

**ESCOLA POLITÉCNICA
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS



**ANÁLISE COMPARATIVA DE RAZÕES DE CARGA E
APLICAÇÃO DE FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS NO
DESMONTE POR EXPLOSIVOS**

RODRIGO TADASHI HAYASHIDA

SÃO PAULO

1999

**ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS**

TRABALHO DE FORMATURA

**ANÁLISE COMPARATIVA DE RAZÕES DE CARGA E APLICAÇÃO DE
FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS NO DESMONTE POR EXPLOSIVOS**

**TRABALHO DE FORMATURA
APRESENTADO
À ESCOLA POLITÉCNICA
DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO,
NA CONCLUSÃO DO CURSO
DE GRADUAÇÃO
DE ENGENHARIA DE MINAS.**

ENGENHEIRANDO: RODRIGO TADASHI HAYASHIDA

ORIENTADOR: PROF. DR. GIORGIO FRANCESCO CESARE DE TOMI

**SÃO PAULO
1999**

TE 1999

H323a

Syntex 1458851 - Acervo da Fundação Biblioteca Nacional
Acessos restritos à coleção preservada

DEPARTAMENTO DE ARQUIVOS

Este documento faz parte de uma coleção preservada da Biblioteca Nacional. Sua circulação é restrita ao Departamento de Arquivos.

Arquivo Histórico

Brasiliano

4/9993

DEDALUS - Acervo - EPMI



31700005460

AGRADECIMENTOS

Este trabalho teve a colaboração direta ou indireta de várias pessoas e empresas, as quais passo a citar a seguir:

Ao amigo e professor Dr. Giorgio Francesco Cesare de Tomi, orientador, por sua ajuda, apoio, esforço e paciência, sem o quem seria impossível a realização deste trabalho.

Ao Eng. de Minas José Silvio Corsini, que não mediu esforços para fornecer auxílio, com informações, teoria, técnica e prática, também imprescindível para o trabalho.

À empresa ORICA BRASIL LTDA., detentora dos *softwares* e equipamentos aqui descritos, que na pessoa do eng. José Silvio Corsini, permitiu a utilização de tais ferramentas e dados para o trabalho.

À empresa EMBU ENGENHARIA E COMÉRCIO S.A., de vital importância, na cessão de dados e informações de detonações, sempre prestativos e colaboradores.

SUMÁRIO

Sumário Executivo	3
1. Introdução	4
2. Revisão Bibliográfica	5
2.1. Explosivos	5
2.2. Mecanismos de Quebra	6
2.2.1. Fase Dinâmica	7
2.2.2. Fase Quase-Estática	9
2.3. Razão de Carga (Powder Factor)	10
2.4. Tipos e Características de um Explosivo	11
2.5. Velocidade de Detonação	12
2.6. Perfilagem via Laser e Auditagem da Furação (Laser Profile & Boretrak)	13
2.7. Fragmentação da Rocha	15
2.7.1. Blocos oversize (Matacos)	16
2.7.2. Finos	16
2.7.3. Escavação	17
2.7.4. Transporte	17
2.8. SABREX	17
3. Metodologia de Trabalho	22
4. Dados Experimentais	27
4.1. Detonações “Antigas”	27
4.2. Detonações Atuais	28
5. Análise dos Resultados	31
5.1. Custos	31
5.1.1. Custos de Detonações Antigas	31
5.1.2. Custos de Detonações Atuais	31
5.2. Fragmentação	32
5.2.1. Granulometria das Detonações Antigas	33

5.2.2. Granulometria das Detonações Atuais	33
5.2.3. Comparaçāo entre os Dois Estudos	34
5.3. Lançamento de Pilha e Dano na Rocha	35
6. Conclusão	36
7. Anexos	39
7.1. Anexo 1	40
7.2. Anexo 2	41
7.3. Anexo 3	42
7.4. Anexo 4	43
7.5. Anexo 5	44
7.6. Anexo 6	45
7.7. Anexo 7	46
8. Referências Bibliográficas	65

SUMÁRIO EXECUTIVO

A metodologia realizada no presente trabalho consistiu no sequenciamento: revisão bibliográfica dos itens e assuntos pertinentes e constantes para a realização do estudo, visita a campo freqüente à mina de cujos dados foram retirados, análise dos dados e seleção dos principais parâmetros a serem estudados, calibragem de tais parâmetros para o *input* no *software* de detonação, estudo dos casos no *software*, e análise dos resultados gerados.

