se estendem até a superfície livre, e ocorre o desprendimento total do bloco rochoso. Neste caso, é alcançado o maior efeito por furo e quantidade de carga explosiva.

O desempenho dos explosivos no desmonte de maciços rochosos deve-se a ação conjunta da onda de tensão dinâmica (fase dinâmica) e da pressão dos gases liberados (fase quase estática) que causam localmente tensões superiores às resistências dinâmicas (tração e compressão) da rocha, originando a fragmentação (DINIS, 2004).

Resumidamente, o processo envolvido, a partir da detonação do explosivo, compreende inicialmente uma forte compressão do maciço rochoso, por uma onda de choque que se propaga pela rocha com velocidades no intervalo de 2.000 à 7.000 m/s, dependendo do tipo de rocha e explosivo utilizado. Essa onda de compressão provoca microfissuras no entorno do furo carregado com explosivos, dando início ao processo de fraturamento da rocha.

Na sequência, a onda de choque pode sofrer reflexões a partir de superfícies livres (face da bancada ou planos de descontinuidade existentes na rocha). A onda de compressão é, então, transformada em onda de tração e cisalhamento, aumentando o processo de fraturamento e o alargamento do furo pela onda compressional, com o aparecimento de fraturas radiais.

As ondas de tração geradas pela reflexão das ondas de choque, nas superfícies livres, induzem a continuidade do fraturamento da rocha e o deslocamento na face da bancada (CHIAPETTA et al., 1987).

Em seguida, grande volume de gás é liberado, penetrando e expandido nas fissuras existentes. O gás pode promover também o lançamento da rocha no sentido da face da bancada e o mecanismo de ruptura flexural (expansão dos gases promovendo o lançamento do material para frente da bancada).

2.3 Características da rocha em pedreiras

A pedreira, apesar do seu aspecto sólido e monolítico, é percorrida em maior ou menor grau por incontáveis fraturas e descontinuidades, constituindo as direções principais de fraqueza. O conhecimento do sistema de estruturas físicas e

petrográficas da frente de lavra permite o aperfeiçoamento do desmonte. Como foi visto na situação anterior, a presença de faces ou descontinuidades faz refletir a onda comprimida em onda de tração resultando no fraturamento da rocha. Ao mesmo tempo, descontinuidades estruturais conectadas no maciço rochoso perturbam e amortecem as ondas de choque como também dá escape a pressão dos gases. É necessário determinar quais propriedades tem influência no desempenho do desmonte e adequar o plano de fogo às diferentes condições geo-estruturais existentes (COLLANTES et al., 2004).

O mapeamento das fraturas no maciço e o planejamento do desmonte, tomando em conta as particularidades de cada local (a direção do fraturamento pode mudar dentro do maciço) é uma prática comum em muitas companhias. Conhecer as propriedades geomecânicas do maciço rochoso é fundamental para o bom projeto de desmonte por explosivos.

As principais propriedades que influem nos projetos de desmonte em pedreiras são: a resistência da rocha, propriedades elásticas, propriedades de absorção, as descontinuidades estruturais (falhas, fraturas, falhas geológicas, juntas, diaclases, etc.), a velocidade de propagação das ondas sísmicas, e o grau de anisotropia e heterogeneidade dos maciços (COLLANTES et al., 2004).

Estes parâmetros são estudados para muitos padrões de rocha, por métodos diretos, ou de laboratório. Para obter uma amostra representativa é necessário que esta tenha dimensões compatíveis com a escala de estudo do maciço (SILVA, 2005). A seguir serão apresentados os parâmetros mais utilizados nos processos de engenharia convencional em pedreiras.

2.3.1 Resistência da Rocha

Segundo Silva (2005) os estudos consideram duas resistências: a resistência estática e a resistência dinâmica. Inicialmente a resistência estática é à compressão e à tração estabelecidas em laboratório, que foram utilizadas como parâmetros indicativos do comportamento da rocha nas detonações. No entanto, o avanço dos estudos mostra que a resistência dinâmica pode atingir valores entre 5 a 13 vezes superiores à resistência estática.

A resistência dinâmica à compressão geralmente é superior à da tração. Os esforços compressivos associados com a onda de choque são superiores aos

esforços tangenciais de tração. Como consequência o fraturamento por tração é um mecanismo de ruptura importante para rochas massivas e duras. Já nas rochas de baixa resistência dinâmica à compressão a ocorrência de fraturas é incrementada ao redor do furo, efeito indesejável para a eficiência do explosivo (SILVA, 2005).

Por sua vez, a resistência dinâmica da rocha à tração é importante porque deverá ser excedida pelo esforço de tração tangencial, desenvolvendo o fraturamento radial. Também para que o lascamento aconteça, este deverá ser excedido pelo esforço de tração radial resultante da reflexão da onda de choque na face livre (SILVA, 2005).

2.3.2 Propriedades Elásticas (Mecânicas)

As propriedades elásticas de uma rocha são descritas pelo módulo de Young e o coeficiente de *Poisson*. “O módulo de *Young* relaciona a tensão aplicada e a correspondente deformação da rocha”, sempre quando a deformação for elástica. “O coeficiente de *Poisson* é o valor absoluto da relação entre a deformação transversal e a correspondente axial da rocha, quando submetido a um esforço uniaxial” (SILVA, 2005, p. 15).

Para a maioria das rochas o coeficiente de *Poisson* está na faixa de 0,2 e 0,3. Quando este decresce, a velocidade de detonação e a pressão máxima no furo devem ser incrementadas para se obter uma fragmentação aceitável.

O módulo de *Young* é “dependente, de um modo geral, do estado de tensão na rocha, da quantidade de carga e da heterogeneidade estrutural” como a estratificação, xistosidade e microestruturas (SILVA, 2005, p. 15). Sempre que o valor do módulo de *Young* cresce, a tensão ou deformação provocada pelo explosivo se incrementará (ZACARIAS, 2003).

2.3.3 Propriedades de absorção

A amplitude dos pulsos sísmicos ou onda de choque diminui quando se ocorre o resultado de dois mecanismos: a expansão geométrica da onda, que resulta em uma diminuição da energia contida por volume unitário de rocha, sem provocar nenhuma perda de energia, e o mecanismo de dissipação da energia do pulso (ZACARIAS, 2003).

Esta perda de energia é resultado do atrito interno no material rochoso. A energia pode estar sendo armazenada localmente no material ou ser dissipada na forma de calor. Nos maciços rochosos está dissipação da energia da detonação é elevada e conseqüentemente a dissipação da onda de choque. Portanto, em corpos rochosos isotrópicos o processo de fraturamento é fraco ou inexistente (ZACARIAS, 2003).

A capacidade do maciço rochoso para transmitir ou absorver a energia de detonação influi na seleção do explosivo, na sua distribuição espacial no furo e no espaçamento temporal no fogo, ou seja, na malha de furação.

2.3.4 Descontinuidades estruturais

As estruturas presentes nos maciços rochosos podem ter descontinuidades, planos de estratificação, falhas, diaclasamento ou xistosidade. As principais características a observar nas descontinuidades são:

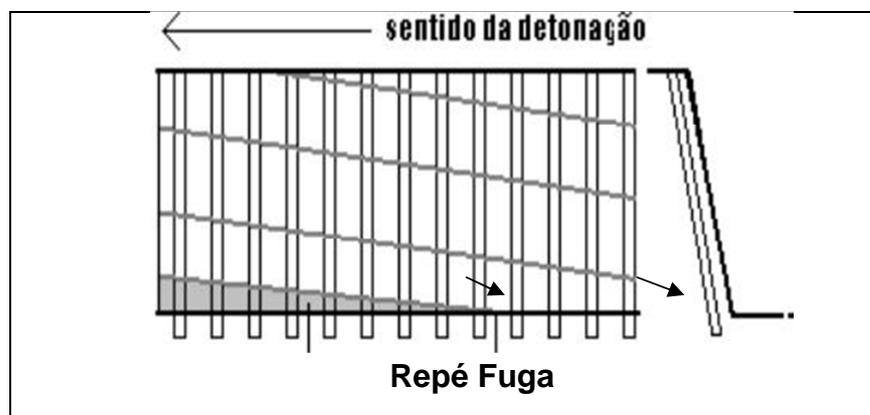
- Orientação de rumo e mergulho;
- Espaçamento entre as descontinuidades adjacentes;
- Persistência de manifestação da descontinuidade;
- Rugosidade, ondulações ou aspereza da descontinuidade;
- Resistência à compressão das paredes das descontinuidades;
- Abertura ou distância perpendicular que separa as paredes adjacentes de uma descontinuidade aberta;
- Percolação de água através das descontinuidades;
- Preenchimento de material depositado entre as paredes adjacentes da descontinuidade;
- Número de famílias ou grupos diferenciados de descontinuidades;
- Tamanho dos blocos de rocha, determinados pelo espaçamento, pelo número de famílias e pela persistência das descontinuidades.

As descontinuidades favoravelmente orientadas com respeito ao furo serão preferencialmente estendidas pela onda de choque. As superfícies de paredes pré-existentes atuarão como faces livres parciais dos quais uma quantidade significativa de ondas de reflexão e refração surgirá (ZACARIAS, 2003).

Estruturas abertas ou estendidas e interligadas permitir a perda dos gases de explosão e uma redução da pressão dos gases confinados e perda de força explosiva. Estas descontinuidades abertas dificultam também o carregamento de explosivo, devido ao vazamento de material pelas aberturas, ocasionando um aumento de carga na região e desarranjo na distribuição de explosivo no furo. O incremento de volume aberto dentro do maciço rochoso reduz a pressão de gás confinado e limita o trabalho feito durante a fase de expansão dos gases (SILVA, 2005).

Para Silva (2005, p. 17) estruturas de fraqueza em planos sub-horizontais podem caracterizar “uma situação negativa para a fragmentação”, podendo gerar repé devido à perda de gases através das aberturas produzidas ao longo da detonação (Figura 07). Também podem causar variações nas propriedades físicas da rocha, como a presença de matacões de rocha mais dura em matriz mais frágil geralmente implica em dificuldade na fragmentação.

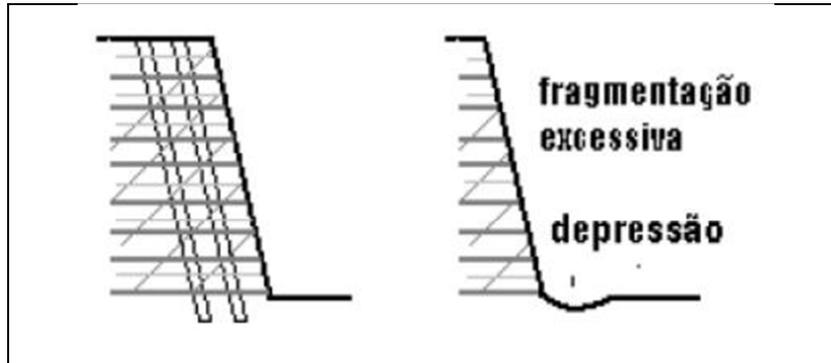
Figura 7 – Croqui mostrando o efeito de geração de repé devido a planos de fraquezas sub horizontais



Fonte: (SILVA, 2005, p. 18).

Mas, nem todas as descontinuidades e características do maciço irão influenciar negativamente a eficiência do desmonte. Planos de fraqueza horizontais geralmente são favoráveis para o desmonte, possibilitando adequada fragmentação do pé da bancada e um piso uniforme, que melhora o trabalho de carregamento do material fragmentado. No entanto, dependendo do espaçamento entre fraturas pode condicionar fragmentação excessiva como ilustra a Figura 8 (SILVA, 2005):

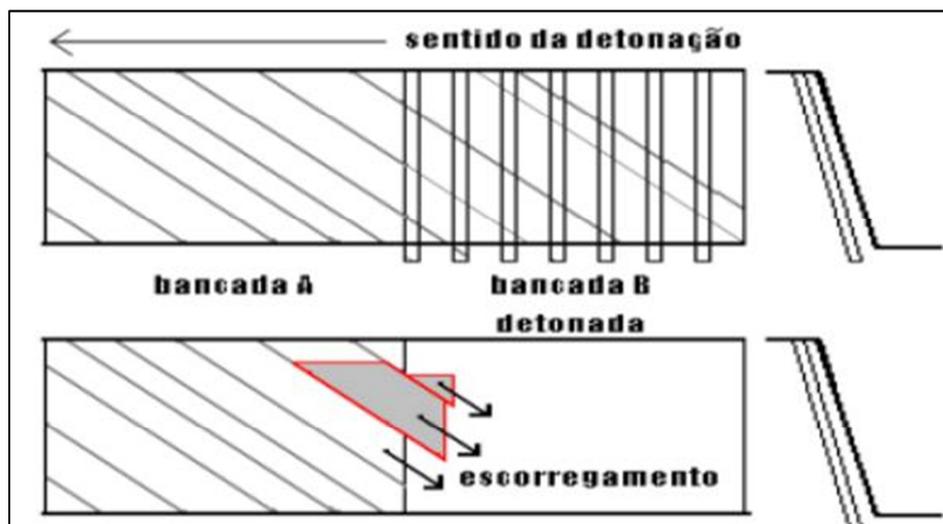
Figura 8 – Croqui mostrando o efeito da fragmentação excessiva devido a planos de descontinuidades horizontais, bastante pequeno e de maciço altamente fraturado



Fonte: (SILVA, 2005, p. 20).

Por sua vez as juntas verticais à face são favoráveis por permitir dirigir a energia de detonação perpendicularmente à estrutura da rocha. Quando juntas subverticais mergulham dentro da face, a fragmentação no pé da bancada tende a ser deficiente, criando uma superfície não uniforme e ruim para trabalho. Se estas juntas mergulham para fora da face, facilitam a fragmentação do pé; mas possibilitam uma ruptura na crista devido à formação de cunhas nas paredes da bancada remanescente, conforme Figura 9 (SILVA, 2005):

Figura 9 – Croqui mostrando o efeito de descontinuidades inclinadas e ortogonais à face, causando má fragmentação pelo escorregamento de blocos



Fonte: (SILVA, 2005, p. 19).

Planos de descontinuidades mergulhando para fora do talude, em ângulos próximos ao ângulo de atrito interno do material rochoso, são potencialmente planos de ruptura. Quando tais planos, em virtude das características das descontinuidades, pareçam suficientemente estáveis logo que escavados, com

sucessivo desmonte e vibrações nas proximidades, podem provocar sua progressiva abertura, podendo ser instáveis (COLLANTES et al., 2004).

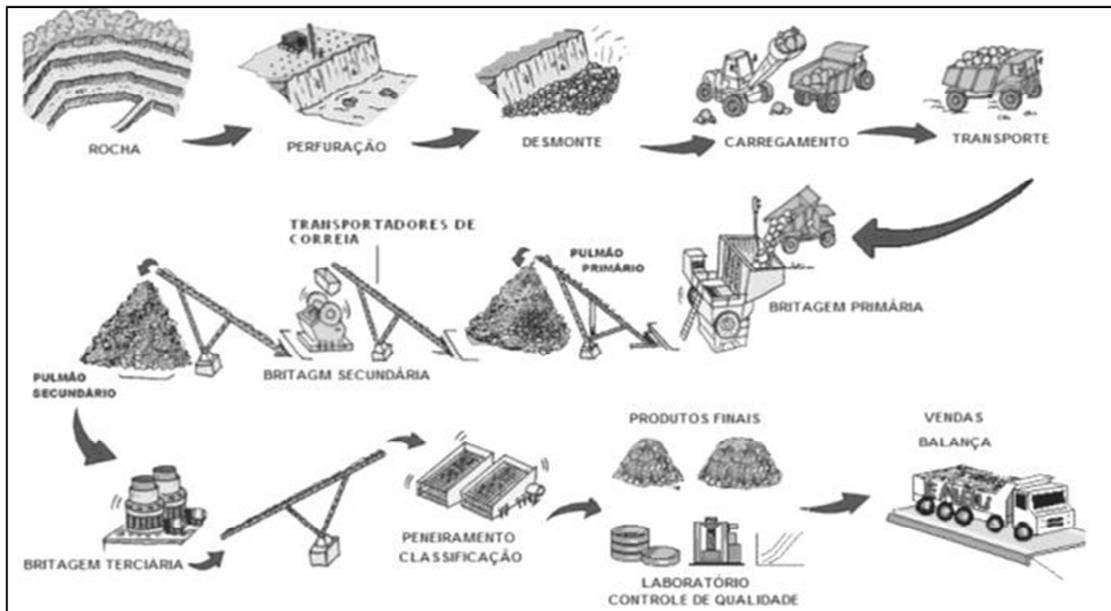
2.4 Lavra e Beneficiamento em pedreiras

As minas de agregados ou pedreiras são lavradas pelo método a Céu Aberto, com bancadas variando, na maioria dos casos de 5 metros a 12 metros. Geralmente são lavras de encosta, “acima do nível de escoamento da drenagem”, e não acumulando água em suas praças. Nas lavras em cavas, situada “abaixo da cota topográfica original”, estão sujeitas a acumulação de água na mina, necessitando de bombeamento para a sua drenagem. Neste caso cuidados especiais são adotados no plano de fogo (CONVÊNIO DNPM/MINEROPAR, s/d).

A rocha desmontada na frente de lavra é então transportada para a usina de britagem onde terá seu tamanho reduzido a textura de pedregulhos (brita), areia e frações mais finas em menor proporção. São operações de redução de tamanhos de minerais, executados de maneira controlada de modo a cumprir um objetivo pré-determinado, controlar o tamanho máximo dos produtos e evitar a geração de finos (QUARESMA, 2009). Divide-se em britagem e peneiramento. Na mineração de agregados para a construção civil, brita de basalto, utiliza-se apenas a britagem primárias e intermediárias (secundária terciária) e peneiramento.

A Figura 10, a seguir, demonstra as etapas do processo produtivo em uma pedreira de agregados.

Figura 10 – Etapas do processo produtivo de uma pedra para Brita



Fonte: (Pedreira Umbu, 2012).

Para a britagem utilizam-se três tipos de britadores: de mandíbulas, de impacto e giratório. O de impacto é o que possui custo inicial mais baixo e apropriado para a primeira redução de tamanho, podendo receber grandes fragmentos de rocha com menor geração de finos (DE BEM, 2006). As etapas posteriores de britagem utilizam normalmente britadores giratórios ou cônicos.

A operação de separação das partículas em frações de tamanhos desejados pela demanda do mercado da pedra é realizada nas etapas de peneiramento. As peneiras operam pela ação de vibração (peneiras vibratórias) ou rotação (tromel). Varias peneiras podem ser acopladas em um mesmo módulo vibratório, para obtenção de distintos produtos. Nos tromels pode haver variação de tamanho da abertura também para obtenção de distintas faixas granulométricas (QUARESMA, 2009).

2.5 Modelos de Regressões

As análises de regressão permitiram estabelecer relações entre a variável dependente e as variáveis independentes. Os modelos de regressão foram empregados para estudos de decisões ou formar impressões e atitudes.

Alguns termos a serem compreendidos para a análise de regressão é:

- Coeficiente de determinação ajustado (R^2 ajustado): É uma medida modificada do coeficiente de determinação que considera o número de variáveis independentes incluídas na equação de regressão e o tamanho da amostra. Esta estatística vem a ser muito útil para a comparação entre equações com diferentes números de variáveis independentes, diferentes tamanhos de amostras, ou ambos (HAIR et al., 2005).

- Coeficiente de determinação (R^2): É uma medida da proporção da variância da variável dependente em torno de sua média que é explicada pelas variáveis independentes ou preditoras. O coeficiente pode variar entre 0 e 1, sendo assim, quando maior o valor de R^2 , maior o poder de explicação da equação de regressão e, portanto, melhor a previsão da variável dependente (HAIR et al., 2005).

- Coeficiente de regressão (β_n): Valor numérico da estimativa do parâmetro diretamente associado com uma variável independente. O coeficiente não é limitado nos valores, já que baseado no alto grau de associação quanto nas unidades de escala da variável dependente (HAIR et al., 2005).

- Intercepto (β_n): Valor do eixo Y (variável dependente) onde a reta definida pela equação de regressão cruza o eixo, descrito pelo termo constante na equação de regressão (HAIR et al., 2005).