De acordo com os resultados obtidos, a partir da análise de dados históricos de características de detonações recebidos pela empresa EMBU Engenharia e Comércio S.A., pedreira na qual foi feito o estudo, concluiu-se que os valores de razão de carga, desde o início da década de 90, até os dias de hoje, incrementaram de aproximadamente 50 a 60%. Com isso, obteve-se um resultado significativamente melhor na fragmentação, tomando como exemplo um tamanho d_{80} , ou seja, o tamanho de abertura de peneira em que 80 % do material desmontado seria passante, sofreu um decréscimo de aproximadamente 20%.

Com isso, a redução de custos observada foi de aproximadamente 20%, em média dos casos estudados, em relação aos custos do início da década comparados com os atuais. Tal cálculo considera somente os custos relacionados à perfuração e explosivos, mas também deve-se analisar os equipamentos de carregamento, transporte e britagem, que certamente apresentaram redução significativa em seus custos e aumento em sua produtividade e disponibilidade. Tais dados podem ser verificados no decorrer do trabalho.

Vale lembrar que uma meta do estudo é o de obter qualitativamente resultados que mostram uma importância significativa para o profissional de Engenharia de Minas, não tendo como intuito o estudo a um nível avançado de detalhe de tal tema.

Verificou-se a potencialidade do estudo e conclui-se que muitos outros podem ser realizados a partir do tema escolhido, devido ao grande horizonte oferecido na área de desmonte e aplicação de explosivos em mineração.

1. INTRODUÇÃO

Existe atualmente, e também reconhecido que cada vez mais no futuro, uma especial ênfase crescente no controle de segurança, saúde e meio ambiente nas minerações. Neste contexto, com especial aspecto quanto às detonações e aplicações de explosivos, à medida que anéis urbanos e desenvolvimento humano avançam ao redor da área de lavra. Somada a isso, a necessidade da pedreira da busca contínua de otimização de custos e eficiência em suas operações.

Os explosivos têm sido largamente utilizados em mineração, e o uso destes em pedreiras a céu aberto já se tornou um fato bastante corriqueiro. Por isso, pode-se ter a falsa idéia de uma operação relativamente simples. No entanto, para a melhoria contínua dos serviços, e sempre visando a segurança, para que a utilização de explosivos não se torne somente uma rotina, é necessário sempre o aperfeiçoamento tecnológico, teórico e prático da operação de carregamento de explosivos.

O presente trabalho visa analisar e comparar, especificamente, razões de carga de explosivos aplicadas em detonações de bancadas de pedreiras, a fim de justamente buscar a minimização de custos totais, de acordo com a Figura 1, e visando principalmente a segurança, relacionando métodos e tecnologias utilizadas para o controle da detonação. Também tem por objetivo, o uso de ferramentas computacionais nessa análise, que auxiliam na simulação da detonação, e projetam os custos e performances. Com isso, pode-se ter um parâmetro de comparação de uma razão de carga ótima, tal que o resultado da fragmentação seja a idealizada, mas sem no entanto comprometer a segurança, minimizando os custos totais. Vale lembrar que as razões de carga são características próprias de cada pedreira, tendo portanto cada uma sua fragmentação ótima, e seus custos totais.

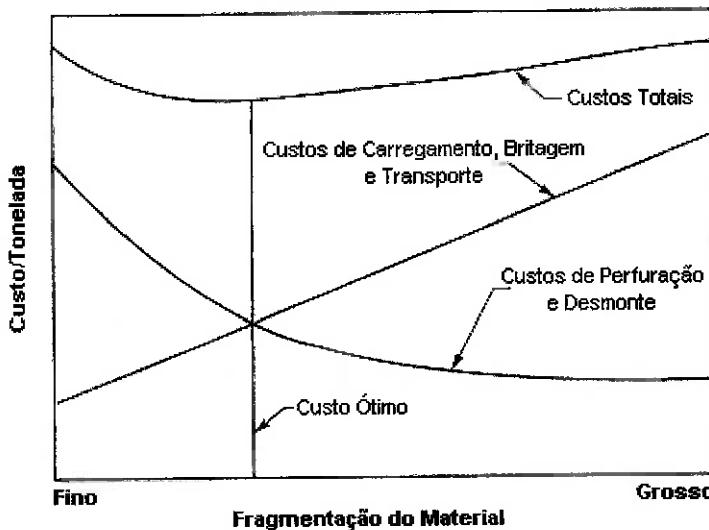


Figura 1: Curva de custos totais, relacionando custos unitários (modificado – Persson, 1994)

Para tanto, serão utilizados e comparados dados reais de uma pedreira localizada na área urbana da Grande São Paulo, com os devidos resultados e performances, em seu contexto e histórico.