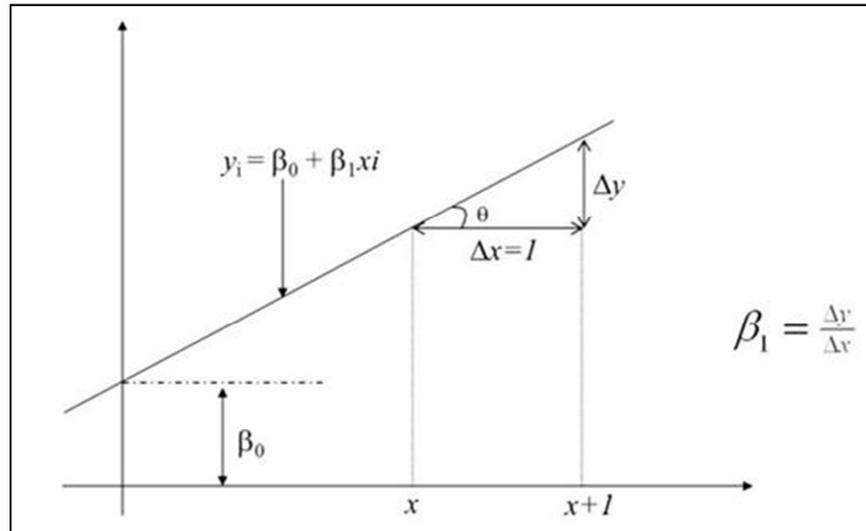
2.6 Análise de Regressão Linear

Montgomery et al. (2001) definem regressão linear como uma técnica estatística para modelar e investigar a relação entre variáveis. A regressão linear simples (RLS) procura resumir a relação entre duas variáveis. De acordo com (MONTGOMERY et al., 2001) a RLS é representada pela seguinte equação:

$$Y_i = \beta_0 - \beta_1 x_i + \varepsilon_i \quad , \quad \text{para } i = 1, 2, \dots, n \quad (2.1)$$

A equação 2.1 é linear porque nenhum de seus parâmetros aparece com expoente ou é multiplicado ou dividido por outros parâmetros. O termo ε_i é o erro aleatório, assumido como normal e independentemente distribuído, com média zero e variância (σ^2) constante e desconhecida.

Figura 11 – Modelo de Regressão Linear (MRL)



Fonte: Produzido pelo autor, 2014.

O diagrama de dispersão é um gráfico constituído por pontos onde cada ponto, P_i , representa um par de valores observados, (x_i, y_i) , (x_i representa o valor da variável independente observada para o indivíduo P_i e y_i representa o valor da variável dependente observada para esse mesmo indivíduo). O diagrama de dispersão é obtido pelos pontos posicionados em torno da reta de regressão.

O diagrama de dispersão tem uma função dupla: analisar se existe alguma associação entre as variáveis e permitir identificar qual o modelo matemático (equação) mais apropriado para descrever essa associação.

Quando o diagrama de dispersão indica uma tendência para uma relação linear, então os dados encontram-se bem ajustados pela reta de regressão (de equação (1)).

Ao ajustar uma reta de regressão aos dados observados anulamos os efeitos da variável residual.

Verifica-se que nem todos os pontos se encontram sobre a reta e essa diferença é o erro (ϵ), que pode ter sido ocasionado por fatores distintos. Mas supõe-se que a média desses erros tende a anular-se, ou seja:

A obtenção da reta ajustada implica o conhecimento dos parâmetros β_0 e β_1 de tal modo que o desvio entre os valores reais e os valores ajustados seja mínimo.

2.6.1 Suposições para o modelo

Ao estabelecer o modelo para os dados, pressupomos que:

i) A relação matemática entre Y e X é linear;
 ii) Os valores de x são fixos (ou controlados), isto é, x não é uma variável aleatória;

iii) A média do erro é nula, ou seja, $E(\varepsilon_i)=0$. Desta forma, segue que

$$E(Y_i) = E(\beta_0 + \beta_1 x_i + \varepsilon_i) = \beta_0 + \beta_1 x_i + E(\varepsilon_i) = \beta_0 + \beta_1 x_i \quad (2.2)$$

e portanto, a função de regressão para o modelo é dada por:

$$E(Y) = \beta_0 + \beta_1 x \quad (2.3)$$

Note que o valor observado de Y_i está em torno do valor da função de regressão com erro experimental ε_i .

iv) Para um dado valor de x , a variância de ε_i é sempre σ^2 , isto é,

$$\text{Var}(\varepsilon_i) = E(\varepsilon_i^2) - [E(\varepsilon_i)]^2 = E(\varepsilon_i^2) = \sigma^2 \quad (2.4)$$

isto implica em:

$$\text{Var}(Y_i) = E[Y_i - E(Y_i|x_i)]^2 = E(\varepsilon_i^2) = \sigma^2 \quad (2.5)$$

Então, podemos dizer que o erro é homoscedástico (tem variância constante);

v) O erro de uma observação é independente do erro de outra observação (erros não correlacionados), isto é,

$$\text{Cov}(\varepsilon_i, \varepsilon_j) = E(\varepsilon_i, \varepsilon_j) - E(\varepsilon_i)E(\varepsilon_j) = E(\varepsilon_i, \varepsilon_j) = 0, \quad \text{para } i \neq j \quad (2.6)$$

vi) Frequentemente, supomos que os erros tem distribuição Normal.

Desta forma, combinando (iii), (iv) e (vi) temos que $\varepsilon_i \sim N(0, \sigma^2)$. Como Y_i é a soma de um termo constante, $\beta_0 + \beta_1 x_i$, com um termo aleatório, ε_i , segue que $Y_i \sim N(\beta_0 + \beta_1 x_i; \sigma^2)$. Além disso, por (v) temos que Y_i e Y_j também são descorrelacionados. A suposição de normalidade é necessária para a elaboração dos testes de hipóteses e obtenção de intervalos de confiança.

2.6.2 Teste de hipóteses e Intervalo de confiança

Para que seja possível realizar os testes de hipóteses e a construção do intervalo de confiança para as estimativas do modelo é necessário estimar a variância (σ^2). Essa estimativa pode ser obtida pelo quadrado médio dos erros (QMR) (MONTGOMERY et al., 2001; WEISBERG, 2005) eq. 2.7

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{\text{SQR}}{n-p} = \text{MQR} \quad (2.7)$$

A análise de variância (ANOVA) Tabela 3 é utilizada para o teste da significância da regressão, ou seja, para verificar a existência de relação linear entre

preditando e preditores (MONTGOMERY et al., 2001; NETER et al., 2004). O teste de significância da regressão pode ser expresso pelas seguintes hipóteses:

$$\begin{aligned} H_0: \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 0 \\ H_1: \beta_j \neq 0 \text{ para no mínimo um } j \end{aligned} \quad (2.8)$$

A rejeição da hipótese nula (H_0) significa que ao menos uma das variáveis de controle é estatisticamente significativa para o modelo. O teste de significância da regressão é baseado na decomposição da soma dos quadrados totais (SQT) equação 2.9.

$$SQT = SQR + SQReg \quad (2.9)$$

De acordo com Montgomery et al. (2001) e Neter et al. (2004) os graus de liberdade para análise de variância são distribuídos da seguinte maneira:

- A SQT possui $n - 1$ graus de liberdade;
- a SQReg possui k graus de liberdade. É definido pelos k coeficientes de inclinação do modelo;
- a SQR possui $n - p$ graus de liberdade, a estimativa de cada um dos p parâmetros do modelo acarreta a perda de um grau de liberdade.

Para testar as hipóteses da equação 2.8, utiliza-se o seguinte teste (MONTGOMERY et al., 2001; NETER et al., 2004):

$$F_0 = \frac{QMReg}{QMR} \quad (2.10)$$

Esta estatística, equação 2.10 apresenta uma distribuição *F-Snedecor* com k graus de liberdade no numerador e $n - p$ no denominador. Para rejeitar a hipótese nula H_0 , isto é, mostrar que existe uma relação linear entre os preditores e o preditando, a seguinte expressão deve ser verdadeira:

$$F_0 > F_{\alpha, k, n-p} \quad (2.11)$$

A tabela 3.1 apresenta a Análise de variância para testar a significância da regressão (MONTGOMERY et al., 2001).

Os coeficientes de regressão também devem ser testados com a formulação de hipóteses e a construção de intervalos de confiança. Para isso, pode-se montar o seguinte teste (MONTGOMERY; RUNGER, 2003):

Tabela 3 – Análise da variância da regressão (ANOVA).

Fontes de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F0
Regressão	SQReg	k	QMR _{Reg} =SQReg/ k	QMR _{Reg} /QMR
Resíduos	SQR	$n-p$	QMR=SQR/($n-p$)	
Total	SQT	$n-1$		

Fonte: Produzido pelo autor, 2014.

$$H_0: \beta_j = \text{cte}$$

$$H_1: \beta_j \neq \text{cte} \quad (2.11)$$

Para esse teste utiliza-se a estatística t_0 , de acordo com Montgomery et al. (2001), Neter et al. (2004), Weisberg (2005) essa estatística segue uma distribuição t-student com $n - p$ graus de liberdade. A hipótese nula H_0 é rejeitada se:

$$|t_0| > t_{\alpha/2, n-p} \quad (2.12)$$

Um caso particular é quando a constante testada na equação 2.11 é zero, neste caso:

$$H_0: \beta_j = 0$$

$$H_1: \beta_j \neq 0 \quad (2.13)$$

Se no teste de hipótese acima H_0 for aceita, a variável de controle x_j não é estatisticamente significativa e deve ser retirada da equação de regressão. Para que sejam tomadas decisões sobre H_0 pode ser utilizado o (*p-value*). Montgomery e Runger (2003) definiram esse como o menor nível de significância que conduz à rejeição da hipótese nula H_0 com os dados fornecidos. Nesse caso, quando o valor p for menor que o nível de significância adotado existem evidências estatísticas suficientes para se rejeitar H_0 .

2.6.3 Coeficiente de determinação

O coeficiente de determinação (eq. 2.14) é a medida de variabilidade que pode ser explicada pelo modelo (MONTGOMERY et al., 2001; WEISBERG, 2005):

$$R^2 = \frac{\text{SQReg}}{\text{SQT}} = 1 - \frac{\text{SQR}}{\text{SQT}} \quad (2.14)$$

onde: $0 \leq R^2 \leq 1$.

A raiz quadrada de R^2 é o coeficiente de regressão múltipla entre y e o conjunto de variáveis de controle utilizadas no modelo. O coeficiente de

determinação ajustado (2.15) é uma medida de controle que leva em consideração tanto a variabilidade de y que é explicada pelo modelo quanto o número de variáveis de controle utilizado (MONTGOMERY et al., 2001; NETER et al., 2004):

$$R_{aj}^2 = 1 - \frac{n-1}{n-p} (1 - R^2) \quad (2.15)$$

Na equação 2.15 o acréscimo de uma variável ao modelo pode fazer com que R_{aj}^2 decresça, se o aumento de R^2 não for suficientemente grande para compensar a perda de um grau de liberdade em $n - p$ (MONTGOMERY; RUNGER, 2003).

A interpretação do valor de R (coeficiente de correlação) depende muito dos objetivos de sua utilização e as razões pelas quais este é calculado. Segundo CALLEGARI-JACQUES (2003, p. 90), o coeficiente de correlação pode ser avaliado qualitativamente da seguinte forma:

Se $0,00 < |R| < 0,30$, existe fraca correlação linear;

Se $0,30 \leq |R| < 0,60$, existe moderada correlação linear;

Se $0,60 \leq |R| < 0,90$, existe forte correlação linear;

Se $0,90 \leq |R| < 1,00$, existe correlação linear muito forte.

2.6.4 Análise dos Resíduos

Tanto na Regressão Linear Simples quanto na Regressão Múltipla, as suposições do modelo ajustado precisam ser validadas para que os resultados sejam confiáveis. Chamamos de Análise dos Resíduos um conjunto de técnicas utilizadas para investigar a adequabilidade de um modelo de regressão com base nos resíduos (MONTGOMERY et al., 2001; NETER et al., 2004). Como visto anteriormente, o resíduo (e_i) é dado pela diferença entre a variável resposta observada (Y_i) e a variável resposta estimada (\hat{Y}_i), isto é:

$$e_i = Y_i - \hat{Y}_i = Y_i - \hat{\beta}_0 - \hat{\beta}_1 x_{1i} - \dots - \hat{\beta}_p x_{pi} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.16)$$

A ideia básica da análise dos resíduos é que, se o modelo for apropriado, os resíduos devem refletir as propriedades impostas pelo termo de erro do modelo. Tais suposições são:

$$Y = X \cdot \beta + \varepsilon \quad (2.17)$$

em que $\varepsilon = (\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n)$ com

- i. ε_i e ε_j são independentes ($i \neq j$) (erros não são autocorrelacionados);
- ii. $Var(\varepsilon_i) = \sigma^2$ (constante);
- iii. $\varepsilon_i \sim N(0, \sigma^2)$ (normalidade);
- iv. Modelo é linear;
- v. Não existir outliers (pontos atípicos) influentes.

As técnicas utilizadas para verificar as suposições descritas acima podem ser **informais** (como gráficos) ou **formais** (como testes). As técnicas gráficas, por serem visuais, podem ser subjetivas e por isso técnicas formais são mais indicadas para a tomada de decisão. O ideal é combinar as técnicas disponíveis, tanto formais quanto informais, para o diagnóstico de problemas nas suposições do modelo.

Algumas técnicas gráficas para análise dos resíduos são:

- Gráfico dos resíduos versus valores ajustados: verifica a homoscedasticidade do modelo, isto é, σ^2 constante.
- Gráfico dos resíduos versus a ordem de coleta dos dados: avaliar a hipótese de independência dos dados.
- Papel de probabilidade normal: verificar a normalidade dos dados.
- Gráfico dos Resíduos Studentizados versus valores ajustados: verifica se existem outliers em Y.
- Gráfico dos Resíduos Padronizados versus valores ajustados: verifica se existem outliers em Y.
- Gráfico do Leverage (Diagonal da Matriz H): verifica se existem outliers em X.

Para a análise formal dos resíduos, podemos realizar os seguintes testes:

- Testes de Normalidade para testar a normalidade dos resíduos.
- Teste de Durbin-Watson para testar independência dos resíduos.
- Teste de Breusch-Pagan e Goldfeld-Quandt para testar se os resíduos são homoscedásticos.
- Teste de falta de ajuste para verificar se o modelo ajustado é realmente linear.

Para cada suposição do modelo, vamos mostrar detalhadamente as técnicas para diagnóstico.

2.6.4.1 Diagnóstico de Normalidade

A normalidade dos resíduos é uma suposição essencial para que os resultados do ajuste do modelo de regressão linear sejam confiáveis (MONTGOMERY et al., 2001; NETER et al., 2004). Podemos verificar essa suposição por meio do gráfico de Papel de Probabilidade e por meio de testes tais como Shapiro-Wilk, Anderson-Darling e Kolmogorov-Smirnov.

Testes de Normalidade

Em relação aos Testes de Normalidade, precisamos encontrar os valores de $F_n(e_i)$ e $F(e_i)$, $i = 1, 2, \dots, n$, $F_n(e_{(i)})$ representa a função de distribuição acumulada empírica dos dados e é dada pela razão entre a posição i e o valor total de resíduos, isto é,

$$F_n(e_{(i)}) = i/n \text{ (distribuição empírica acumulada)} \quad (2.18)$$

$F(e_{(i)})$ representa a função de distribuição acumulada assumida para os dados e seu valor é obtido da tabela da distribuição normal padrão após transformarmos os dados pela equação 2.19.

$$z_i = \frac{e_i - \bar{e}}{s} \quad (2.19)$$

em que \bar{e} é a média aritmética e s é o desvio padrão dos resíduos.

- **Kolmogorov-Smirnov**

O teste paramétrico tradicional, baseado na distribuição *t-Student*, é obtido sob a hipótese de que a população tem distribuição normal. Nesse sentido, surge a necessidade de certificarmos se essa suposição pode ser assumida. Em alguns casos, assumir a normalidade dos dados é o primeiro passo que tomamos para simplificar a nossa análise. Para dar suporte a esta suposição, consideramos, dentre outros, o teste de Kolmogorov-Smirnov.

A estatística de teste para o teste de Kolmogorov-Smirnov é dada por

$$D_n = \sup |F_{(x)} - F_n(x)| \quad (2.20)$$

Esta função corresponde a distância máxima vertical entre os gráficos de $F_{(x)}$ e $F_n(x)$ sobre a amplitude dos possíveis valores de x . Em D_n temos que

$F_{(x)}$ representa a função de distribuição acumulada assumida para os dados;

$F_n(x)$ representa a função de distribuição acumulada empírica dos dados.

- **Anderson-Darling**

Utilizando a equação 2.22 no teste de Anderson-Darling, temos que

$$D = \sum_{i=1}^n [(2i - 1) \ln(F(e_i)) + (2(n - 1) + 1) \ln(1 - F(e_i))] \quad (2.21)$$

Assim,

$$A^2 = -n - \frac{D}{n} \quad (2.22)$$

Para o cálculo do p-valor, precisamos encontrar a estatística de Anderson Darling modificada (equação 2.23). Considerando μ e σ desconhecidos, temos que

$$A_m^2 = A^2 \times \left(1 + \frac{0,75}{n}\right) + \left(\frac{2,25}{n^2}\right) \quad (2.23)$$

Desta forma, obtemos o p-valor aproximado analisamos a Tabela com quantis e valores da estatística de Anderson Darling. Com o *p_valor* maior do que 15%, existe forte evidência pelo teste de Anderson-Darling de que os resíduos são normalmente distribuídos.

- **Shapiro-Wilk**

Para o cálculo da estatística teste de Shapiro-Wilk, precisamos dos valores contidos na Tabela 4, conforme apresentamos no teste de Shapiro-Wilk no conteúdo de Inferência.

Tabela 4 – Medidas para o cálculo da estatística de Shapiro-Wilk

i	$n - i + 1$	α	e_{n-i+1}	e_i	$\alpha(e_{n-i+1} - e_i)$
1	20	0,4734	3,02	-2,82	2,76
2	19	0,3211	2,18	-2,66	1,55
3	18	0,2565	1,18	-2,14	0,85
4	17	0,2085	1,02	-1,14	0,45
5	16	0,1686	1,02	-0,82	0,31
6	15	0,1334	1,02	-0,82	0,25
7	14	0,1013	0,34	-0,14	0,05
8	13	0,0711	0,34	-0,14	0,03
9	12	0,0422	0,34	-0,14	0,02
10	11	0,014	0,34	0,02	

Fonte: Produzido pelo autor, 2014.

A estatística de teste é dada por

$$W = \frac{b^2}{\sum_{i=1}^n (e_i - \hat{e})^2} \quad (2.24)$$

em que

$$b = \sum_{i=1}^{n/2} a_{n-i+1} \times (e_{n-i+1} - e_i) \quad (2.25)$$

2.6.4.2 Diagnóstico de Homoscedasticidade

Homoscedasticidade é o termo para designar variância constante dos erros ε_i para observações diferentes (MONTGOMERY et al., 2001; NETER et al., 2004). Caso a suposição de Homoscedasticidade não seja válida, podemos listar alguns efeitos no ajuste do modelo:

- Os erros padrões dos estimadores, obtidos pelo Método dos Mínimos Quadrados, são incorretos e portanto a inferência estatística não é válida.
- Não podemos mais dizer que os Estimadores de Mínimos Quadrados são os melhores estimadores de mínima variância para β , embora ainda possam ser não viciados.

Vale ressaltar que a ausência de homoscedasticidade é chamada de heteroscedasticidade. Com isso, testamos a seguinte hipótese:

$$H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \sigma_k^2$$

$$H_1: \text{pelo menos um dos } \sigma_i^2 \text{ s diferente, } i = 1, 2, \dots, k \quad (2.26)$$

Ao longo desta seção, vamos apresentar os diversos testes propostos na literatura.

2.6.4.2.1 Gráfico dos Resíduos versus Valores Ajustados

O gráfico dos resíduos versus valores ajustados (valores preditos) é uma das principais técnicas utilizadas para verificar as suposições dos resíduos. Além da detecção de heteroscedasticidade, esse gráfico pode indicar que não existe uma relação linear entre as variáveis explicativas com a variável resposta por meio de alguma tendência nos pontos. Por exemplo, se os pontos do gráfico formam uma parábola, é indicativo que termos de segundo grau sejam necessários.

Para o diagnóstico de heteroscedasticidade, tentamos encontrar alguma tendência no gráfico. Por isso, se os pontos estão aleatoriamente distribuídos em torno do 0, sem nenhum comportamento ou tendência, temos indícios de que a variância dos resíduos é homoscedástica. Já a presença de "funil" é um indicativo da presença de heteroscedasticidade.

2.6.4.2.2 Teste de Breusch-Pagan

Baseado no teste multiplicador de Lagrange, o teste de Breusch-Pagan é bastante utilizado para testar a hipótese nula de que as variâncias dos erros são iguais (homoscedasticidade) versus a hipótese alternativa de que as variâncias dos erros são uma função multiplicativa de uma ou mais variáveis, sendo que esta(s) variável(eis) pode(m) pertencer ou não ao modelo em questão (MONTGOMERY et al., 2001; NETER et al., 2004). É indicado para grandes amostras e quando a suposição de normalidade nos erros é assumida.