Também serão utilizados como ferramentas, recursos computacionais e *softwares* específicos no serviço de desmonte, na simulação de planos de fogo, determinação da fragmentação, lançamento de pilha, e análise tridimensional das bancadas, com os perfis reais dos furos em relação à bancada e os desvios destes. Tais *softwares* são empregados com sucesso pela empresa *ORICA BRASIL LTDA.*, líder mundial na fabricação, comercialização e aplicação de explosivos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Explosivos

Os explosivos, de um ponto de vista prático, são simplesmente materiais que são projetados para provocar uma explosão, isto é, que possuem a habilidade de rapidamente se decompor quimicamente, produzindo uma grande quantidade de gás a alta temperatura, que irá agir mecanicamente em todo o ambiente ao seu redor. Para serem úteis em aplicações práticas, os explosivos devem possuir estabilidade química suficiente para não se

decomponem espontaneamente sob qualquer estímulo como fricção, impacto, ou calor que possa ocorrer em um ambiente ou situação normal de manuseio e estocagem (Persson, 1994).

A eficiência dos explosivos empregados em desmontes na mineração a céu aberto e pedreiras deve-se à magnitude das pressões de pico de gás e às velocidades em que estas pressões são desenvolvidas. Uma parte da energia liberada em um furo de mina:

1. Pode ser dissipada de maneira desperdiçada na pulverização ou na deformação plástica de rochas pouco resistentes/brandas e/ou,
2. Tendem a escapar por algum caminho de pouca resistência.

Cada furo de mina deve ser preparado, carregado e tamponado de modo que os gases liberados na decomposição do explosivo permaneçam confinados por um período de tempo, e agindo eficientemente na quebra, deslocamento e liberação da rocha. Isto sem que haja um lançamento excessivo dos fragmentos (ultralançamento), vibração do terreno, dano no maciço remanescente (*overbreak*) e sopro do ar (Instituto Brasileiro de Mineração, 1996).

2.2. Mecanismos de Quebra

Os mecanismos pelos quais a rocha é fraturada pelo explosivo são fundamentais para a determinação da malha do plano de fogo. Eles se relacionam com os danos que podem atingir a rocha e estruturas circundantes, e com a segurança e reações das pessoas que vivem próximas à área de detonação (ORICA BRASIL LTDA.)

Acreditava-se que, com base em observações de campo, que os explosivos industriais desenvolviam seu trabalho de fragmentação da rocha apenas pela atuação dos gases a alta pressão decorrentes da detonação. Imaginava-se que estes gases, em seu processo de descompressão, abriam fendas na rocha que se estendiam até as faces livres, dividindo assim o maciço rochoso em fragmentos de menor dimensão.

Estudos mais recentes, em modelos físicos com a aplicação da técnica de fotoelasticidade, em modelos matemáticos e também através de testes no campo, deram origem a uma nova teoria no estudo do mecanismo de fragmentação. Segundo este estudo da dinâmica da rocha, a detonação de uma carga explosiva confinada em um maciço rochoso (estudo feito inicialmente para cargas esféricas e depois estendido para cargas cilíndricas) apresenta duas fases distintas e características: uma Fase Dinâmica correspondente à ação das

ondas de choque através do maciço rochoso (geralmente dentro dos primeiros 5 milisegundos após a ignição do explosivo), e uma Fase Quase-Estática correspondente ao trabalho mecânico realizado durante o processo de expansão ou descompressão dos gases da detonação (normalmente 50 milisegundos após a ignição do explosivo).

2.2.1. Fase Dinâmica

A detonação de um explosivo é caracterizada pela presença de uma onda de choque que percorre a coluna de carga, com uma velocidade variável em função deste explosivo e das condições de ignição e confinamento. A Fase Dinâmica da detonação inicia-se, justamente, com o aparecimento desta onda de choque percorrendo a carga de explosivo.