A estatística de teste neste caso é obtida da seguinte maneira:

Inicialmente, ajustamos o modelo de regressão linear (simples ou múltiplo) e encontramos os resíduos $e = (e_1, \dots, e_n)$ e os valores ajustados $\hat{y} = (\hat{y}_1, \dots, \hat{y}_n)$. Em seguida, consideramos os resíduos ao quadrado e os padronizamos de modo que a média do vetor de resíduos padronizados, que denotaremos por u , seja 1. Esta padronização é feita dividindo cada resíduo ao quadrado pela SQR/n em que SQR é

a Soma de Quadrados dos Resíduos do modelo ajustado e n é o número de observações. Desta forma, temos que cada resíduo padronizado é dado por

$$u_i = \frac{e_i^2}{SQR/n}, \quad i = 1, \dots, n, \quad (2.27)$$

em que $SQR = \sum_{i=1}^n e_i^2$

Por fim, fazemos a regressão entre $u=(u_1, \dots, u_n)$ (variável resposta) e o vetor \hat{y} (variável explicativa) e obtemos a estatística do teste χ_{BP}^2 calculando a Soma de Quadrados da Regressão de u sobre \hat{y} e dividindo o valor encontrado por 2. Sob a hipótese nula, esta estatística tem distribuição qui-quadrada com 1 grau de liberdade.

Resumidamente, se não existe heteroscedasticidade, é de se esperar que os resíduos ao quadrado não aumentem ou diminuam com o aumento do valor predito, \hat{y} e assim, a estatística de teste deveria ser insignificante.

2.6.4.2.3 Teste de Goldfeld-Quandt

O teste de Goldfeld-Quandt também é utilizado para testar a homoscedasticidade dos resíduos (MONTGOMERY et al., 2001; NETER et al., 2004). Entre as limitações deste teste está a exigência de que a amostra seja relativamente grande.

O teste consiste inicialmente em ordenar as observações de acordo com a variável explicativa que se acredita a responsável pela heteroscedasticidade. Após isso, divide-se a amostra ordenada em 3 partes de tal forma que a parte do meio tenha aproximadamente 20% dos dados e que as partes 1 e 3 tenham quantidade de dados semelhantes. Então, ajusta-se um modelo de regressão com os dados da parte 1 (contendo os menores valores da variável explicativa utilizada na ordenação) e outro modelo de regressão com os dados da parte 3 (contendo os maiores valores da variável explicativa utilizada na ordenação). Por fim, testa-se a hipótese de que as variâncias dos erros em ambas regressões são iguais contra a hipótese de que a variância dos erros na parte 3 é maior do que a variância dos erros na parte 1, utilizando o teste F.

A estatística de teste neste caso é dada por

$$F_{GQ} = \frac{SQR^b / (n_3 - (p+1))}{SQR^a / (n_1 - (p+1))} \quad (2.28)$$

em que SQR^a e SQR^b são as somas de quadrados dos resíduos da regressão para o grupo inferior (parte 1) e para o grupo superior (parte 3), respectivamente, n_1 é o número de observações da parte 1 e n_3 é o número de observações da parte 3. Chamamos de d o número de observações omitidas (parte 2). Essa estatística tem distribuição $F_{(n_3 - (p+1), n_1 - (p+1))}$. Desta forma, considerando um nível de significância $\alpha = 0,05$, rejeitamos a hipótese nula, ou seja, a hipótese de que as variâncias são iguais se $F_{GQ} > F_{(\alpha)}$.

2.6.4.3 Diagnóstico de Independência

Para verificar se os resíduos são independentes, podemos utilizar técnicas gráficas e testes. A seguir, temos o diagnóstico de independência por essas duas formas.

2.6.4.3.1 Gráfico dos Resíduos versus a Ordem de Coleta

Uma análise gráfica para verificar a hipótese de independência dos resíduos pode ser feita por meio do gráfico dos resíduos versus a ordem da coleta dos dados. Se ao avaliar o gráfico, percebemos uma tendência dos pontos, ou seja, se os pontos tiverem um comportamento que se repete em determinado ponto do gráfico, temos indícios de dependência dos resíduos.

2.6.4.3.2 Teste de Durbin-Watson

O teste de Durbin-Watson é utilizado para detectar a presença de autocorrelação (dependência) nos resíduos de uma análise de regressão (MONTGOMERY et al., 2001; NETER et al., 2004). Este teste é baseado na suposição de que os erros no modelo de regressão são gerados por um processo autoregressivo de primeira ordem, de acordo com

$$\varepsilon_i = \rho\varepsilon_{i-1} + \alpha_i \quad (2.29)$$

em que ε_i é o termo do erro do modelo na i -ésima observação, $\alpha_i \sim N(0, \sigma_a^2)$ e ρ ($|\rho| < 1$) é o parâmetro de autocorrelação. Testamos a presença de autocorrelação por meio das hipóteses

$$H_0: \rho = 0$$

$$H_1: \rho \neq 0 \tag{2.30}$$

Sendo e_i o resíduo associado à i -ésima observação, temos que a estatística do teste de Durbin-Watson é dada por

$$dw = \frac{\sum_{i=2}^n (e_i - e_{i-1})^2}{\sum_{i=1}^n e_i^2} \tag{2.31}$$

em que $0 \leq dw \leq 4$. A distribuição de dw depende da matriz X . Entretanto, podemos tomar a decisão comparando o valor de dw com os valores críticos d_L e d_U da Tabela de Durbin-Watson (Tabela 5). Assim,

- se $0 \leq dw < d_L$ então rejeitamos H_0 (dependência);
- se $d_L \leq dw \leq d_U$ então o teste é inconclusivo;
- se $d_U < dw < 4 - d_U$ então não rejeitamos H_0 (independência);
- se $4 - d_U \leq dw \leq 4 - d_L$ então o teste é inconclusivo;
- se $4 - d_L < dw \leq 4$ então rejeitamos H_0 (dependência).

Quando $0 \leq dw < d_L$ temos evidência de uma correlação positiva. Já quando $4 - d_L < dw \leq 4$, a correlação é negativa. No caso em que não rejeitamos H_0 , temos que não existe autocorrelação, ou seja, os resíduos são independentes. Podemos também tomar a decisão pelo p -valor.

Os valores críticos tabelados apresentados na Tabela 5 são geralmente utilizados para testar $\rho = 0$ versus $\rho > 0$. Desta forma, se para um determinado α utilizarmos os valores da Tabela 5 para testar $\rho = 0$ versus $\rho \neq 0$, o erro tipo I do teste em questão será 2α .

Tabela 5 – Valores críticos do teste de Durbin-Watson.

n	Nível de significância	Número de variáveis explicativas									
		1		2		3		4		5	
		d _L	d _U	d _L	d _U	d _L	d _U	d _L	d _U	d _L	d _U
	0,01	0,81	1,07	0,7	1,25	0,59	1,46	0,49	1,7	0,39	1,96
15	0,025	0,95	1,23	0,83	1,4	0,71	1,61	0,59	1,84	0,48	2,09
	0,05	1,08	1,36	0,95	1,54	0,82	1,75	0,69	1,97	0,56	2,21
	0,01	0,95	1,15	0,86	1,27	0,77	1,41	0,63	1,57	0,6	1,74
20	0,025	1,08	1,28	0,99	1,41	0,89	1,55	0,79	1,7	0,7	1,87
	0,05	1,2	1,41	1,1	1,54	1	1,68	0,9	1,83	0,79	1,99
	0,01	1,05	1,21	0,98	1,3	0,9	1,41	0,83	1,52	0,75	1,65
25	0,025	1,13	1,34	1,1	1,43	1,02	1,54	0,94	1,65	0,86	1,77
	0,05	1,2	1,45	1,21	1,55	1,12	1,66	1,04	1,77	0,95	1,89
	0,01	1,13	1,26	1,07	1,34	1,01	1,42	0,94	1,51	0,88	1,61
30	0,025	1,25	1,38	1,18	1,46	1,12	1,54	1,05	1,63	0,98	1,73
	0,05	1,35	1,49	1,28	1,57	1,21	1,65	1,14	1,74	1,07	1,83
	0,01	1,25	1,34	1,2	1,4	1,15	1,46	1,1	1,52	1,05	1,58
40	0,025	1,35	1,45	1,3	1,51	1,25	1,57	1,2	1,63	1,15	1,69
	0,05	1,44	1,54	1,39	1,6	1,34	1,66	1,29	1,72	1,23	1,79
	0,01	1,32	1,4	1,28	1,45	1,24	1,49	1,2	1,54	1,16	1,59
50	0,025	1,42	1,5	1,38	1,54	1,34	1,59	1,3	1,64	1,26	1,69
	0,05	1,5	1,59	1,46	1,63	1,42	1,67	1,38	1,72	1,34	1,7

Fonte: Produzido pelo autor, 2014.

2.6.4.4 Diagnóstico de Outliers

Outlier é uma observação extrema, ou seja, é um ponto com comportamento diferente dos demais (MONTGOMERY et al., 2001; NETER et al., 2004). Além de diagnosticar heteroscedasticidade, o gráfico de resíduos versus valores ajustados também auxilia na detecção de pontos atípicos.

Se um outlier for influente, ele interfere sobre a função de regressão ajustada (a inclusão ou não do ponto modifica substancialmente os valores ajustados).

Mas uma observação ser considerada um outlier não quer dizer que conseqüentemente é um ponto influente. Por isso, um ponto pode ser um outlier em relação a Y ou aos X, e pode ou não ser um ponto influente.

A detecção de pontos atípicos tem por finalidade identificar:

- outliers com relação a X;
- outliers com relação a Y;
- observações influentes.

2.6.4.4.1 Outliers em X

Outliers em X são detectados por meio da matriz chapéu H.

Assim, h_{ii} é o i-ésimo elemento da diagonal principal da matriz H e também é chamado de leverage da observação i.

Além disso, h_{ii} pode ser calculado sem o cálculo completo da matriz H: $h_{ii} = x'_i(X'X)^{-1}x_i$, em que x'_i é a linha da matriz X correspondente à i-ésima observação.

Podemos identificar observações com alta leverage (outliers em X) das seguintes maneiras:

- Observar se há valores extremos de h_{ii} em um box-plot ou ramo e folhas do mesmo.
- Se a amostra não é grande, considerar h_{ii} grande se é maior que duas vezes a média dos h_{ii} . Como $\sum_{i=1}^n h_{ii} = \text{posto}(X) = p + 1$, a média dos h_{ii} é $(p + 1)/n$. É recomendado destacar as observações para as quais $h_{ii} > 2(p + 1)/n$.
- Indicar leverage muito alta se $h_{ii} > 0,5$, se a amostra for considerada grande.

2.6.4.4.2 Outliers em Y

Os resíduos brutos são definidos como $e_i = Y_i - \hat{Y}_i$. Entretanto, para uma melhor detecção em outliers em Y, eles foram melhorados.

Resíduos Padronizados

O resíduo padronizado, d_i , corresponde ao resíduo bruto dividido pelo erro padrão estimado dos resíduos, \sqrt{QMR} , conforme a Equação 2.32 (MONTGOMERY et al., 2001; NETER et al., 2004).

$$d_i = \frac{e_i}{\sqrt{QMR}} \quad (2.32)$$

Se os erros têm distribuição normal, então aproximadamente 95% dos resíduos padronizados (d_i) devem estar no intervalo de (-2 , 2). Resíduos fora desse intervalo podem indicar a presença de outliers.

Resíduos Studentizados

Existem inúmeras maneiras de se expressar o vetor de resíduos "e".

$$e = Y - \hat{Y} = Y - X\hat{B} = Y - HY = (I - H)Y \quad (2.33)$$

A matriz de covariâncias dos resíduos é,

$$Cov[e] = Cov[(I - H)Y] = (I - H)Var(Y)(I - H)' \quad (2.34)$$

$$Cov[e] = \sigma^2(I - H)(I - H)' \quad (2.35)$$

$$Cov[e] = \sigma^2(I - H) \quad (2.36)$$

Assim, definimos os resíduos studentizados por

$$r_i = \frac{e_i}{\sqrt{QMR(1-h_{ii})}}, \quad i = 1, 2, 3, \dots \quad (2.37)$$

com $\hat{\sigma}^2 = QMR$

Os resíduos studentizados têm variâncias constantes $Var(r_i) = 1$ o que conseqüentemente torna muito prática a procura por outliers, que são observações distantes das demais.

Qualquer observação fora do intervalo $-2 \leq r_i \leq 2$ deve ser analisada.

2.6.4.4.3 Pontos Influentes

Um ponto é influente se sua exclusão do ajuste da regressão causa uma mudança substancial nos valores ajustados (MONTGOMERY et al., 2001; NETER et al., 2004). Por isso, técnicas foram desenvolvidas para identificar essas observações influentes.

DFFITS

DFFITS mede a influência que a observação i tem sobre seu próprio valor ajustado (MONTGOMERY et al., 2001; NETER et al., 2004). Consideremos a medida

$$DFFITS_i = \frac{\hat{Y}_i - \hat{Y}_{i(i)}}{\sqrt{QMR_i h_{ii}}} \quad (2.38)$$

isto é, a diferença dos valores preditos de Y_i com e sem a observação i (se i está entre parênteses, significa que é sem essa observação), expressa em unidades de desvios padrões dos valores preditos de Y_i .

Assim, essa técnica mede o quanto a inclusão da observação i aumenta ou diminui seu valor predito.

Dizemos que um ponto outlier é influente segundo o DFFITS se

- $|DFFITS_i| > 1$, para amostras pequenas ou médias.
- $|DFFITS_i| > 2\sqrt{p/n}$, para amostras grandes.

DFBETA

DFBETA mede a influência da observação i sobre o coeficiente de X_j , (MONTGOMERY et al., 2001; NETER et al., 2004). É definido por

$$DFBETA_{j(i)} = \frac{\hat{B}_j - \hat{B}_{j(i)}}{\sqrt{QMR_i c_{jj}}} \quad j = 0, 1, \dots, p \quad (2.39)$$

em que c_{jj} é o j -ésimo elemento da diagonal de $(X'X)^{-1}$.

São consideradas observações influentes aquelas que

- $|DFBETA_i| > 1$, para amostras pequenas.
- $|DFBETA_i| > 2/\sqrt{n}$, para amostras grandes.

Distância de Cook

A distância de Cook mede a influência da observação i sobre todos n valores ajustados \hat{Y}_i , (MONTGOMERY et al., 2001; NETER et al., 2004). É definido por

$$D_i = \frac{e_i^2}{pQMR} \frac{h_{ii}}{(1-h_{ii})^2} \quad (2.40)$$

Percebemos que D_i é grande quando ou o resíduo e_i é grande, a leverage h_{ii} é grande ou ambos. Destacam-se as observações quando $D_i > 1$.

3 METODOLOGIA

As atividades de pesquisa foram desenvolvidas como atividade vinculada à Divisão de Arrecadação do DNPM/RS, no período de 2012 à 2014, através de vistorias de fiscalização e coleta de dados das empresas estudadas.

Para a escolha das empresas foi adotado como critério principal a garantia da responsabilidade das empresas pelos dados de dos respectivos planos de fogo, a julgamento do DNPM, e a existência dos mesmos durante um período de um ano. As informações foram referentes ao ano de 2012 ou 2013.

As três empresas selecionadas de produção de agregados estão situadas na região Nordeste do Rio Grande do Sul e lavram rochas da Formação Serra Geral. Apesar de diferenças nas condições geológicas das três pedreiras, a ser apresentado mais adiante, as características mecânicas de consistência e densidade das rochas, nestes locais, são aproximadas. Foi estudada também uma pedreira de granito (ígneia plutônica), a fim de realizar um estudo exploratório desta outra tipologia de rocha, muito utilizada na produção de agregados a título de comparação.

Como os dados foram obtidos de forma oficial, mediante solicitação do DNPM, não se divulgará, neste trabalho, a identificação das empresas e suas posições geográficas, de forma a resguardar o sigilo às informações técnicas das mesmas.

A metodologia contemplou o levantamento de dados técnicos em campo, coleta de informações e dados de controle de desmonte das empresas estudadas, e posterior organização e tratamento dos dados relevantes ao estudo.

3.1 Levantamento de dados

A coleta de informações e dados em campo observou os seguintes aspectos: ambiente geológico, frente de lavra, plano de fogo, dados de produção e dados de consumo de explosivos.

3.1.1 Ambiente Geológico

As informações geológicas consideradas relevantes a esta pesquisa compreenderam observações visuais das frentes de lavra e informações qualitativas

e quantitativas fornecidas pelas empresas ou de relatórios de pesquisa e planos de lavra. Estas informações dizem respeito às: características petrográficas e estruturais da rocha e do perfil geológico e as características de densidade da rocha e densidade aparente dos agregados.

A localização das pedreiras foi georreferenciado a fim de identificar regionalmente os respectivos ambientes geológicos. Para tanto utilizou-se o mapa geológico do RS em escala 1: 1.000.000 da CPRM (CPRM, 2006) e informações geológicas que por ventura as empresas tivessem.

Nas visitas em campo foram feitas observações qualitativas da frente de lavra, quanto à variabilidade dos padrões estruturais e homogeneidade do corpo rochoso.

3.1.2 Plano de Fogo – Método de Lavra

Para as pedreiras estudadas foram levantados os parâmetros de configuração do plano de lavra e modelo de plano de fogo utilizado para o desmonte. As três pedreiras apresentarem planos de lavra semelhantes, a Céu Aberto em bancadas, foram levantados os seguintes parâmetros:

- Número de bancadas e variações no aspecto geológico destas;
- Altura e inclinação das bancadas;
- Tamanho dos fragmentos maiores, e necessidade de serviços de quebra de matacões (condicionados pela boca do britador).

Os dados trabalhados nesta dissertação foram extraídos dos registros de planos de fogo e respectivos fogos executados. Os registros de detonação, que ficam arquivados na empresa, contém data e hora da detonação e os seguintes parâmetros:

- malha de furação (Afastamento, Espaçamento);
- quantidade de furos;
- diâmetro dos furos;
- profundidade do furo;
- sub-furação;
- inclinação dos furos;
- tipo de explosivo (densidade do explosivo);
- razão de carga;

- consumo de explosivo;
- volume desmontado (densidade da rocha);
- registros de fogos falhados;
- acessórios.

Estas informações acrescidas das condições distintas, observações sobre as bancadas de cada pedreira, permitiram avaliar o ajuste dos modelos dos planos de fogo.

Os registros abrangeram o período mínimo de um ano para cada mina:

- Mina “A”: dados do período de agosto de 2011 a julho de 2012;
- Mina “B”: dados do período de setembro de 2011 a agosto de 2012;
- Mina “C”: dados do período de fevereiro de 2011 a junho de 2012;
- Mina “D”: dados do período de abril de 2013 a março de 2014.

3.1.3 Produção de agregados

A informação de produção de agregados será aquela contida nos bancos de dados do DNPM, que são prestadas pelas empresas na elaboração dos Relatórios Anuais de Lavra (RAL). Esta produção será comparada com a massa (toneladas) de rocha desmontado.

Para os cálculos de transformação de volume em massa de rocha e brita utilizou-se os valores de conversão informados pela empresa nos respectivos processos, ou quando informado na planilha dos planos de fogo ou nas informações dos RALs, conforme Tabela 6:

Tabela 6 – Densidades da rocha das pedreiras estudadas

Pedreira	Tipo de Rocha	Densidade (g/cm ³)
A	Basalto	2,55
B	Basalto	2,45
C	Basalto	2,54
D	Granito	2,63

Fonte: DNPM - Processos minerários

Apesar do estudo de correlação ser realizado, em um primeiro momento, relacionando o consumo de explosivos com a massa desmontada, é importante verificar o grau de variação destes valores com os valores de produção de agregados em toneladas. Os valores de produção foram extraídos dos respectivos RALs apresentados ao DNPM.

3.2 Tratamento dos dados

As informações dos planos de fogo foram tabuladas em planilhas Excel onde o volume de rocha desmontada foi transformado em massa de rocha desmontada, adotando o valor de densidade constante nos respectivos processos minerários do DNPM. O valor da massa em tonelada de rocha desmontada foi calculado a partir do volume cubado no plano de fogo e/ou do volume efetivamente desmontado. Foi também calculada a Razão de Carga para cada pedreira. A Razão de Carga nada mais é que a razão de explosivo gasto para um determinado volume de rocha desmontada (kg/m^3).

A planilha com os dados completos permitiu, estabelecer as variáveis do plano de fogo que possam ser consideradas intervenientes ou controladoras da correlação a ser estudada. Construiu-se também uma planilha contendo os dados de volume e massa desmontada e de produção total de agregados.

A partir das planilhas geradas e tomando como base de avaliação a razão de carga de cada pedreira, foram avaliados os dados levando em conta a Estatística Descritiva (medidas de tendência central e medidas de dispersão). Para esta análise foi utilizado o gráfico Box-Plot e o gráfico de intervalo de confiança para as médias das pedreiras A, B, C e D.

Foi feito também uma análise de variâncias (ANOVA) das pedreiras A, B e C, que trabalham com basalto. Esta análise tem por objetivo verificar se existe diferença significativa entre os dados das respectivas pedreiras. Foi aplicado também um teste de Comparação Múltipla de Médias, neste caso foi aplicado o Teste Estatístico de TUKEY. O processamento dos dados foi feito em programa Excel, utilizando o software Action 2.7.

3.3 Estudo de correlação

Escolheu-se inicialmente analisar a correlação simples entre a variável, consumo de explosivo e a massa de rocha desmontada. Optou-se somente pelo consumo de explosivos, desconsiderou-se os acessórios, como cordéis, estopins e espoletas e outras variáveis, ou seja optando somente pela razão de carregamento.

As informações que continham os resultados da execução dos planos de fogo foram analisadas quanto a possíveis falhas de execução ou valores discrepantes do

padrão (outliers), que podem implicar em pontos de correlação fora da tendência observada para os demais.

O processamento dos dados foi feito em programa Excel, utilizando o software Action 2.7, o qual permite determinar a reta de tendência da função de correlação e o cálculo do coeficiente de determinação (R^2). O software Action permite também fazer uma análise do modelo de regressão, bem como uma análise de resíduos do modelo proposto.

4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A revisão bibliográfica buscou apresentar, de forma geral, o conjunto de aspectos e parâmetros a serem observados na condução de um desmonte de rocha utilizando explosivos. Neste, estudo da correlação entre o consumo de explosivo e produção de brita, apenas foram considerados dois aspectos: o plano de fogo que quantificará a relação consumo de explosivos e produção de brita e secundariamente a qualificação do maciço rochoso.

Preliminarmente serão feitas considerações qualitativas sobre os aspectos geológicos, quanto à condição estrutural da rocha e sua composição litológica. Após, será apresentado os resultados das análises estatísticas dos dados coletados das pedreiras A, B, C e D. Serão analisados os parâmetros de consumo de explosivos, razão de carga (de explosivo) e produção de rocha e avaliada suas correlações.

4.1 Condições geológicas das pedreiras

As quatro pedreiras estudadas apresentam configurações de frente de lavra em bancadas, com alturas variando de 06 a 12 m (Tabela 7), e características visuais da estrutura dos maciços rochosos observadas nas Figuras 12, 13, 14 e 15. Informações técnicas obtidas dos processos minerários e pela posição da pedreira no mapa geológico do Rio Grande do Sul (Mapa Geológico do Estado do Rio Grande do Sul, 1:750. 000- CPRM Serviço Geológico do Brasil, Superintendência regional Porto Alegre, 2006), as três pedreiras de rocha vulcânicas, comercialmente denominadas de basalto, são de rochas vulcânicas ácidas classificadas como Dacito.

Tabela 7 – Configuração das bancadas das frentes de lavra das pedreiras estudadas

Pedreira	Nº de Bancadas	Altura média da bancada (m)	Observações: tipo de rocha e faturamento
A	2	6,0	Basalto baixo fraturamento de padrão irregular.
B	4	12,0	Dacito, muitas discontinuidades e alto padrão de faturamento, inclinado e transversal a face da bancada.
C	3	9,0	Basalto, baixo faturamento de padrão irregular.
D	2	12,0	Granito, baixo fraturamento de padrão irregular.

Fonte: Produzido pelo autor, 2014.

As alturas de bancadas apresentadas reproduzem o padrão conhecido pelo DNPM, para a maioria das pedreiras, no Rio Grande do Sul. Portanto, todas podendo contar com técnicas normais de operação de desmonte.

A característica de fraturamento indicado na Tabela 4, pode ser observado na série de fotografias das quatro pedreiras (figuras 12, 14, 16 e 18), mostrando uma foto geral do modelo de avanço de lavra em bancadas e uma foto de detalhe do maciço, com suas feições estruturais.

A Pedreira “A” estava sendo desenvolvida na bancada superior, Figura 12.

Figura 12 – Vista da frente de avanço de lavra da Pedreira “A”



Fonte: Fotografias reproduzidas pelo autor, 2014.

No detalhe observa-se um fraturamento irregular, com padrão uniforme, tipo conchoidal em algumas zonas, apresentando baixa densidade de estruturas, mostrando estruturas verticais e uma faixa horizontal cortando o maciço.

Figura 13 – Vista em detalhe do maciço da Pedreira “A” (rocha vulcânica)



Fonte: Fotografias reproduzidas pelo autor, 2014.

Figura 14 – A Pedreira “B” (vista geral da pedreira)



Fonte: Fotografias reproduzidas pelo autor, 2014.

Figura 15 – Detalhe do sistema de fraturas da pedreira B



Fonte: Fotografias reproduzidas pelo autor, 2014.

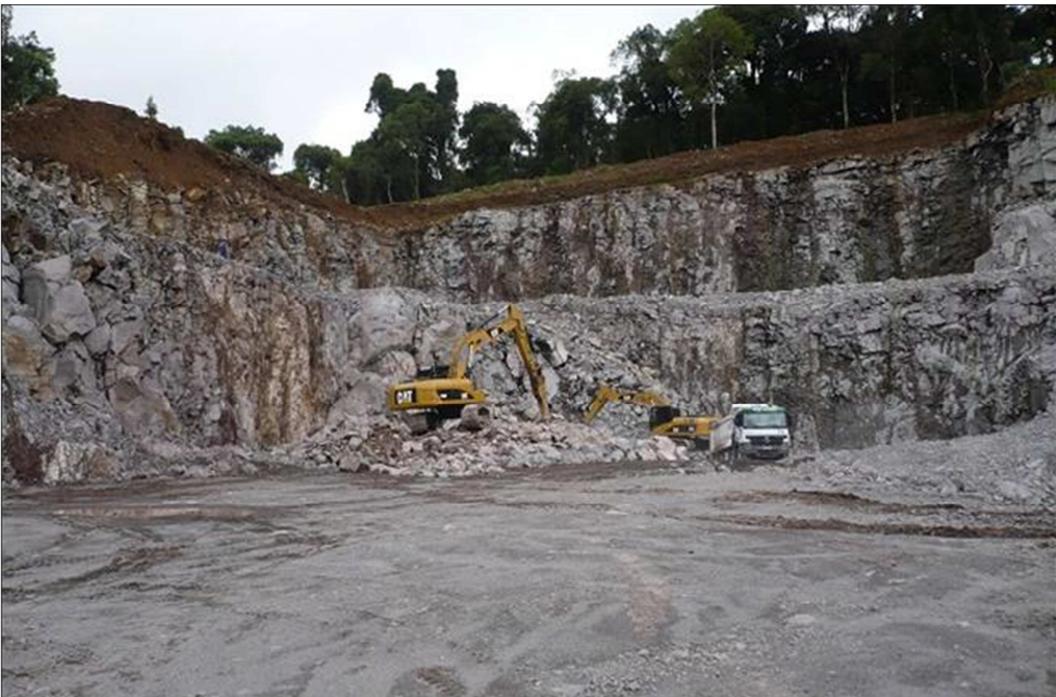
São rochas com cores predominantes cinza a cinza escuro, quando intemperizadas tons acastanhados. A granulação é fina a afanítica, raramente porfiríticas com estrutura variando de amigdaloidal a maciço.

É comum o paralelismo entre o plano de fraturas sub-horizontais, podendo ocorrer deslizamentos de blocos. Os níveis que apresentam uma diferença textural. Apresentam uma estrutura definida por um plano de disjunção sub vertical, com fraturamento pouco espaçado. É comum a formação de blocos “matacão”.

Figura 16 – Pedreira “C” (a)



Figura 17 – Pedreira “C” (b)



Fonte: Fotografias reproduzidas pelo autor, 2014.

Na área desta mina foram observados na zona intermediária e superior essencialmente litológicas pertencentes ao grupo de rochas vulcânicas de

composição ácidas representadas por riodacitos. Há porções com estrutura maciça, homogênea afanítica. Em algumas partes há formação de blocos “matacão”.

Figura 18 – Pedreira “D”



Fonte: Fotografias reproduzidas pelo autor, 2014.

Figura 19 – Vista geral da pedreira “D”



Fonte: Fotografias reproduzidas pelo autor, 2014.

Observam-se rochas de tonalidade rosada, granulação média a grosseira, constituídas principalmente por quartzo e feldspato. Em algumas porções há espaçamento que variam de 5 a 10 cm. Há padrões de fraturas sub horizontais, de formas planares. Em algumas partes da mina ocorre a formação de “matacão”.

4.2 Planos de Fogo

As quatro pedreiras utilizam a mesma sistemática de planejamento e execução do desmonte. O plano de fogo e a execução da furação são realizados por técnicos da empresa ou contratados para este fim, de forma a atender ao planejamento de produção. Já, o serviço de execução do carregamento do explosivo, conexão da malha e retardos planejados é contratada empresa terceirizada. Portanto, não há guarda de material explosivo em paióis das empresas estudadas.

Os registros dos planos de fogo executados durante o período de um ano, para cada pedreira estudada, são apresentados de forma completa no Apêndice A. Os registros de dados identificados como erro de preenchimento foram excluídos, o que implicou em alguns casos na desconsideração de todas as informações sobre um desmonte.

As informações utilizadas neste estudo para correlacionar a variável dependente, massa desmontada e respectiva produção de agregado, e a variável independente, massa da carga explosiva, estão apresentadas na Tabela 8, que se completa com as variáveis secundárias: razão de carregamento e tipo de explosivo; e variáveis intervenientes: malha de furação (ou densidade da malha – m^3 / furo), altura da bancada e padrão de fraturamento. A massa desmontada foi calculada a partir do volume cubado e; ou executado do desmonte e a densidade estabelecida para cada rocha.

Além do padrão de fraturas destacado no item anterior se observa diferenças e semelhanças nos planos de fogo das quatro pedreiras.

Tabela 8 – Variáveis extraídas dos planos de fogo utilizadas no estudo, acrescida da observação do grau de fraturamento, observado em campo

Pedreira	Volume desmontado	Massa desmontada	Massa de explosivo	Tipo de explosivo	Densidade do explosivo	Razão de carga	Malha de furação	Altura da bancada	Padrão de fraturamento	Densidade Rocha	Período Observado
	m ³	ton.	Kg.		g/cm ³	kg/m ³	metros	metros		g/cm ³	
A	45.555,17	116.166,00	21.775,00	Encartuchado : 70%	1,25	0,48	E:1,6	6,00	Basalto; baixo, irregular	2,55	05/08/2011 a 24/07/2012
				Granulado: 30%			A:3,0				
B	87.803,39	223.900,00	46.925,00	Encartuchado : 70%	1,25	0,57	E: 1,8	12,00	Basalto; Alto, irregular, descontínuo	2,45	07/02/2011 a 28/03/2012
				Granulado: 30%			A:3,4				
C	51.848,00	132.212,00	26.122,00	Encartuchado : 70%	1,25	0,50	E: 2,0	9,00	Basalto, baixo, irregular	2,54	02/09/2011 a 27/08/2012
				Granulado: 30%			A: 4,0				
D	356.391,00	937.308,00	205.350,00	Bombeado: 100%	1,18	0,58	E: 2,1	12,00	Granito; baixo, irregular	2,63	28/03/2013 a 05/05/2014
							A: 3,8				

Fonte: Produzido pelo autor, 2014.

Pedreira “A”

Rocha vulcânica, na maioria dos casos o explosivo utilizado foi Encartuchado (70%) e o Granulado (Anfo, 30%). A altura da bancada foi de 6 metros, o Diâmetro dos furos foi de 60 mm, o número médio de furos em cada detonação foi de 55, praticamente verticais. A malha de perfuração de 4,8 m². A metragem perfurada média de 404 m. O total de explosivo utilizado foi de 21.900 kg. O volume total de rocha desmontado foi de 45.555 m³. A razão de carga média foi de 0,49kg/m³.

Pedreira “B”

Rocha vulcânica, na maioria dos casos o explosivo utilizado foi Encartuchado (70%) e o Granulado (Anfo, 30%). A altura da bancada foi de 12 metros, o Diâmetro dos furos foi de 60 mm, o número médio de furos em cada detonação foi de 49, com inclinação de 38°. A malha de perfuração de 5,5 m². A metragem perfurada média de 604 m. O total de explosivo utilizado foi de 102.075 kg. O volume total de rocha desmontado foi de 197.195 m³. Nesta pedreira é comum a ocorrência de deslizamentos. A Razão de carga média foi de 0,52 k/m³.

Pedreira “C”

Rocha vulcânica, na maioria dos casos o explosivo utilizado foi Encartuchado (70%) e o Granulado (Anfo, 30%). A altura da bancada foi de 9 metros, o Diâmetro dos furos foi de 60 mm, o número médio de furos em cada detonação foi de 35, praticamente verticais. A malha de perfuração de 8,0 m². A metragem perfurada média de 319 m. O total de explosivo utilizado foi de 24.112 kg. O volume total de rocha desmontado foi de 49.500 m³. a razão de carga média foi de 0,49 kg/m³.

Pedreira “D”

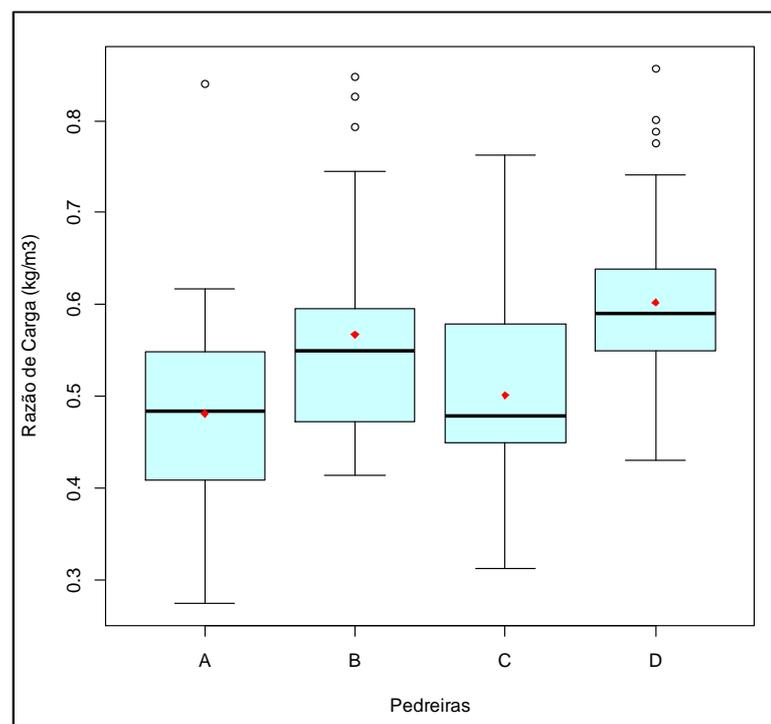
Rocha granítica, o explosivo utilizado foi bombeado (100%). A altura da bancada foi de 12 metros, o Diâmetro dos furos foi de 60 mm, o número médio de furos em cada detonação foi de 120, com inclinação de 12°. A malha de perfuração de 8,0m². A metragem perfurada média de 1.350 m. O total de explosivo utilizado foi

de 205.350 kg. O volume total de rocha desmontado foi de 356.391 m³. A razão de carga média foi de 0,58kg/m³.

4.3 Tratamento dos Dados

Inicialmente, foi feita uma análise descritiva dos dados das Pedreiras A, B, C e D, que facilita a interpretação dos mesmos e a aplicação do modelo da ANOVA. Diversos gráficos podem auxiliar na apresentação dos dados, a Figura 20 mostra um dos gráficos mais utilizados: o Box-Plot. O Box-Plot é um gráfico que possibilita representar a distribuição de um conjunto de dados com base em alguns de seus parâmetros descritivos: a média, a mediana, o primeiro quartil e o terceiro quartil.

Figura 20 – Gráfico Box-Plot das Pedreiras A, B, C e D.



Fonte: Produzido pelo autor, 2014.

Os resultados apresentados na Figura 20 nos mostram que as alturas das hastes apresentam um comportamento com distribuição aproximadamente normal para ambas as pedreiras. A Pedreira A, apresenta uma medida discrepante para a razão de carga de 0,841 kg/m³ (outlier), com relação aos demais. A média (ponto vermelho) e a mediana (linha central) ficam em 0,481 e 0,483 kg/m³, respectivamente. A distribuição varia entre 0,274 e 0,616 kg/m³.

A Pedreira B apresenta medidas discrepantes para a razão de carga de 0,847; 0,826 e 0,793 kg/m³ (outliers), com relação aos demais. A média e a mediana ficam em 0,567 e 0,549 kg/m³, respectivamente. A distribuição varia entre 0,414 e 0,745 kg/m³.

A Pedreira C, não apresenta medidas discrepantes para a razão de carga, com relação aos demais. A média e a mediana ficam em 0,501 e 0,478 kg/m³, respectivamente. A distribuição varia entre 0,312 e 0,763 kg/m³.

A Pedreira D apresenta medidas discrepantes para a razão de carga de 0,847; 0,826 e 0,793 kg/m³ (outliers), com relação aos demais. A média e a mediana ficam em 0,567 e 0,549 kg/m³, respectivamente. A distribuição varia entre 0,414 e 0,745 kg/m³.

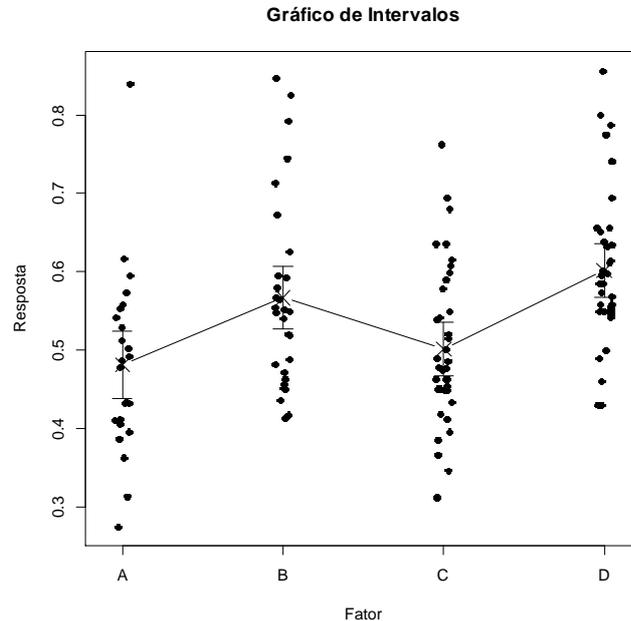
O gráfico de intervalo de Confiança das Médias também foi utilizado para análise dos dados. Foram calculados a média e o desvio padrão para cada Pedreira e com isso, obtido o desvio padrão agrupado. Na sequência, foi utilizada a distribuição *t-student* para construir o intervalo de confiança para a média de cada Pedreira.

Tabela 9 – Intervalo de confiança para a Média das Razões de Carga das pedreiras A, B, C e D.

<i>Pedreiras</i>	<i>Média</i>	<i>Desvio Padrão</i>	<i>Limite Inferior</i>	<i>Limite Superior</i>
A	0,481229914	0,107695742	0,437722232	0,524737595
B	0,566979959	0,107695742	0,527400253	0,606559665
C	0,501205725	0,107695742	0,466629326	0,535782124
D	0,601845065	0,107695742	0,567268665	0,636421464

Fonte: Produzido pelo autor, 2014.

Figura 21 – Gráfico de Intervalo de confiança para a Média das Razões de Carga das pedreiras A, B, C e D.



Fonte: Produzido pelo autor, 2014.

No Figura 21, e também na Tabela 9, temos a média de cada pedreira e os respectivos intervalos de confiança. Vemos que as quatro pedreiras se diferenciam com relação à razão de carga que apresentam, uma vez que a pedreira D trabalha com granito. Entre as pedreiras A, B e C que trabalham com basalto, observa-se também uma diferença já que a pedreira B possui resultados relativamente superiores aos demais. A provável causa desta diferença deve estar correlacionada com diversos fatores vinculados com a geologia de cada jazida. Embora as pedreiras A, B e C serem da mesma substância, basalto, pode haver anomalias na frente de lavra, como descontinuidades, fraturas, presença de água, ocorrência de alguma intrusão de rocha de outro tipo com maior resistência.

4.3.1 ANOVA

Para avaliar se existe diferença significativa entre as pedreiras A, B e C na produção de massa de basalto, foi aplicado a ANOVA (Análise de Variâncias). A Tabela 10 apresenta os resultados obtidos. Como o p-valor é menor ao nível de significância ($\alpha = 0,05$) pré-determinado, isto significa que existe diferença significativa entre as pedreiras. Neste caso, rejeitamos a hipótese nula de igualdade entre as pedreiras A, B e C.

Tabela 10 – Resultados da ANOVA para as pedreiras A, B e C.

Tabela da Anova					
	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P-valor
Pedreiras	2	0,112628377	0,056314188	4,465901362	0,0142
Resíduos	88	1,10966369	0,012609815		

Fonte: Produzido pelo autor, 2014.

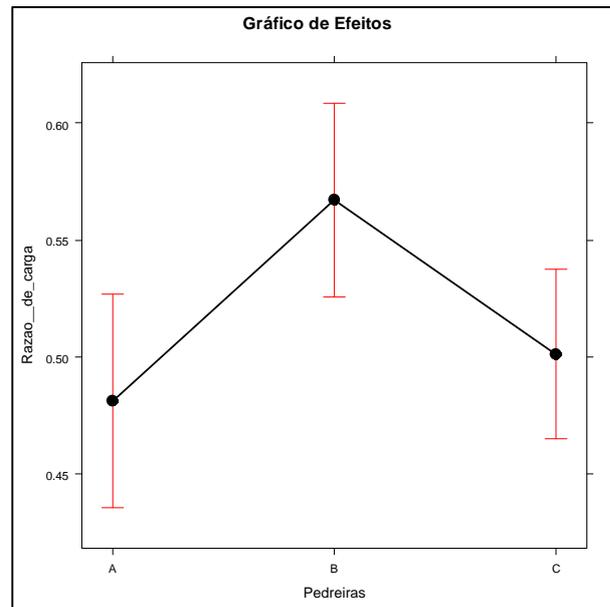
A Tabela 11 apresenta os resultados para o intervalo de confiança para os efeitos de cada pedreira. A Figura 22 mostra o gráfico de efeitos bem como o intervalo de confiança para os efeitos.