Tal onda de choque, ao percorrer a coluna de explosivo, propaga-se pelo maciço vizinho e afastando-se concentricamente, atuando com pulsos de compressão até atingir a face livre, onde se reflete e retorna para o interior do maciço aplicando esforços de tração a este. A seqüência cronológica dos eventos que ocorrem no caminhamento das ondas de choque é basicamente:

1. Surgimento das fraturas radiais;
2. Reflexão das ondas de choque na face livre;
3. Retorno das ondas de choque, tracionando o maciço e o consequente surgimento de fraturas tangenciais.

Essa seqüência é verificada em quatro zonas distintas ao redor do furo, como mostra a Figura 2:

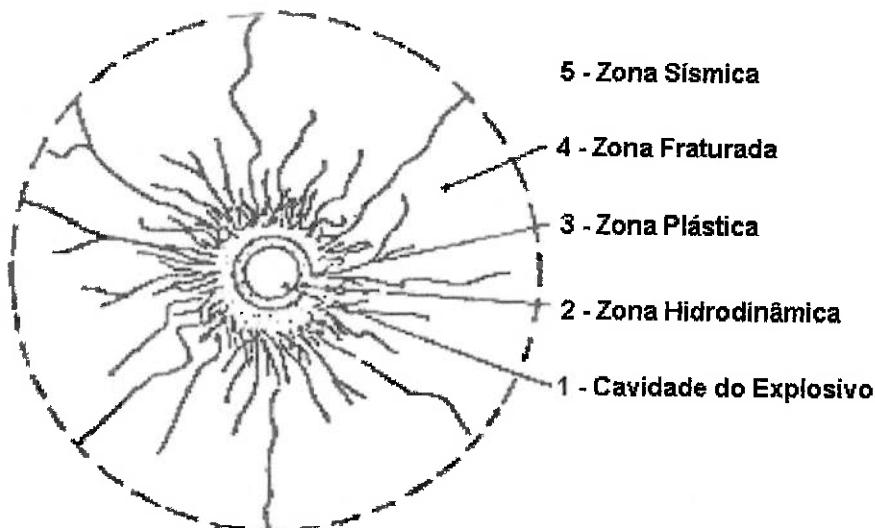


Figura 2: Zonas ao redor do furo (Lahóz, 1997)

Zona Hidrodinâmica – contígua à cavidade do explosivo, e assim denominada pois, face às altas pressões e temperaturas envolvidas no processo de detonação, a rocha nesta vizinhança se comporta como um fluido.

Zona Plástica – Ainda face as altas tensões, atuantes nesta zona, no regime plástico ocorre a pulverização da rocha que, inclusive, pode ser constatada na “meia cana” do furo após o desmonte.

Zona Fraturada – Devido às trações tangenciais à cavidade do furo, provocadas pelas ondas de compressão, que nesta zona ultrapassam a resistência à tração da rocha, aparecem fraturas radiais conhecidas também como “gretas”.

Zona Elástica – Também conhecida com Zona Sísmica, é a região na qual as tensões tangenciais não ultrapassam a resistência à tração da rocha. Por conseguinte, não ocorrem nesta zona, as fraturas radiais, porém há o surgimento de fraturas tangenciais decorrentes da reflexão das ondas de choque na face livre, que agora passam a tracionar o maciço.

A Fase Dinâmica termina com o aparecimento gradativo das fraturas tangenciais a partir das faces livres, até atingir de volta o plano que contém os furos de mina.

As ondas de detonação são basicamente de dois tipos: longitudinais ou primárias (ondas P) e transversais ou secundárias (ondas S). As velocidades com que estas ondas P e S se propagam pelo maciço são características de cada rocha, sendo maiores para as compactas e sãs, e menores para as menos compactas e/ou alteradas. Ao mesmo tempo as ondas P são

mais velozes que as ondas S. Alguns valores destas velocidades são ilustrados na Tabela 1 a seguir:

Tabela 1: Velocidades das ondas P e S

Material	Densidade	Velocidade (m/s)	
		Onda P	Onda S
Granito	2,67	3960 – 6100	2130 – 3350
Gabro	2,98	6550	3440
Basalto	3,00	5610	3050
Dunito	3,28	7990	4080
Arenito	2,45	2440 – 4270	910 – 3050
Calcário	2,65	3050 – 6100	2740 – 3200
Folhelho	2,35	1830 – 3960	1070 – 2290
Sal	2,20	4390 – 6490	-
Gipsita	2,30	2130 – 3660	1100
Ardósia	2,80	3660 – 4450	2870
Mármore	2,75	5790	3510
Quartzito	2,85	6050	-
Xisto	2,80	4540	2870
Gnaissé	2,65	4720 – 5580	-
Aluvião	1,54	500 – 1980	-
Argila	1,40	1130 – 2500	580

2.2.2. Fase Quase-Estática

Esta fase ocorre quando os gases da detonação, em altas pressões e temperaturas, resultantes da reação química da detonação do explosivo, confinados na cavidade da rocha, procuram seu caminho de saída para a atmosfera.