Tabela 11 – Intervalo de confiança dos Efeitos para as pedreiras A, B e C.

	Limite Inferior	Efeito	Limite Superior
A	0,435677652	0,481229914	0,526782176
B	0,525540262	0,566979959	0,608419656
C	0,465004458	0,501205725	0,537406992

Fonte: Produzido pelo autor, 2014.

Figura 22 – Gráfico de Efeitos para as pedreiras A, B e C.

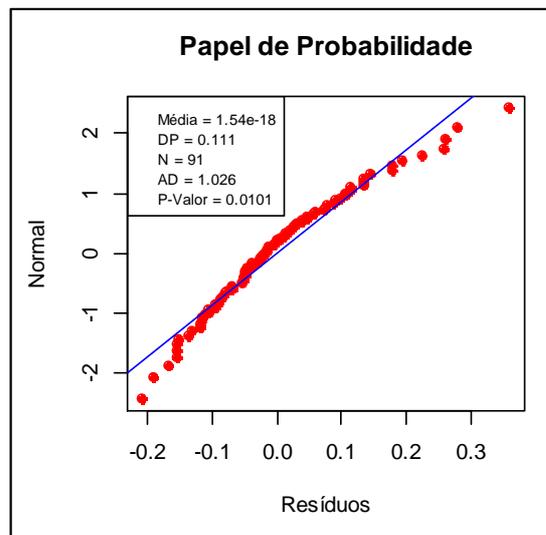


Fonte: Produzido pelo autor, 2014.

Na sequência, foi feita a análise de normalidade, independência e igualdade da variância dos resíduos. Grande parte dos problemas que encontramos na prática são solucionados, considerando algumas suposições iniciais, tais como, assumir uma função de distribuição para os dados amostrados. Nesse sentido, surge a necessidade de certificarmos se essas suposições podem, realmente, ser assumidas.

Foi avaliada a normalidade dos resíduos através do gráfico "papel de probabilidade" e do teste de Anderson-Darling (Figura 23). Neste caso, foi tomada como hipótese nula a normalidade dos resíduos, e utilizado a estatística de Anderson-Darling para testar esta hipótese. Podemos observar que o p-valor é baixo (aproximadamente 0,01) neste caso rejeitamos a hipótese de normalidade dos resíduos.

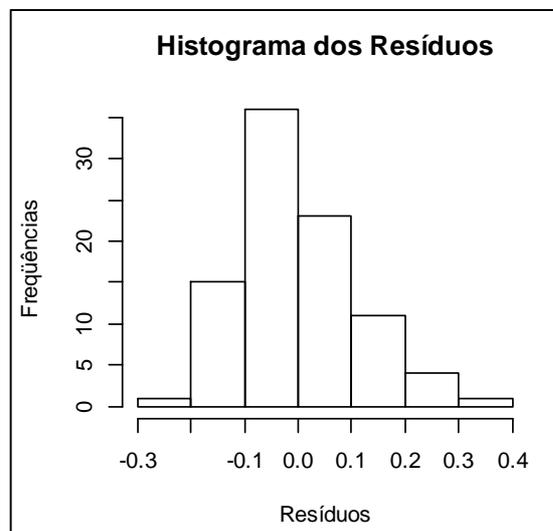
Figura 23 – Papel de Probabilidade do Teste Anderson-Darling para as pedreiras A, B e C.



Fonte: Produzido pelo autor, 2014.

Também foi feito um gráfico de histograma dos resíduos para avaliar sua dispersão e distribuição. A Figura 24 mostra os resultados do gráfico de histograma.

Figura 24 – Histograma de Resíduos versus frequências para as pedreiras A, B e C.

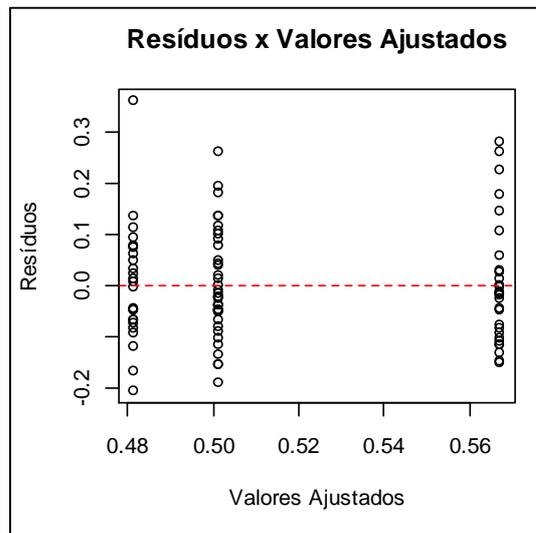


Fonte: Produzido pelo autor, 2014.

Pode-se observar pelo gráfico, que os resíduos possuem uma distribuição levemente assimétrica à esquerda.

Para avaliar a hipótese de homoscedasticidade dos resíduos foi plotado um gráfico de resíduos x valores ajustados pelo modelo (Figura 25), com esse gráfico temos indícios sobre o comportamento da variância dos resíduos com relação aos valores ajustados.

Figura 25 – Gráfico de Resíduos versus Valores Ajustados para as pedreiras A, B e C.

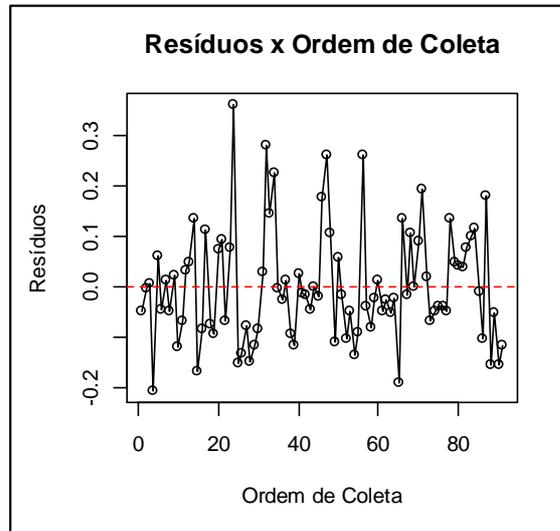


Fonte: Produzido pelo autor, 2014.

Na Figura 25 verificamos a homoscedasticidade dos dados onde a hipótese inicial para construção do modelo é de que os erros são homoscedásticos. O critério para a análise é que quanto mais aleatório os pontos do gráfico maior o índice de homoscedasticidade. Por outro lado, se o gráfico apresentar uma tendência, geralmente em forma de cone, temos um indicativo de heteroscedasticidade. Nesse caso, temos indicio de homoscedasticidade.

Foi analisada também a independência dos resíduos, outro pressuposto do modelo. Neste caso, foi elaborado o gráfico dos Resíduos versus a Ordem de Coleta dos dados. Com esse gráfico obtemos indícios da independência ou não entre os resíduos. Se algum comportamento sistemático for observado no gráfico, temos indícios de que alguma variável "extra" influenciou nos resultados do experimento, fato que viola uma das premissas básicas da ANOVA. A Figura 26 mostra a independência dos resíduos.

Figura 26 – Gráfico de Resíduos versus Ordem de Coleta para as pedreiras A, B e C.



Fonte: Produzido pelo autor, 2014.

4.3.2 Teste TUKEY

Um problema muito comum é comparar diversos tratamentos para determinar quais, eventualmente, produzem um resultado superior. Os Métodos de Comparações Múltiplas (MCMs) são procedimentos estatísticos designados para ter em conta e controlar o aumento da probabilidade global do Erro do Tipo I ou a diminuição do intervalo de confiança global. Os MCMs podem ser categorizados como "etapa única" (single step) ou "por etapas" (stepwise). Para os procedimentos de uma etapa, cada uma das inferências é realizada em uma única etapa, sem referência às outras inferências na família. Exemplos de MCMs de uma etapa incluem o Teste de Tukey (dados balanceados). A Tabela 12 apresenta os resultados da Análise ANOVA para o teste de Tukey.

Tabela 12 – Resultados da ANOVA do teste de Tukey para as pedreiras A, B e C.

<i>Tabela da Anova</i>					
	<i>G.L.</i>	<i>Soma de Quadrados</i>	<i>Quadrado Médio</i>	<i>Estat. F</i>	<i>P-valor</i>
Fator	2	0,112628377	0,056314188	4,465901362	0,014214148
Resíduos	88	1,10966369	0,012609815		

Fonte: Produzido pelo autor, 2014.

Os resultados apresentados na Tabela 12 mostram um p-valor = 0,014 ($\alpha=0,05$) confirmando a hipótese alternativa de que existe diferença entre as

pedreiras. A Tabela 13 apresenta os valores das diferenças entre médias das pedreiras, bem como os limites do intervalo de confiança para a média.

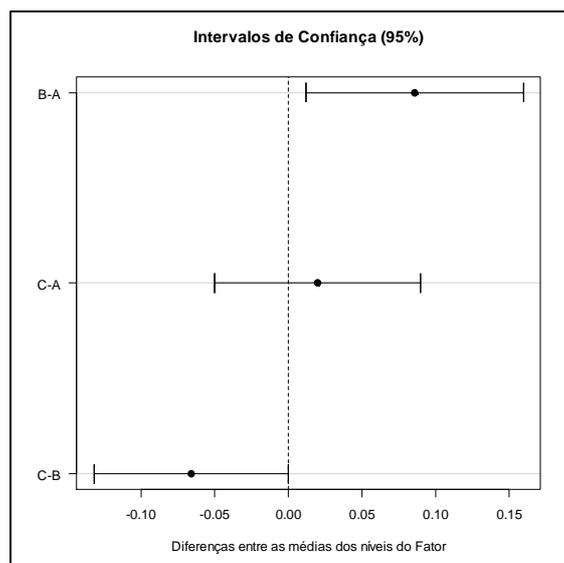
Tabela 13 – Intervalo de confiança para a diferença das médias das Razões de Carga para as pedreiras A, B e C.

<i>Níveis</i>	<i>Centro</i>	<i>Limite.Inferior</i>	<i>Limite.Superior</i>	<i>P-valor</i>
B-A	0,08575004	0,011875357	0,159624733	0,018712024
C-A	0,01997581	-0,049825049	0,089776671	0,774424803
C-B	-0,06577423	-0,131784115	0,000235647	0,051033238

Fonte: Produzido pelo autor, 2014.

O teste de Tukey avalia a igualdade entre os níveis, então é um teste de hipóteses. Como pode ser observado na Tabela 13, nos resultados vemos que a hipótese de igualdade é rejeitada entre os níveis A-B, pois estes têm o p-valor $< 0,05$. Para o nível C-A a hipótese de igualdade não é rejeitada, pois estes têm o p-valor $> 0,05$. Para o nível C-B temos o p-valor = 0,051, não temos informações suficientes para aceitar a hipótese alternativa de que existe diferença entre as médias. Desta forma concluímos que ao considerarmos um nível de significância de 5%, rejeitamos a hipótese de igualdade entre as médias dos níveis (C-B). A Figura 27 mostra o gráfico do intervalo de confiança para a diferença das médias com um nível de confiança de 95%.

Figura 27 – Intervalos de Confiança para as médias das razões de carga das pedreiras A, B e C.



Fonte: Produzido pelo autor, 2014.

Como pode ser visto na Figura 27, outra forma de se avaliar se existe ou não a igualdade entre os níveis é utilizando os intervalos de confiança e o gráfico, se o valor "zero", pertence ao intervalo de confiança não rejeitamos a hipótese de igualdade entre os níveis. Neste caso podemos afirmar que existe igualdade entre as médias dos níveis C-A.

4.4 Correlação do consumo de explosivo e produção das pedreiras

Serão apresentados os MRLs para as três pedreiras de rocha vulcânica (basaltos), minimizando o efeito da densidade da rocha, uma vez que a densidade média das rochas vulcânicas é de 2,51 g/cm³ com desvio padrão de 0,055 g/cm³, menor que a densidade da rocha granítica de 2,63 g/cm³ (Tabela 6, metodologia). Na sequência será apresentado o MRL para a pedreira de granito.

4.4.1 Modelo de Regressão Linear para a Pedreira A

A Tabela 14 apresenta os resultados da análise de variância os coeficientes do modelo de regressão. Adotando um nível de significância $\alpha = 5\%$, temos na Tabela 14 (Tabela da Anova) que o p-valor $< 0,05$ indicando que os coeficientes $\beta_n \neq 0$. Portanto, concluímos com um nível de confiança de 95% que os coeficientes obtidos para o MRL são significantes. Pode-se inferir que o modelo proposto é adequado para descrever o processo e a variável explicativa (massa de explosivo) tem relação linear com a variável resposta (massa de basalto).

Tabela 14 – Tabela ANOVA para o MRL da Pedreira A.

<i>Tabela da Anova</i>					
<i>Fatores</i>	<i>G.L.</i>	<i>Soma de Quadrados</i>	<i>Quadrado Médio</i>	<i>Estat. F</i>	<i>p-valor</i>
Explosivo	1	82914538	82914538	78,59216339	1,03013E-08
Resíduos	22	23209945,59	1054997,527		

Fonte: Produzido pelo autor, 2014.

Na Tabela 15 são apresentados os resultados obtidos para os coeficientes para o MRL da pedreira A. Temos as estimativas do intercepto (coeficiente linear) e do coeficiente relacionado à variável de entrada (massa de explosivos). Como o coeficiente da variável de entrada é positivo, concluímos que no intervalo da análise, um aumento na massa de explosivo provoca aumento na massa de basalto

desmontada. A Tabela 15 apresenta também os p-valores para cada coeficiente, em que a hipótese nula H_0 é que o coeficiente é não significativo. Como os valores são muito pequenos (aproximadamente 0), rejeitamos a hipótese nula para os coeficientes, indicando que eles são importantes (significativos) para o modelo.

Tabela 15 – Tabela de Coeficientes para o MRL da Pedreira A.

<i>Coeficientes</i>				
<i>Preditor</i>	<i>Estimativa</i>	<i>Desvio Padrão</i>	<i>Estat.t</i>	<i>P-valor</i>
Intercepto	1120,584467	469,0457813	2,389072691	0,025896933
Explosivo	4,099731632	0,46245109	8,865222129	1,03013E-08

Fonte: Produzido pelo autor, 2014.

A Tabela 16 apresenta os resultados encontrados para o coeficiente de determinação R^2 e o R^2 Ajustado em que podemos ter uma ideia da qualidade do ajuste do modelo de regressão. Quanto mais próximo do valor 1, melhor. Os resultados mostram e o R^2 Ajustado foi de 0,77, este valor nos dá indícios de que o conjunto de dados da pedreira A apresentam forte correlação linear.

Tabela 16 – Tabela de Coeficientes de Determinação para o MRL da Pedreira A.

<i>Desvio Padrão dos Resíduos</i>			
<i>Desvio Padrão dos Resíduos</i>	<i>Graus de Liberdade</i>	R^2	R^2 Ajustado
1027,130725	22	0,78129509	0,771353958

Fonte: Produzido pelo autor, 2014.

A Figura 28 apresenta um gráfico de dispersão dos dados da Pedreira A, bem como o MRL obtido a partir dos dados.

O R^2 é uma medida descritiva da qualidade do ajuste obtido. Como obtemos um R^2 de 0,78, logo a quantidade de variabilidade dos dados é fortemente explicada pelo modelo de regressão ajustado.

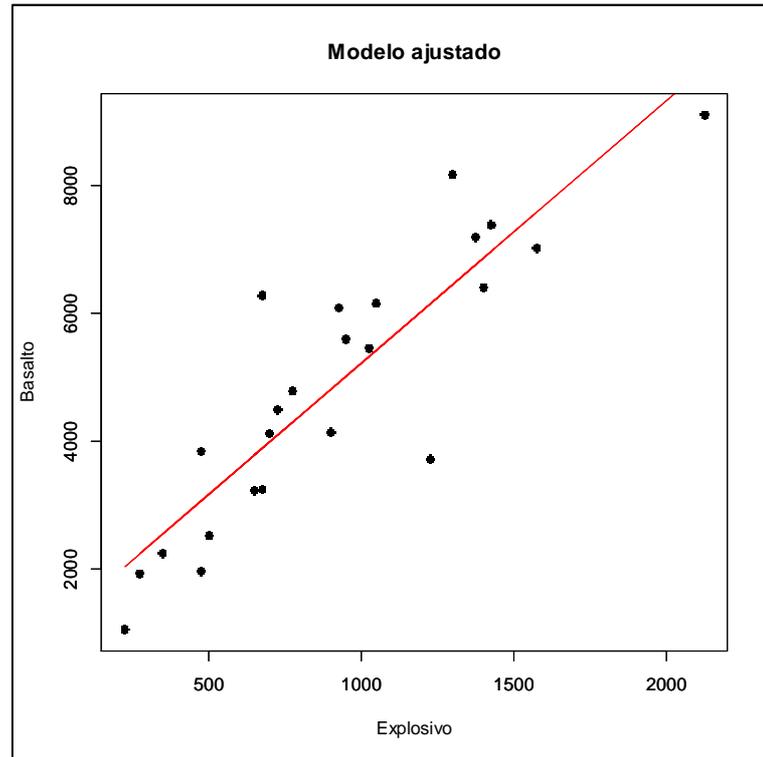
A Tabela 17 mostra os resultados encontrados para os intervalos de confiança dos coeficientes do modelo de regressão linear para a Pedreira A.

Tabela 17 – Tabela de Intervalos de Confiança para os Coeficientes do MRL da Pedreira A.

<i>Intervalo de confiança</i>		
	2,50%	97,50%
(Intercept)	147,8430534	2093,32588
Explosivo	3,140666773	5,058796492

Fonte: Produzido pelo autor, 2014.

Figura 28 – Gráfico de dispersão dos dados da Pedreira A e o MRL ajustado.



Fonte: Produzido pelo autor, 2014.

A Tabela 17 apresenta os valores dos limites inferiores e superiores do intervalo de confiança para as estimativas do modelo de regressão. Os valores apresentados foram obtidos tomando como base um nível de confiança de 95%.

4.4.1.1 Análise de Diagnóstico

4.4.1.1.1 Teste de Normalidade dos Resíduos

Para testar as suposições do MRL, foi realizada a análise de diagnósticos. Sendo assim, a primeira análise de diagnósticos é o teste de normalidade. A partir do software Action 2.7, obtemos os seguintes resultados:

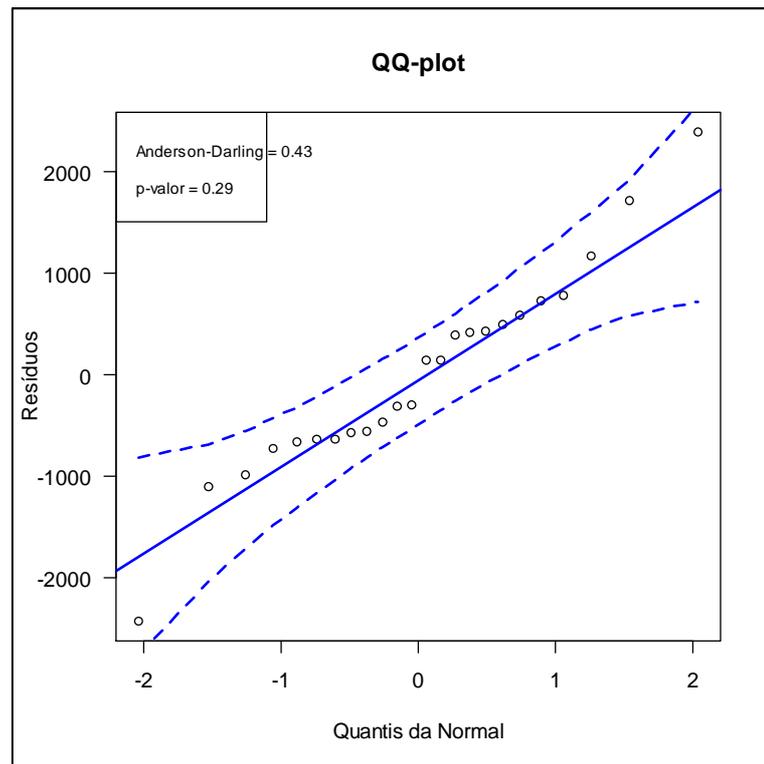
Tabela 18 – Teste de normalidade dos resíduos para o MRL dos dados da pedreira A.

<i>Teste de Normalidade</i>		
	<i>Estatística</i>	<i>p-valor</i>
Anderson-Darling	0,426991038	0,288449934
Shapiro-Wilk	0,963295698	0,5081194
Kolmogorov-Smirnov	0,117718138	0,528190236
Ryan-Joiner	0,974548792	0,2276

Fonte: Produzido pelo autor, 2014.

A Tabela 18 apresenta os resultados dos testes estatísticos de Anderson-Darling, Shapiro-Wilk, Kolmogorov-Smirnov e Ryan-Joiner. Como pode ser observado os p-valores obtidos para ambos os testes foram maiores que 5%. Sendo assim, pelos resultados obtidos temos que para qualquer estatística escolhida temos que os resíduos são normais. Assim, atendemos a suposição de que os resíduos são normais. A Figura 29 apresenta o diagrama quantil-quantil.

Figura 29 – Gráfico Qui-Quadrado (QQ-plot) dos resíduos no MRL da pedreira A.



Fonte: Produzido pelo autor, 2014.

Pela Figura 29, podemos observar, de maneira geral, que os resíduos se agrupam em torno da linha gerada no diagrama quantil-quantil. Quando a configuração de pontos no gráfico se aproxima de uma reta, a suposição de normalidade é sustentável. Como apresentado na Figura 29 os resíduos ficam distribuídos em torno da reta e pela estatística de Anderson-Darlin, temos que o p-valor $> 0,05\%$, não rejeitamos a H_0 (p-valor = 0,29). Portanto, podemos afirmar que com um nível de confiança de 95%, que os resíduos tendem a uma distribuição normal.

4.4.1.1.2 Teste de Independência

Para verificar se os resíduos são independentes, podemos utilizar técnicas gráficas e testes estatísticos. A seguir, temos o diagnóstico de independência avaliado pelo teste de Durbin-Watson. O teste de Durbin-Watson é utilizado para detectar a presença de autocorrelação (dependência) nos resíduos de uma análise de regressão. A Tabela 19 mostra os resultados do teste de independência dos resíduos.

Tabela 19 – Teste de independência dos resíduos.

<i>Teste de Independência - Durbin-Watson</i>	
<i>DW</i>	<i>p-valor</i>
1,784700476	0,283299516

Fonte: Produzido pelo autor, 2014.

Como podemos observar pela Tabela 19, pela estatística de Durbin-Watson, para nível de significância $\alpha = 0,05$ não rejeitamos H_0 (p-valor 0,28). Portanto, podemos afirmar que com um nível de confiança de 95%, que os resíduos são independentes.

4.4.1.1.3 Diagnóstico de Homoscedasticidade

Homoscedasticidade é o termo para designar variância constante dos erros ε_i para observações diferentes. O teste de Breusch-Pagan esta baseado no teste multiplicador de Lagrange, o teste de Breusch-Pagan é bastante utilizado para testar a hipótese nula de que as variâncias dos erros são iguais (homoscedasticidade) versus a hipótese alternativa de que as variâncias dos erros são uma função multiplicativa de uma ou mais variáveis, sendo que esta(s) variável(eis) pode(m) pertencer ou não ao modelo em questão. É indicado para grandes amostras e quando a suposição de normalidade nos erros é assumida. O teste de Goldfeld-Quandt também é utilizado para testar a homoscedasticidade dos resíduos. Entre as limitações deste teste está a exigência de que a amostra seja relativamente grande.

As Tabelas 20 e 21, mostram os resultados dos testes de homocedasticidade obtidos através do software Action 2.7.

Tabela 20 – Teste de homoscedasticidade pela estatística de Breusch-Pagan.

<i>Breusch-Pagan</i>		
<i>Qui-Quadrado</i>	<i>GL</i>	<i>p-valor</i>
0,106107357	1	0,744620137

Fonte: Produzido pelo autor, 2014.

Tabela 21 – Teste de homoscedasticidade pela estatística de Goldfeld-Quandt.

<i>Goldfeld-Quandt</i>				
<i>Variável</i>	<i>GQ</i>	<i>GL 1</i>	<i>GL 2</i>	<i>p-valor</i>
Explosivo	1,109574479	8	7	0,45196912

Fonte: Produzido pelo autor, 2014.

Através das tabelas notamos que para nível de significância $\alpha = 0,05$, concluímos que com 95% de confiança, não rejeitamos H_0 , ou seja, os resíduos são homoscedásticos para os testes de Breusch-Pagan e Goldfeld-Quandt, portanto, podemos concluir que existe homoscedasticidade dos resíduos (variância constante).

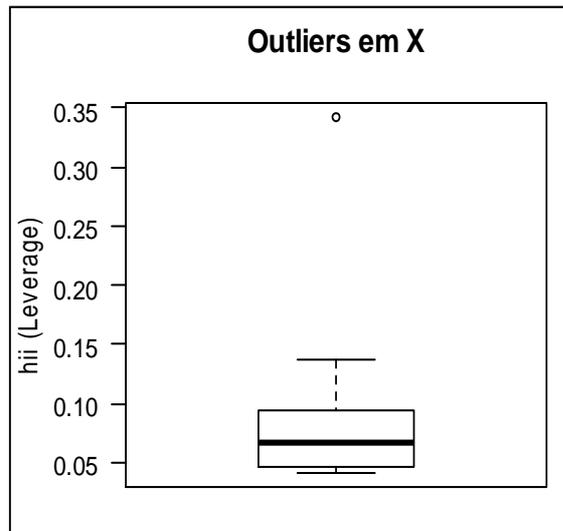
4.4.1.1.4 Diagnóstico de outliers e pontos influentes

Para verificar se os resíduos apresentam outliers ou pontos influentes, podemos utilizar técnicas gráficas e testes estatísticos. Na sequência serão apresentados os resultados obtidos pelas duas técnicas. Foram analisados os outliers, que são observações extremas, ou seja, pontos com comportamento diferente dos demais. Se um outlier for influente, ele interfere sobre a função de regressão ajustada (a inclusão ou não do ponto modifica substancialmente os valores ajustados).

Mas uma observação ser considerada um outlier não quer dizer que consequentemente é um ponto influente. Por isso, um ponto pode ser um outlier em relação a Y ou aos X, e pode ou não ser um ponto influente. A detecção de pontos atípicos tem por finalidade identificar outliers com relação a X, outliers com relação a Y e observações influentes.

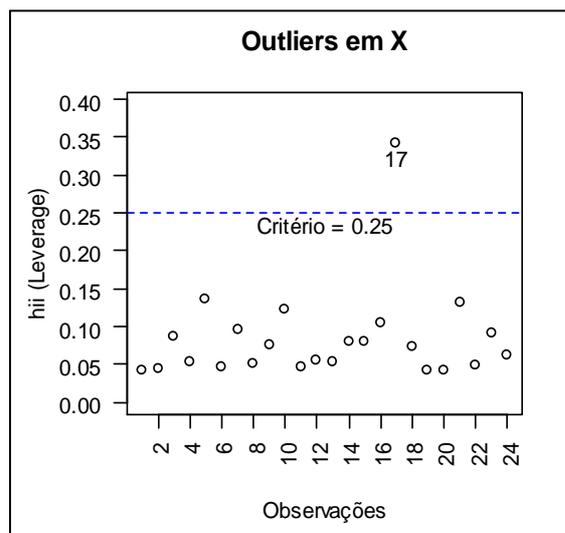
Primeiramente, foram analisados os outliers em X, os resultados estão apresentados nas Figuras 30 e 31.

Figura 30 – Box-plot dos pontos de alavanca (Leverage) para a pedreira A.



Fonte: Produzido pelo autor, 2014.

Figura 31 – Gráfico dos pontos de alavanca (leverage h_{ii}) versus nº da observação para a pedreira A.

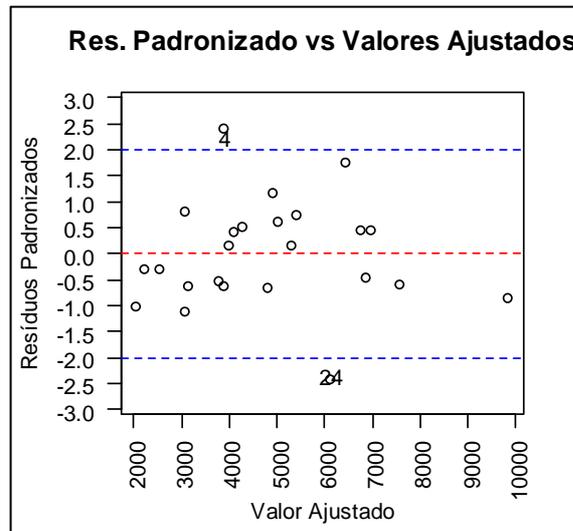


Fonte: Produzido pelo autor, 2014.

Pela Figura 30 pode-se observar alguns indícios de observações que podem alavancar o ajuste do modelo. Pela Figura 31 observamos que o ponto é o de massa de explosivo de 2125,0 kg. Notamos que ele está muito distante em relação à massa de explosivo de 1575,0 kg. Ainda, pelo critério $2(p+1)/n=0,25$ temos que somente o ponto 17 é um outlier em X (massa de explosivo).

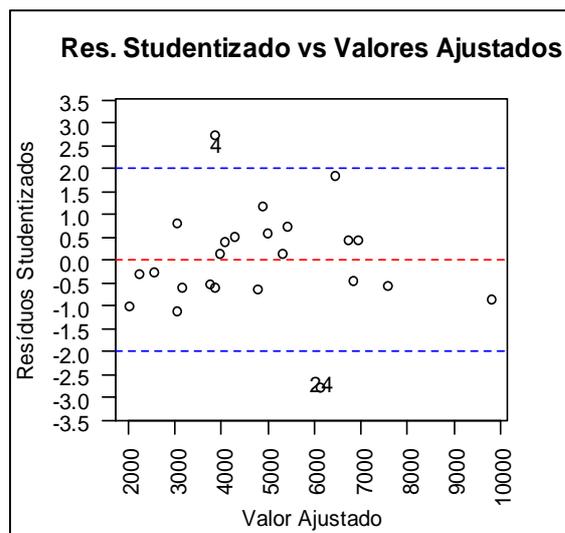
As Figuras 32 e 33 mostram os resultados das análises para os outliers em Y.

Figura 32 – Gráfico dos resíduos padronizados versus valores ajustados para a pedreira A.



Fonte: Produzido pelo autor, 2014.

Figura 33 – Gráfico dos resíduos studentizados versus valores ajustados para a pedreira A.



Fonte: Produzido pelo autor, 2014.

A Tabela 22 apresenta os resultados para o teste estatístico para os resíduos studentizados.

Tabela 22 - Teste de outliers para a pedreira A.

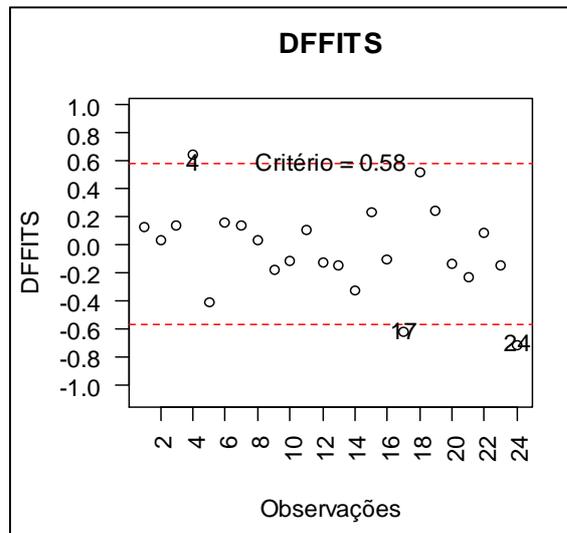
Observação	Teste de Outliers		
	t-Valor	p-valor	p-valor_Bonferroni
24	-2,790686282	0,010955956	0,262942945

Fonte: Produzido pelo autor, 2014.

Observamos da tabela 22 e das Figuras 32 e 33 que os pontos 4 e 24 são outliers em Y (massa de basalto).

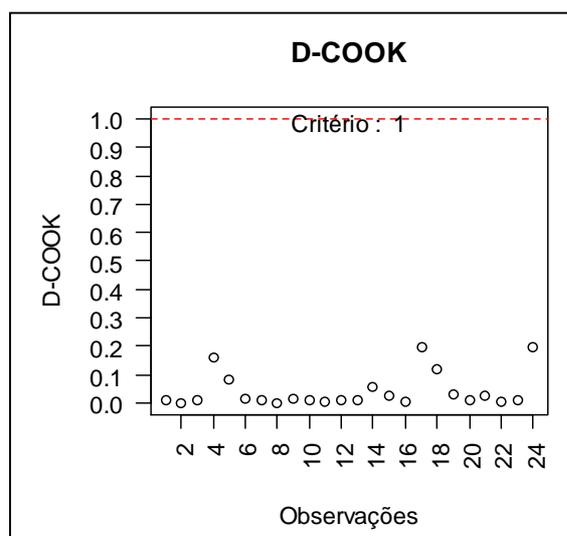
Um ponto é influente se sua exclusão do ajuste da regressão causa uma mudança substancial nos valores ajustados. Por isso, técnicas foram desenvolvidas para identificar essas observações influentes. As Figuras 34, 35 e 36, mostram os resultados da análise dos pontos influentes, através dos testes DFFITS, Distância de Cook e DFBETA.

Figura 34 – Gráfico DFFITS versus valores ajustados para a pedreira A.



Fonte: Produzido pelo autor, 2014.

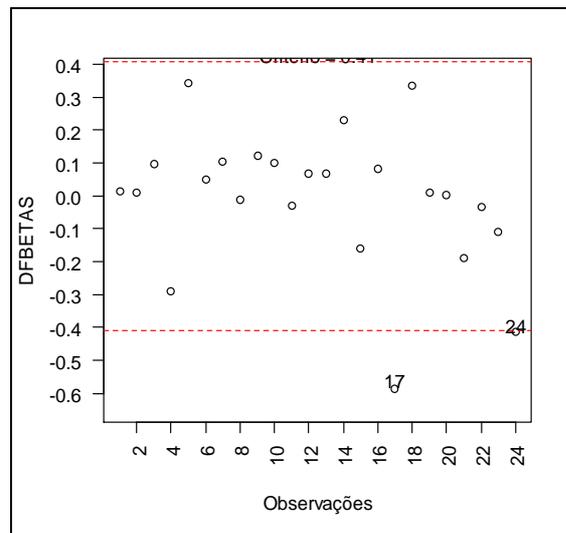
Figura 35 – Gráfico D-COOK versus observações para a pedreira A.



Fonte: Produzido pelo autor, 2014.

Vale lembrar que um ponto é influente, se sua exclusão do ajuste da regressão causa uma mudança substancial nos valores ajustados. DFFITS medem a influência que a observação i tem sobre seu próprio valor ajustado. Pelo critério DFFITS obtemos que as observações 4, 17 e 24 são pontos influentes, porém pelo critério da distância de Cook, não detectamos pontos influentes. A Distância de Cook mede a influência da observação i sobre todos n valores ajustados \hat{Y}_i .

Figura 36 – Gráfico dos resíduos studentizados versus valores ajustados para a pedreira A.



Fonte: Produzido pelo autor, 2014.

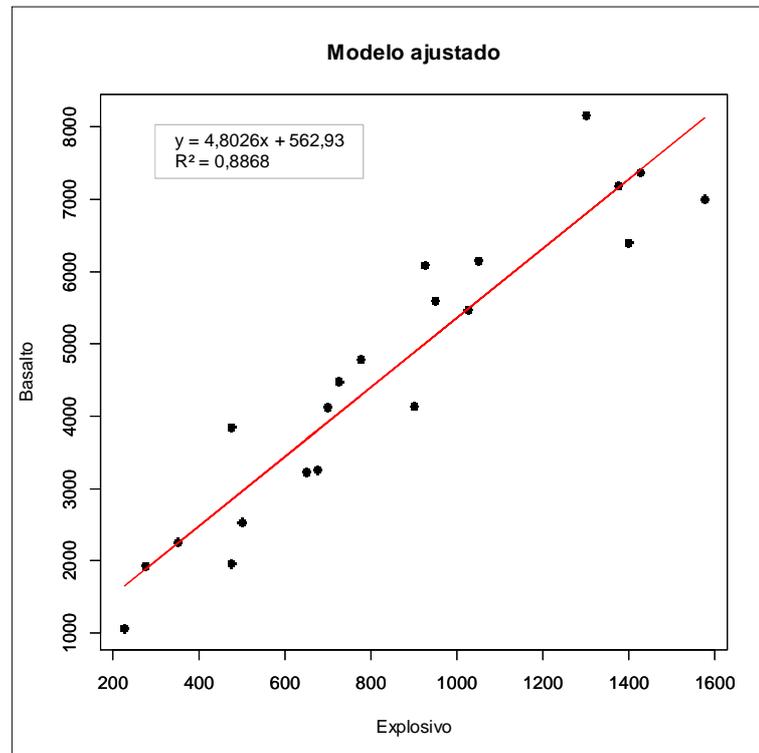
O DFBETA mede a influência da observação i sobre o coeficiente de X (massa de explosivo). Pelo critério observamos que os pontos 17 e 24 são pontos influentes para o coeficiente de massa de explosivo.

De modo geral podemos concluir que as observações 4 e 24 são outliers no espaço da variável y porque os valores da variável resposta estão afastados do restante dos dados. Esse tipo de observação também é chamado de outlier residual ou de regressão por não ser minimamente colinear à reta de regressão. A observação 17 é um outlier no espaço da variável x e, por isso, é também chamada de ponto de alavanca. Embora o ponto 17 seja um outlier com respeito à variável x , essa observação não é um outlier residual por estar sobre a reta de regressão linear.

Dessa forma, após a identificação dos outliers influentes, os mesmos foram excluídos da planilha de dados e o MRL, para a pedreira A, foi reprocessado e os resultados são apresentados na Figura 37. Como pode-se observar o MRL apresentou um coeficiente de determinação $R^2 = 0,88$, após a exclusão dos pontos

outliers influentes, mostrando uma melhora significativa, se comparado ao coeficiente de determinação $R^2 = 0,78$, apresentado na Tabela 16, antes da exclusão dos outliers.

Figura 37 – Gráfico de dispersão dos dados da pedra A e o MRL reajustado.



Fonte: Produzido pelo autor, 2014.

Este resultado mostra que o MRL ajustado explicou 88,7% da variação da variável resposta (massa de basalto). Isto é, 88,7% da variabilidade de Y são explicadas pela variável regressora X (massa de explosivo). Ainda, o MRL proposto apresentou uma correlação forte com os dados da pedra A.

O procedimento de cálculo estatístico apresentado no tratamento dos dados da pedra A foram aplicados igualmente as pedreiras B, C e D. No entanto, para estas pedreiras, serão apresentados neste trabalho, somente aos resultados referentes à obtenção dos coeficientes do MRL, os coeficientes de determinação (R^2) e os gráficos de dispersão bem como os modelos reajustados.

4.4.2 Modelo de Regressão Linear para a Pedreira B

Na Tabela 23 são apresentados os resultados obtidos para os coeficientes para o MRL para a pedra B. Temos as estimativas do intercepto e do coeficiente

relacionado à variável de entrada. Como o coeficiente da variável de entrada é positivo, concluímos que no intervalo da análise, um aumento na massa de explosivo provoca aumento na massa de basalto desmontada. A Tabela 23 apresenta também os p-valores para cada coeficiente, em que a hipótese nula H_0 é que o coeficiente é não significativo. Observamos que para o coeficiente relacionado à massa de explosivo o p-valor é muito pequeno (aproximadamente 0), dessa forma, rejeitamos a hipótese nula para o coeficiente, indicando que ele é importante (significativo) para o modelo. Para o intercepto (coeficiente linear), observamos que o p-valor = 0,23 ($\alpha > 0,05$), indicando que este coeficiente não é significativo para o MRL da pedreira B.

Tabela 23 – Tabela de Coeficientes para o MRL da Pedreira B.

<i>Preditor</i>	<i>Estimativa</i>	<i>Coefficientes</i>		
		<i>Desvio Padrão</i>	<i>Estat.t</i>	<i>P-valor</i>
Intercepto	-1039,649783	845,1790275	-1,230094157	0,229272417
Explosivo	5,413953398	0,499657539	10,83532815	2,47104E-11

Fonte: Produzido pelo autor, 2014.

A Tabela 24 apresenta os resultados encontrados para o coeficiente de determinação R^2 e o R^2 Ajustado em que podemos ter uma ideia da qualidade do ajuste do modelo de regressão. Os resultados mostram e o R^2 Ajustado foi de 0,80, este valor nos dá indícios de que o conjunto de dados da pedreira B apresentou forte correlação linear.

Tabela 24 – Tabela de Coeficientes de Determinação para o MRL da Pedreira B.