Neste processo eles penetram pelas fraturas radiais e em seguida pelas tangenciais, separando os blocos, movimentando-os para frente, realizando o processo mecânico de fragmentação e lançamento do maciço rochoso, iniciado pela fase anterior.

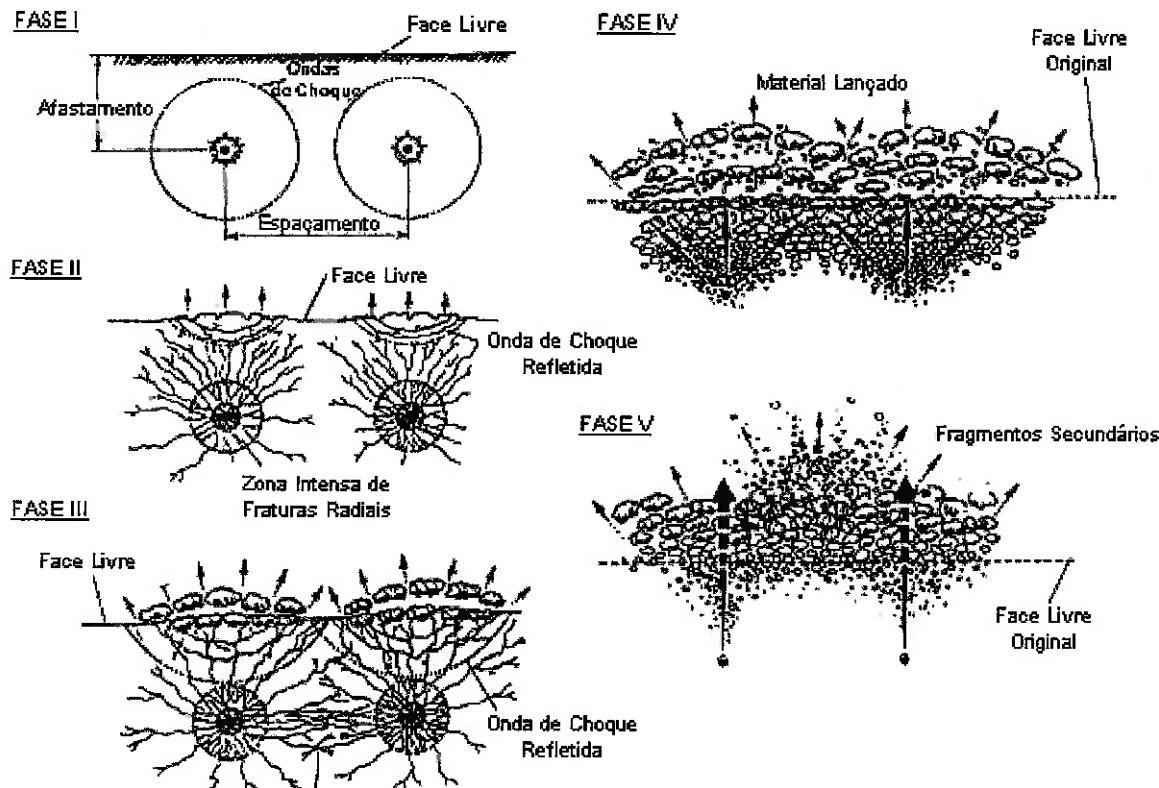


Figura 3: Mecanismos de quebra (modificado - Lopez Jimeno, 1995)

2.3. Razão de Carga (*Powder Factor*)

De acordo com o Dr. Timothy N. Hagan (IBRAM, 1996), a razão de carregamento ou *Powder Factor* ou Fator de Explosivo é o peso do explosivo (em Kg ou g) utilizado para o desmonte de um metro cúbico de rocha sólida, *in situ*. Em minas a céu aberto, as razões de carregamento para as detonações de desmonte de produção podem variar de aproximadamente 0,2 a 1,0 kg/m³. Se a razão de carregamento for expressa em kg/tonelada, é importante qualificar o número com a informação da densidade da rocha. Muita importância tem sido dada em relação à razão de carga como critério do planejamento do plano de fogo. Como as razões são definidas pelo peso em vez da força do explosivo, uma comparação entre dois produtos diferentes pode não ser possível.