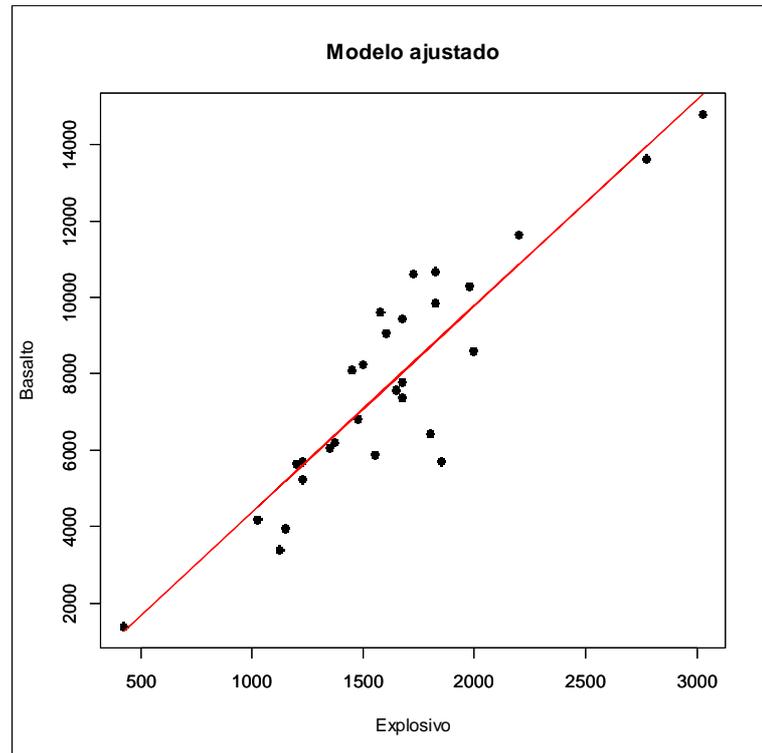
<i>Desvio Padrão dos Resíduos</i>	<i>Desvio Padrão dos Resíduos</i>		
	<i>Graus de Liberdade</i>	R^2	R^2 Ajustado
1326,31745	27	0,813025005	0,806100005

Fonte: Produzido pelo autor, 2014.

A Figura 38 apresenta um gráfico de dispersão dos dados da Pedreira B, bem como o MRL obtido a partir dos dados.

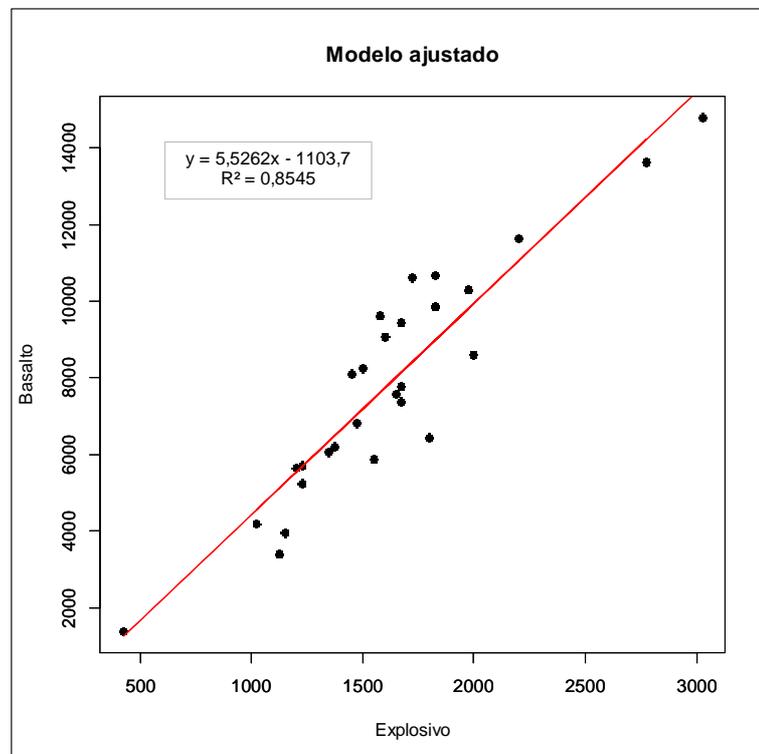
Após a identificação dos outliers influentes, os mesmos foram excluídos da planilha de dados e o MRL, para a pedreira B, foi reprocessado e os resultados são apresentados nas Figura 39. Como pode-se observar o MRL apresentou um coeficiente de correlação $R^2 = 0,85$, após a exclusão dos pontos outliers influentes, mostrando uma melhora, se comparado ao coeficiente de correlação $R^2 = 0,81$, apresentado na Tabela 24, antes da exclusão dos outliers.

Figura 38 – Gráfico de dispersão dos dados da Pedreira B e o MRL ajustado.



Fonte: Produzido pelo autor, 2014.

Figura 39 – Gráfico de dispersão dos dados da Pedreira B e o MRL reajustado.



Fonte: Produzido pelo autor, 2014.

Este resultado mostra que o MRL ajustado explicou 85,4% da variação da variável resposta (massa de basalto). Isto é, 85,4% da variabilidade de Y são explicadas pela variável regressora X (massa de explosivo). Ainda, o MRL proposto apresentou uma correlação muito forte com os dados da pedra B.

4.4.3 Modelo de Regressão Linear para a Pedreira C

Na Tabela 25 são apresentados os resultados obtidos para os coeficientes para o MRL para a pedra C. Temos as estimativas do intercepto e do coeficiente relacionado à variável de entrada. Como o coeficiente da variável de entrada é positivo, concluímos que no intervalo da análise, um aumento na massa de explosivo provoca aumento na massa de basalto desmontada. A Tabela 25 apresenta também os p-valores para cada coeficiente, em que a hipótese nula H_0 é que o coeficiente é não significativo. Observamos que para o coeficiente relacionado a massa de explosivo o p-valor é muito pequeno (aproximadamente 0), dessa forma, rejeitamos a hipótese nula para o coeficiente, indicando que ele é importante (significativo) para o modelo. Para o intercepto (coeficiente linear), observamos que o p-valor = 0,31 ($\alpha > 0,05$), indicando que este coeficiente não é significativo para o MRL da pedra C.

Tabela 25 – Tabela de Coeficientes para o MRL da Pedreira C.

<i>Coeficientes</i>				
<i>Preditor</i>	<i>Estimativa</i>	<i>Desvio Padrão</i>	<i>Estat.t</i>	<i>P-valor</i>
Intercepto	177,5906089	172,5994816	1,028917394	0,310576925
Explosivo	4,809798158	0,197781164	24,31878785	1,63999E-23

Fonte: Produzido pelo autor, 2014.

A Tabela 26 apresenta os resultados encontrados para o coeficiente de determinação R^2 e o R^2 Ajustado em que podemos ter uma ideia da qualidade do ajuste do modelo de regressão. Os resultados mostram e o R^2 Ajustado foi de 0,94, este valor nos dá indícios de que o conjunto de dados da pedra C apresentou uma correlação linear muito forte.

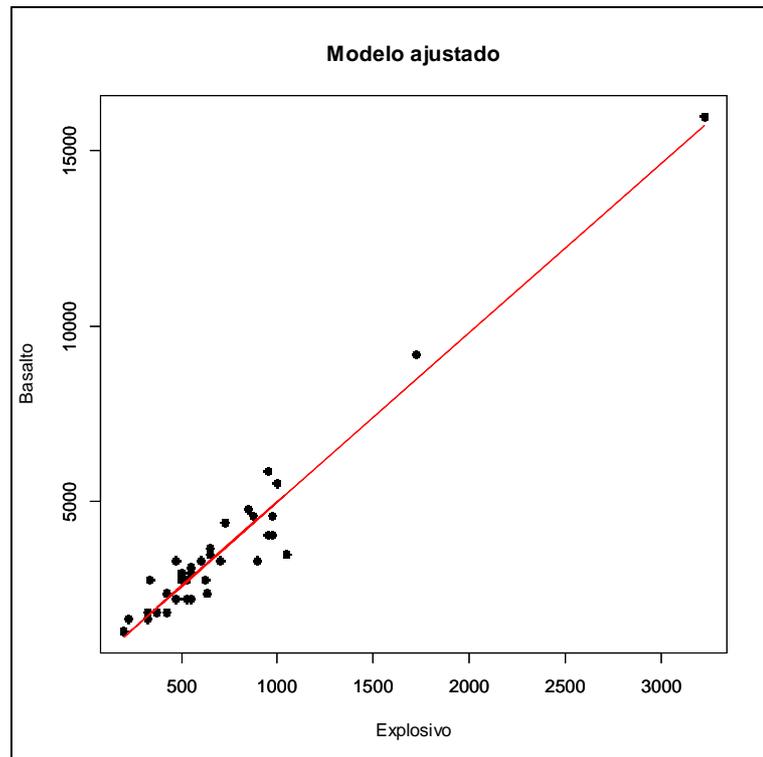
Tabela 26 – Tabela de Coeficientes de Determinação para o MRL da Pedreira C.

<i>Desvio Padrão dos Resíduos</i>			
<i>Desvio Padrão dos Resíduos</i>	<i>Graus de Liberdade</i>	<i>R²</i>	<i>R² Ajustado</i>
617,1251524	35	0,944125467	0,942529051

Fonte: Produzido pelo autor, 2014.

A Figura 40 apresenta um gráfico de dispersão dos dados da Pedreira C, bem como o MRL obtido a partir dos dados.

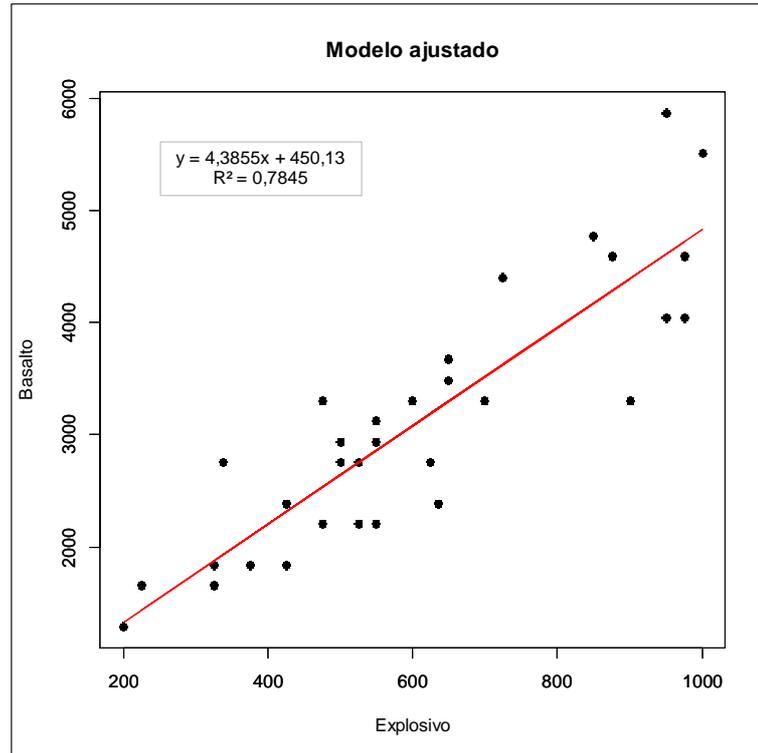
Figura 40 – Gráfico de dispersão dos dados da Pedreira C e o MRL ajustado.



Fonte: Produzido pelo autor, 2014.

Após a identificação dos outliers influentes, os mesmos foram excluídos da planilha de dados e o MRL, para a pedreira C, foi reprocessado e os resultados são apresentados nas Figura 41. Como pode-se observar o MRL apresentou um coeficiente de correlação $R^2 = 0,78$, após a exclusão dos pontos outliers influentes, mostrando que o valor do coeficiente de correlação diminuiu se comparado ao coeficiente de correlação $R^2 = 0,94$, apresentado na Tabela 26, antes da exclusão dos outliers. Este resultado mostra a importância da identificação de pontos influentes para um modelo de regressão.

Figura 41 – Gráfico de dispersão dos dados da Pedreira C e o MRL reajustado.



Fonte: Produzido pelo autor, 2014.

Este resultado mostra que o MRL ajustado explicou 78,4% da variação da variável resposta (massa de basalto). Isto é, 78,4% da variabilidade de Y são explicadas pela variável regressora X (massa de explosivo). Ainda, o MRL proposto apresentou uma correlação forte com os dados da pedreira C.

4.4.4 Modelo de Regressão Linear para a Pedreira D

Na Tabela 27 são apresentados os resultados obtidos para os coeficientes para o MRL para a pedreira D. Temos as estimativas do intercepto e do coeficiente relacionado à variável de entrada. Como o coeficiente da variável de entrada é positivo, concluímos que no intervalo da análise, um aumento na massa de explosivo provoca aumento na massa de granito desmontada. A Tabela 27 apresenta também os p-valores para cada coeficiente, em que a hipótese nula H_0 é que o coeficiente é não significativo. Observamos que para o coeficiente relacionado à massa de explosivo o p-valor é muito pequeno (aproximadamente 0), dessa forma, rejeitamos a hipótese nula para o coeficiente, indicando que ele é importante (significativo) para o modelo. Para o intercepto (coeficiente linear), observamos que

o p-valor = 0,30 ($\alpha > 0,05$), indicando que este coeficiente não é significativo para o MRL da pedreira D.

Tabela 27 – Tabela de Coeficientes para o MRL da Pedreira D.

<i>Preditor</i>	<i>Coefficientes</i>			
	<i>Estimativa</i>	<i>Desvio Padrão</i>	<i>Estat.t</i>	<i>P-valor</i>
Intercepto	-1943,239803	1875,788176	-1,035959085	0,307130176
Explosivo	4,924039165	0,322078837	15,28830396	2,55147E-17

Fonte: Produzido pelo autor, 2014.

A Tabela 28 apresenta os resultados encontrados para o coeficiente de determinação R^2 e o R^2 Ajustado em que podemos ter uma ideia da qualidade do ajuste do modelo de regressão. Os resultados mostram e o R^2 Ajustado foi de 0,86, este valor nos dá indícios de que o conjunto de dados da pedreira D apresentou uma correlação linear muito forte.

Tabela 28 – Tabela de Coeficientes de Determinação para o MRL da Pedreira D.

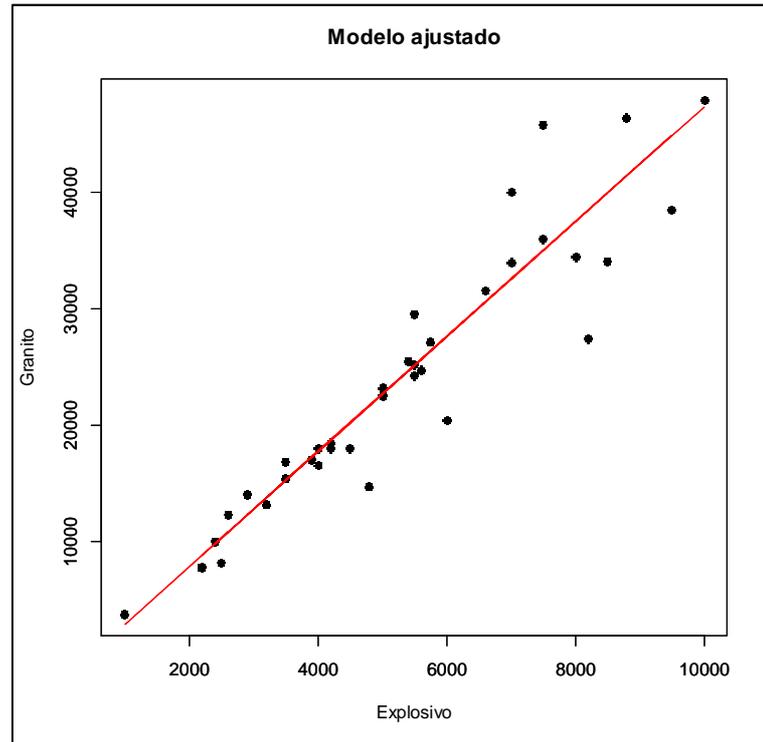
<i>Desvio Padrão dos Resíduos</i>			
<i>Desvio Padrão dos Resíduos</i>	<i>Graus de Liberdade</i>	R^2	R^2 Ajustado
4311,791361	36	0,866534307	0,862826927

Fonte: Produzido pelo autor, 2014.

A Figura 42 apresenta um gráfico de dispersão dos dados da Pedreira D, bem como o MRL obtido a partir dos dados.

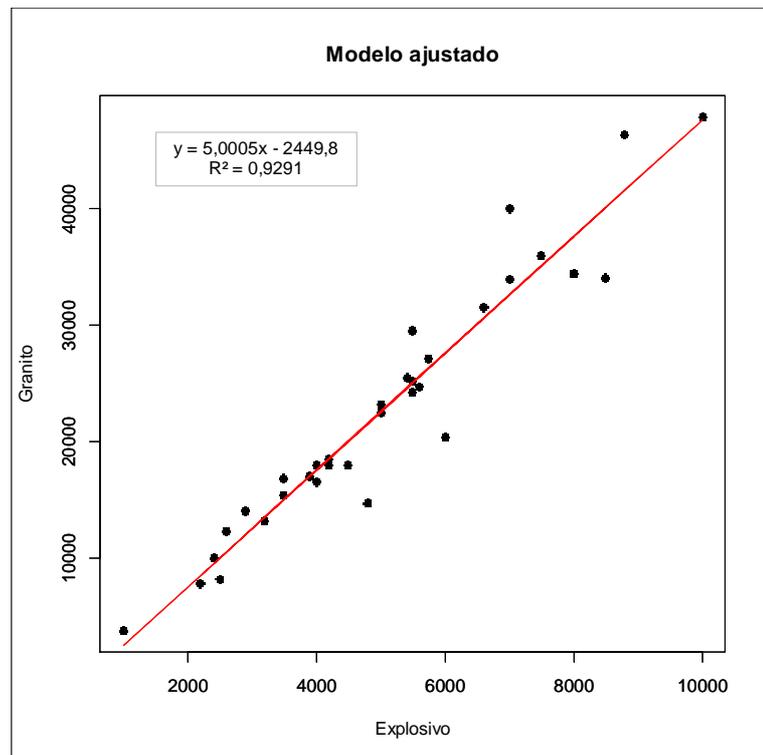
Após a identificação dos outliers influentes, os mesmos foram excluídos da planilha de dados e o MRL, para a pedreira D, foi reprocessado e os resultados são apresentados nas Figura 43. Como pode-se observar o MRL apresentou um coeficiente de correlação $R^2 = 0,93$, após a exclusão dos pontos outliers influentes, mostrando uma melhora significativa, se comparado ao coeficiente de correlação $R^2 = 0,86$, apresentado na Tabela 28, antes da exclusão dos outliers.

Figura 42 – Gráfico de dispersão dos dados da Pedreira D e o MRL ajustado.



Fonte: Produzido pelo autor, 2014.

Figura 43 – Gráfico de dispersão dos dados da Pedreira D e o MRL reajustado.



Fonte: Produzido pelo autor, 2014.

Este resultado mostra que o MRL ajustado explicou 92,9% da variação da variável resposta (massa de granito). Isto é, 92,9% da variabilidade de Y são explicadas pela variável regressora X (massa de explosivo). Ainda, o MRL proposto apresentou uma correlação muito forte com os dados da pedreira D.

5 CONCLUSÕES

Em relação às análises dos dados de produção das pedreiras estudadas, cuja objetivo é encontrar um parâmetro que possa auxiliar a equipe de Arrecadação do DNPM a quantificar a produção de agregados utilizando como base o consumo de explosivos, constatou-se que:

- As quatro pedreiras estudadas se diferenciam com relação à razão de carga que apresentam, uma vez que a pedreira D trabalha com granito. Entre as pedreiras A, B e C que trabalham com basalto, observa-se também uma diferença já que a pedreira B possui resultados relativamente superiores aos demais, tomando como base a média de cada pedreira e os respectivos intervalos de confiança.
- Pode-se observar que existe diferença significativa entre as pedreiras A, B e C na produção de massa de basalto, tomando como base o teste da ANOVA (Análise de Variâncias). Já o Teste de TUKEY mostrou que na comparação entre as pedreiras, a diferença das médias é representativa entre as pedreiras A e B e entre as pedreiras B e C. Entre as pedreiras A e C a hipótese de igualdade não é rejeitada.
- A Pedreira A, na 2ª simulação foram excluídos três outliers, a produção média desmontada passou de 4.840 ton. para 4.398 ton.; a quantidade média de explosivo por detonação passou de 907 kg para 780 kg. A Razão de Carga passou de 0,48 kg/m³ para 0,47 kg/m³.
- A Pedreira B, na 2ª simulação foi excluído um outlier, a produção média desmontada passou de 7.721 ton. para 7.792 ton.; a quantidade média de explosivo por detonação passou de 1.618 kg para 1.609 kg. A Razão de Carga passou de 0,57 kg/m³ para 0,56 kg/m³.
- A Pedreira C, na 2ª simulação foram excluídos três outliers, a produção média desmontada passou de 3.573 ton. Para 3.045 ton.; a quantidade média de explosivo por detonação passou de 706 kg para 592 kg. A Razão de Carga se manteve em 0,50 kg/m³.
- A Pedreira D, na 2ª simulação foi excluído quatro outliers, a produção média desmontada passou de 24.666 ton. para 22.942 ton.; a quantidade média de explosivo por detonação passou de 5.403 kg para 5.077 kg. A Razão de Carga se manteve em 0,60 kg/m³.
- Com base nas simulações realizadas foi possível encontrar a correlação, uma razão de carga modelo, para as pedreiras estudadas.

- Para outras pedreiras que se pretende estudar, serve de comparação; como um parâmetro inicial, uma referência a ser utilizada para correlacionar a produção de agregados x consumo de explosivos, considerando as características geológicas de cada uma.
- Poderá ser utilizado como exemplo a ser empregado no cálculo do Plano de Fogo para a execução de novos PAE - Plano de Aproveitamento Econômico.
- Estes exemplos até agora estudados, são específicos para estes casos. Não se recomenda uma modelagem única para basalto no RS; e sim um estudo específico para cada pedreira usando como referência os dados constantes nos respectivos Planos de Fogo do período de um ano, comparando com o Ano Base do RAL.
- Pode-se realizar uma cooperação técnica entre o DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral e o SFPC – Serviço de Fiscalização de Produtos Controlados, vinculado ao Exército Brasileiro, no sentido de comparar se a quantidade de explosivos consumidos por uma determinada empresa e informada nos respectivos RALs - Relatórios Anuais de Lavra coincidem com os valores declarados no Exército, isso evitaria o mau uso.
- Os modelos são limitados para determinada produção de brita, pode ocorrer certa variação com a mudança do Plano de Fogo, a troca de equipamentos, a alteração da bancada ou a mudança da geologia na mesma jazida.

6 TRABALHOS FUTUROS

Outros estudos comparativos poderão ser realizados, utilizando-se de parâmetros de correlação como a quantidade de explosivos pela metragem perfurada; outras informações como diâmetro da furação, o tamanho do tampão, quantidade e tipo de explosivo na carga de fundo, na carga de coluna.

Com base no comportamento desta correlação, poderão ser avaliadas prováveis influências dos demais parâmetros como o tipo de explosivo utilizado, (solução bombeada, emulsão encartuchada, granulado, associação de ambos etc.); dimensionamento das bancadas (altura, inclinação), serviço de perfuração (profundidade do furo, inclinação, desvio, subfuração, etc.); quantidade e disposição dos acessórios, tipo de plano de fogo, etc.

7 REFERÊNCIAS

ADIMB - **Agencia para o Desenvolvimento Tecnológico da Indústria Mineral Brasileira**. Disponível em: <http://www.adimb.com.br/site/produtos.php>. Acesso em: 15 de fev. 2014.

ALMEIDA, Salvador Luiz Matos de; LUZ, Adão Benvindo da. **Manual de agregados para a construção civil**. Centro de Tecnologia Mineral – CETEM - Ministério da Ciência e Tecnologia - MTC - Rio de Janeiro, 2009, 242 p.

ANEPAC – **Associação Nacional das entidades de produtores de agregados para a construção civil**. Disponível em: <<http://www.anepac.org.br>>. Acesso em: 03 de agosto de 2013.

ARAUJO, Giovanni Moraes de. **Segurança e Saúde Ocupacional na Mineração. Normas Regulamentadoras Comentadas**. - Volume 2 – 11. Edição. Gerenciamento Verde Editora. 2013.

BACCI, D. C. **Vibrações geradas pelo uso de explosivos no desmonte de rochas**: Avaliações dos parâmetros físicos do terreno e dos efeitos ambientais. Tese de doutorado. Universidade Federal Paulista, 2000.

BRITANITE – Indústria Química Ltda. **Manual Básico de Utilização de Explosivos**. 2012.

CALAES, Gilberto Dias; NETO, Bernardo Piquet Carneiro; MARGUERON Cláudio; AMARAL, José Alexandre Gurgel do. **Bases para o desenvolvimento sustentável e competitivo da indústria de agregados nas regiões metropolitanas do país - Parte 1**, - REM: R. Esc. Minas, Ouro Preto, 60(4): 675-685, out./dez., 2007.

CALAES, Gilberto Dias; NETO, Bernardo Piquet Carneiro; MARGUERON, Cláudio; AMARAL, José Alexandre Gurgel do. **Bases para o desenvolvimento sustentável e competitivo da indústria de agregados nas regiões metropolitanas do país - Parte 2**, - REM: R. Esc. Minas, Ouro Preto, 61(1): 47-48, jan março. 2008.

CALLEGARI-JACQUES, Sidia M. **Bioestatística: princípios e aplicações**. Porto Alegre: Artemed, 2003. 255p.

CAMERON, A. & HAGAN, T. **Curso Internacional: Tecnologia de desmonte de rochas com explosivos – 1ª parte**. São Paulo: IBRAM, 1994, 117 p.

CARVALHO, Mariana Xavier Sans de. **Equipamentos de Fragmentação: Uma Revisão Avaliando Circuitos Alternativos para a Moagem de Finos**. DEMIN - Escola de Engenharia da UFMG, Monografia: Belo Horizonte, Julho 2012.

CAVALCANTI, Vanessa Maria Mamede; RIBEIRO, Ricardo Eudes. **A indústria de agregados para construção civil na Região Metropolitana de Fortaleza**. Parahyba. --Fortaleza: DNPM, 2011.

CHAVES, Arthur Pinto; PERES, Antonio Eduardo Clark – **Teoria e Prática do Tratamento de Minérios**, 3. Edição; Signus Editora/Brasil Mineral, São Paulo, 2006.

CHIAPETTA, R. F.; BORG, D. G.; STERNER, V.A. **Explosives and rock blasting**. Atlas Powder Company, Dallas, USA, 1987, 662 p.

CLARK, G. B, Industrial Explosives: Composition and Calculations for Engineers. Colorado School of Mines. **Quarterly**, vol 75 nº 1, 1980. 47 p.

COLLANTES, Candia R.; CAMARGO, L. M.; SILVA, L. A. Ayres da. O controle estrutural do maciço no desmonte por explosivos. In: **12a. Reunião Anual da Associação Iberoamericana de Ensino Superior de Engenharia de Minas**, 2004, São Paulo, SP. EPUSP, 2004. p. 153-157.

CONVÊNIO DNPM/MINEROPAR. **Planejamento na Mineração**. Capítulo 4. Disponível em: http://www.mineropar.pr.gov.br/arquivos/File/publicacoes/plano_diretor/relatorio/capitulo4.pdf. Acesso em: 18 de fev. 2014.

DAVIS, T. L. **The Chemistry of Powder and Explosives**. V. 2, John Wiley & Sons Inc. London, 500p. 1943.

DE BEM, Susana Sanson. **Instalações de britagem, condições de trabalho e de processo**: Uma abordagem de saúde e segurança. Dissertação de mestrado, UFRGS, Porto Alegre, RS, 2006.

DINIS, C. Gama - **I Semana Ibero - Americana de Engenharia de Minas**, EPUSP, São Paulo, 09 a 13 de agosto de 2004.

DIPAR - Diretoria de Procedimentos Arrecadatórios. Disponível em: <https://sistemas.dnpm.gov.br/ARRECADACAO/INTRA/Cfem/Relatorios/arrecadacaoNovo.aspx>. Acesso em: 18 de fev. 2014.

DNPM 810.708/1996

DNPM, Relatório Anual de Lavra – RAL 2014, ano base 2013.

EMBU, SA – **Processo produtivo**. Disponível em: <http://www.embusa.com.br/wordpress/wpcontent/themes/twentyeleven/material/Apresentacao.pdf>. Acesso em: 18 de fev. 2014.

FANTIN, Marcel. **Gestão de Agregados Minerai**s: Análise e subsídio para políticas públicas. UNICAMP, Tese de Doutorado, Campinas, SP, 2011- 552 p.

FERREIRA, Gilda Carneiro, et al. Impactos Ambientais Associados a desmonte de rocha com o uso de explosivos. São Paulo UNESP, **Geociência** v. 25, n 4, p 467-473, 2006.

FERREIRA, Gilson Ezequiel; PEREIRA, Luana dos Santos. MERCADOS DE AGREGADOS NO BRASIL. In: ALMEIDA, Salvador Luiz Matos de; LUZ, Adão

Benvindo da. **Manual de agregados para a construção civil**. Centro de Tecnologia Mineral – CETEM - Ministério da Ciência e Tecnologia - MTC - Rio de Janeiro, 2009, 242 p.

GERMANY, Darcy José. **A Mineração no Brasil**. CT Mineral, Rio de Janeiro, 2002.

GRIPP, M. F. A.; MORAIS, J. L. - **I Semana Ibero Americana de Engenharia de Minas**, EPUSP, São Paulo, 09 a 13 de agosto de 2004.

HAIR JUNIOR, J. F.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L.; BLACK, W. C. **Análise multivariada de dados**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2005.

HUSTRULID, W. **Blasting Principles for Open Pit Mining**. Vol. Rotterdam: Balkema, 1999. 301 p.

IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração. **Informações e análises da economia mineral Brasileira**. 7. edição. Dezembro/2012. Disponível em: <http://www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00004430.pdf>. Acesso em: 28 de jul. de 2014.

LIMA, Thiers Muniz; NEVES, Carlos Augusto Ramos, Coordenadores. Brasil Departamento Nacional de Produção Mineral. Sumário Mineral. Brasília: DNPM, 2012.

KUZMENKO, A. A.; VOROBEEV, V. D.; DENISYUK, I. I. e DAUETAS, A. A.. Seismic effects os blasting in rock. Russian Translator Series 103, A. A. Balkena, Rotterdam, Nederlnd, 1993, 169p.

MENDES, Telmo José. **A Estrutura de Produção de Britas na Região Metropolitana de Campinas**. Dissertação de mestrado. UNICAMP, 2002, 79 p.

MONTGOMERY, D. C.; PECK, E. A.; VINING, G. G. **Introduction to Linear Regression Analysis**. 3. ed. [S.I.]: Wiley-Interscience, 2001. 641 p.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros**. 2. ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2003. 463 p.

NETER, J.; KUTNER, M.; NACHTSHEIM, C.; LI, W. **Applied Linear Statistical Models**. 5. ed. New York: Mc Graw-Hill/Irwin, 2004. 1396 p.

NETO, Caetano Dallorra; FERREIRA, Gilda Carneiro. Controle de vibrações geradas por desmonte de rocha com explosivos. Estudo de caso. Calcário Cruzeiro, Limeira São Paulo, UNESP, Geociências vol. 25 p. 455 –466, 2006.

OLIVEIRA, Elvis Martins. **Impacto Ambiental na exploração de pedreiras, Contribuição para uma prática sustentável**. Dissertação de Mestrado, Departamento de Geologia, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, Portugal, Maio de 2006.

QUARESMA, Luiz Felipe; Agregados para a Construção Civil – Projeto Assistência Técnica ao setor de energia, J Mendo Consultoria, Relatório Técnico 30, Ministério de Minas e Energia, Brasília, 2009.

RICARDO, Helio de Souza; CATALANI, Guilherme. **Manual de Escavação Terraplenagem e Escavação de Rocha**. 3. edição, Editora Pini Ltda, São Paulo, 2007, 653p.

SANTOS, Douglas Gomes dos. **Estudo das vibrações geradas pelo desmonte de rochas com uso de explosivos e sua relação com as fraturas da Pedreira Bangu**, Rio de Janeiro, 2009.

SILVA, Lineu Azuaga Ayres da. **A influencia dos desmontes por explosivos na estabilidade dos taludes** - Geomecânica aplicada a lapequeña minería. Curso - Proyecto CYTED XIII - 3 - Junio 2005 - Córdoba – Argentina.

SILVA, Alexandre José Alves da. **A Produção de agregados pétreos da região metropolitana de Salvador**: Panorama Econômico, Perspectivas e Alternativas. Dissertação de mestrado, UNICAMP, Campinas, SP, 2002.

SINDIPEDRAS - Sindicato da Indústria de Mineração de Pedra Britada do Estado de São Paulo. Disponível em: <http://www.sindipedras.org.br>.

TANNUS, Marcos Bartasson, et al. **Agregados para a Construção civil no Brasil**. CETEC MG, 2007.

VALENÇA, Ubirajara da Silva; REIS, Sérgio Stanisck; PALAZZO, Mário; ROCHA, José Ferreira; ATHAYDE, Alcio Augusto Carpes. **Engenharia dos Explosivos** – Um enfoque Dual, Coleção Disseminar; Instituto Militar de Engenharia – IME, Rio de Janeiro, 2013.740 p.

WEISBERG, S. **Applied Linear Regression**. 3. ed. New York: John Wiley & Sons, 2005. 310 p.

ZACARIAS, Carlos Marcelo. **Classificação de maciços Rochosos da Mina do Córrego do Meio aplicada as operações de perfuração**. Dissertação de mestrado, UFMG, 2003.

8 APÊNDICE A

Registros dos planos de fogo executados durante o período de um ano, para cada pedreira estudada

Pedreira "A"				
	Volume Desmontado (m ³)	Razão de carga (Kg/m ³)	explosivo (kg)	Toneladas (Basalto)
1	2.196,50	0,43	950,00	5.601
2	2.142,50	0,48	1.025,00	5.463
3	2.818,45	0,49	1.375,00	7.187
4	2.461,57	0,27	675,00	6.277
5	414,67	0,54	225,00	1.057
6	2.414,44	0,43	1.050,00	6.157
7	2.892,22	0,49	1.425,00	7.375
8	1.618,82	0,43	700,00	4.128
9	994,94	0,50	500,00	2.537
10	756,91	0,36	275,00	1.930
11	1.880,00	0,41	775,00	4.794
12	1.265,73	0,51	650,00	3.228
13	1.275,77	0,53	675,00	3.253
14	770,43	0,62	475,00	1.965
15	1.510,76	0,31	475,00	3.852
16	884,17	0,40	350,00	2.255
17	3.570,57	0,60	2.125,00	9.105
18	3.202,98	0,41	1.300,00	8.168
19	2.385,22	0,39	925,00	6.082
20	1.625,91	0,55	900,00	4.146
21	2.747,52	0,57	1.575,00	7.006
22	1.759,56	0,41	725,00	4.487
23	2.508,25	0,56	1.400,00	6.396
24	1.457,28	0,84	1.225,00	3.716
	45.555,17	0,48	21.775,00	116.166
Altura Bancada: 6 metros			Diâmetro Furo: 60 mm	
Espaçamento (E): 1,6 metros			Explosivo	Emulsão Encartuchada
Afastamento (A): 3 metros				Anfomax: sacos
Malha A x E: 4,8 m ²			Densidade do Basalto: 2,55 g/cm ³	

Pedreira "B"				
		Razão de carga: Kg	Explosivo (Kg.) Kg	Basalto Tonelada s de Basalto
	Volume Desmontado (m³)	expl/m³ basalto	Explosivo	
1	4.162,06	0,41	1.725,00	10.613
2	4.183,92	0,44	1.825,00	10.669
3	4.040,02	0,49	1.975,00	10.302
4	3.774,14	0,42	1.575,00	9.624
5	3.705,57	0,45	1.675,00	9.449
6	4.562,87	0,48	2.200,00	11.635
7	2.057,34	0,60	1.225,00	5.246
8	1.327,90	0,85	1.125,00	3.386
9	2.525,11	0,71	1.800,00	6.439
10	536,00	0,79	425,00	1.367
11	2.434,56	0,56	1.375,00	6.208
12	2.216,88	0,54	1.200,00	5.653
13	2.888,25	0,58	1.675,00	7.365
14	3.864,09	0,47	1.825,00	9.853
15	3.552,41	0,45	1.600,00	9.059
16	3.373,13	0,59	2.000,00	8.601
17	2.974,20	0,55	1.650,00	7.584
18	2.673,66	0,55	1.475,00	6.818
19	5.808,04	0,52	3.025,00	14.811
20	2.377,78	0,57	1.350,00	6.063
21	2.235,73	0,55	1.225,00	5.701
22	1.542,72	0,75	1.150,00	3.934
23	2.239,28	0,83	1.850,00	5.710
24	2.304,45	0,67	1.550,00	5.876
25	3.173,84	0,46	1.450,00	8.093
26	1.638,95	0,63	1.025,00	4.179
27	3.049,83	0,55	1.675,00	7.777
28	3.234,49	0,46	1.500,00	8.248
29	5.346,67	0,52	2.775,00	13.634
	87.803,89	0,57	46.925,00	223.900
Altura bancada: 12 metros			Diâmetro dos furos: 60 mm	
Afastamento (A): 3,4 metros			Espaçamento (E): 1,8 m	
Malha (ExA): 6,12 m²			Densidade Basalto: 2,45 g/cm³	
Explosivo		Emulsão Encartuchada		
		Anfomax: sacos		

Pedreira "C"				
	Basalto	Razão de carga: kg expl/m ³	Explosivo	Basalto
	m ³		Kg	Toneladas
1	1.296,00	0,37	475,00	3.305
2	2.304,00	0,41	950,00	5.875
3	1.376,00	0,76	1.050,00	3.509
4	2.160,00	0,46	1.000,00	5.508
5	1.728,00	0,42	725,00	4.406
6	3.600,00	0,48	1.725,00	9.180
7	6.264,00	0,51	3.225,00	15.973
8	1.872,00	0,45	850,00	4.774
9	1.368,00	0,48	650,00	3.488
10	1.224,00	0,45	550,00	3.121
11	1.152,00	0,48	550,00	2.938
12	1.080,00	0,31	337,00	2.754
13	864,00	0,64	550,00	2.203
14	1.080,00	0,49	525,00	2.754
15	864,00	0,61	525,00	2.203
16	648,00	0,50	325,00	1.652
17	720,00	0,59	425,00	1.836
18	1.296,00	0,69	900,00	3.305
19	720,00	0,52	375,00	1.836
20	1.152,00	0,43	500,00	2.938
21	1.440,00	0,45	650,00	3.672
22	1.296,00	0,46	600,00	3.305
23	1.080,00	0,46	500,00	2.754
24	720,00	0,45	325,00	1.836
25	864,00	0,64	550,00	2.203
26	864,00	0,55	475,00	2.203
27	1.800,00	0,54	975,00	4.590
28	1.296,00	0,54	700,00	3.305
29	1.080,00	0,58	625,00	2.754
30	1.584,00	0,60	950,00	4.039
31	1.584,00	0,62	975,00	4.039
32	1.800,00	0,49	875,00	4.590
33	504,00	0,40	200,00	1.285
34	936,00	0,68	635,00	2.387
35	648,00	0,35	225,00	1.652
36	936,00	0,45	425,00	2.387
37	648,00	0,35	225,00	1.652
	51.848,00	0,50	26.122,00	132.212
Subfuração: 0,70m		Diâmetro furos: 60 mm		Explosivo: Amex 3.500
Espaçamento (E): 2,0 m		Afastamento (A): 4,0 m		Malha (A x E): 8m ²
Altura: 9,0 m		Inclinação furos: 38°		Densidade Basalto: 2,54

Pedreira "D"				
	volume desm.	Razão Carga		
	m ³	Kg / ton	Explosivo (KG)	granito (Ton)
1	10.296,00	0,56	5.750,00	27.078
2	8.800,00	0,57	5.000,00	23.144
3	5.850,00	0,60	3.500,00	15.386
4	3.800,00	0,63	2.400,00	9.994
5	6.480,00	0,60	3.900,00	17.042
6	14.600,00	0,65	9.500,00	38.398
7	9.677,00	0,56	5.400,00	25.451
8	9.216,00	0,60	5.500,00	24.238
9	12.950,00	0,66	8.500,00	34.059
10	1.440,00	0,69	1.000,00	3.787
11	4.680,00	0,56	2.600,00	12.308
12	2.970,00	0,74	2.200,00	7.811
13	11.996,00	0,55	6.600,00	31.549
14	6.840,00	0,58	4.000,00	17.989
15	11.975,00	0,55	6.600,00	31.494
16	17.400,00	0,43	7.500,00	45.762
17	13.650,00	0,55	7.500,00	35.900
18	5.600,00	0,86	4.800,00	14.728
19	8.550,00	0,58	5.000,00	22.487
20	9.575,00	0,57	5.500,00	25.182
21	7.020,00	0,60	4.200,00	18.463
22	17.400,00	0,43	7.500,00	45.762
23	6.400,00	0,55	3.500,00	16.832
24	18.200,00	0,55	10.000,00	47.866
25	17.600,00	0,50	8.800,00	46.288
26	5.016,00	0,64	3.200,00	13.192
27	6.840,00	0,61	4.200,00	17.989
28	5.352,00	0,54	2.900,00	14.076
29	11.232,00	0,49	5.500,00	29.540
30	7.740,00	0,78	6.000,00	20.356
31	6.300,00	0,63	4.000,00	16.569
32	6.860,00	0,66	4.500,00	18.042
33	3.120,00	0,80	2.500,00	8.206
34	10.400,00	0,79	8.200,00	27.352
35	15.200,00	0,46	7.000,00	39.976
36	13.070,00	0,61	8.000,00	34.374
37	12.896,00	0,54	7.000,00	33.916
38	9.400,00	0,60	5.600,00	24.722
	356.391,00	0,58	205.350,00	937.308
Altura bancada (m): 12			Diâmetro furo (polegadas): 3	
Espaçamento (m): 3,8			densidade granito (g/cm ³): 2,63	
Afastamento (m): 2,1			Explosivo: bombeado	