A razão de carga é determinada pela quantidade total de explosivo carregada em uma bancada, dividida pela malha de perfuração afastamento x espaçamento, pela altura da bancada, e pelo número de furos e linhas; ou seja, dividida pelo volume de rocha *in situ*.

2.4. Tipos e Características de um Explosivo

A força de um explosivo é a medida de sua habilidade para realizar trabalho de fragmentação e deslocamento de um maciço rochoso. A energia disponível por unidade de massa de um explosivo comparado com a do ANFO é a definição para a força em peso (“*Weight Strength*”). É uma comparação entre o ANFO, que é um padrão comum para comparar misturas explosivas comerciais e a ele é arbitrado o valor 100.

Os explosivos sensíveis a detonadores, também conhecidos com altos explosivos, incluem explosivos em emulsão, do tipo *watergel*, dinamites e reforçadores (*boosters*). Até pouco tempo atrás, quando se necessitava de um explosivo resistente à água e de confiança, achava-se necessário o uso de explosivos à base de NG (nitroglicerina). Hoje, os cabos de fogo também podem escolher com alto grau de confiança, uma emulsão.

A emulsão é um explosivo do tipo “água-em-óleo” (“*water-in-oil-type*”). Eles consistem de microgotículas de solução oxidante supersaturada dentro de uma matriz de óleo. O oxidante dentro das microgotículas consiste principalmente de nitrato de amônia, o que maximiza o rendimento energético e minimiza custos de produção e preço de venda. Cada um dos ingredientes de um explosivo em emulsão é um composto não-explosivo. Por ser do tipo água-em-óleo, a emulsão oferece excelente resistência à água.

O ANFO consiste de NA (Nitrato de Amônio) e óleo diesel. Uma emulsão padrão não tem força em peso teórica (ou seja, rendimento energético teórico por unidade de peso) tão alta quanto a do ANFO por consistir de oxidantes, combustível e água. Se a força em peso do ANFO é padronizada como 100, a força em peso calculada de uma emulsão pode ser dita com sendo 80. Mas isto não significa que a eficiência do desmonte de uma emulsão seja de 80% do que se fosse realizada com ANFO. Os rendimentos energéticos reais da emulsão são maiores que o esperado, devido ao alto grau de interligação combustível/oxidante das emulsões. A densidade da emulsão varia normalmente entre 1,1 a 1,2g/cm³, portanto, baseada em uma força de peso relativa calculada de 80, uma emulsão com densidade de 1,15g/cm³ tem força em peso relativa de (IBRAM, 1996):

$$\text{FORÇA PESO} = 80 \times \frac{1,15}{0,84} = 110$$

Onde 0,84 é a densidade média admitida para uma polpa de ANFO.

2.5. Velocidade de Detonação

A velocidade de detonação (*VOD – Velocity of Detonation*) é a velocidade na qual a frente de detonação se propaga através da carga explosiva. Esta velocidade é influenciada pela densidade, pelo diâmetro da carga, pelo tamanho das partículas do explosivo e pelo grau de confinamento da carga. A VOD controla a taxa em que a energia do explosivo é liberada e por extensão, a proporção do choque em relação às partículas de energia que compõem a energia total. Quanta mais alta a VOD, maior é a habilidade do explosivo em quebrar a rocha. Uma faixa aproximada da VOD para a maioria dos explosivos comerciais é de 3.000 m/s para alguns explosivos a base de ANFO, até 6.500 m/s para algumas emulsões explosivas. Mas a performance de um explosivo não necessariamente cresce com o aumento da VOD (Sen, 1995).

Explosivos de alta velocidade são adequados para maciços rochosos competentes, enquanto que os de baixa velocidade são adequados para rochas mais fissuradas e fraturadas. Um explosivo com uma baixa VOD libera sua energia relativamente de maneira lenta, e normalmente uma grande proporção de sua energia total é liberada na forma de gás, então promovendo o deslocamento de materiais mais leves. Os explosivos com alta velocidade de detonação irão prover uma grande proporção de sua energia na forma de energia de choque, sendo então mais adequados a rochas duras e competentes.

A VOD de um explosivo pode ser utilizada para estimar a eficiência com que o explosivo é detonado. Isto é conseguido comparando a VOD medida com a VOD teórica, para o explosivo em particular, naquele ambiente de detonação também em particular. Baer *et al* (1984) relaciona a VOD para calcular a fração em volume do explosivo envolvido na reação na frente de detonação. Pode ser definida na equação 1:

$$N = \left(\frac{D}{D^*} \right)^2$$

Onde:

N = fração volumétrica do explosivo que reagiu

D = Velocidade medida de detonação (m/s)

D^* = Velocidade teórica termohidrodinâmica de detonação (m/s) – pode ser normalmente fornecida pelo fabricante do explosivo.

Percebe-se, então, que em uma pequena redução na VOD, seja por mistura pobre ou ignição inadequada, pode representar em uma redução significante na energia total disponível do explosivo.

Tabela 2: Valores de VOD para alguns tipos de explosivos

Tipo de Explosivo	Velocidade de detonação (m/s)
ANFO	2.200 – 4.000
Watergels	3.500 – 5.000
Emulsões	4.500 – 6.100
Explosivos à base de nitroglicerina	3.500 – 5.500

2.6. Perfilagem via Laser e Auditagem da Furação (Laser Profile & Boretrak)

Para se ter um bom controle da detonação, a face a ser desmontada deve ser mapeada com um equipamento do tipo *laser profile* ou semelhante, e a linha de furos da frente desenhada para atender o afastamento e espaçamento requeridos. Com a ajuda do *software* de perfilagem, é feita a marcação dos furos e a profundidade necessária para cada um deles, com o requisito de uma bancada nivelada e pé ajustado. Feita a perfuração dos furos projetados, é feita novamente a leitura da face e a auditagem dos furos, com o equipamento *Boretrak*. Assim, é possível visualizar tridimensionalmente os furos, com os afastamentos reais de acordo com a profundidade, de metro em metro. Deste modo, pode-se tomar as medidas necessárias na hora do carregamento dos explosivos, de redução de carga, alívio, comprimento do tampão e outros.



Figura 4: Laser Profile (Orica Brasil Ltda.)

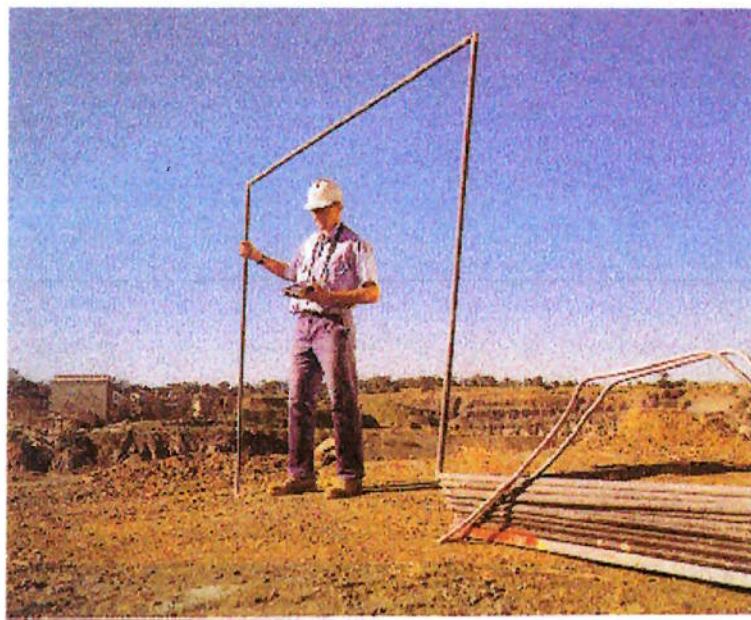


Figura 5: Boretrak – Auditagem de furação (Beevers, 1994)

2.7. Fragmentação da Rocha

Uma boa fragmentação da rocha é subjetiva, e deve-se considerar o uso dos produtos finais e da utilização, tipo e tamanho dos equipamentos de carregamento e transporte. Carregadeiras e caminhões de grande tamanho permitem trabalhar com blocos de material desmontado maiores, assim como britadores de grande abertura. Mas, no entanto, o intuito de tais tamanhos de equipamentos diz respeito à capacidade de trabalhar com maiores volumes de material, e não com blocos de grandes dimensões.

A fragmentação ideal é também aquela em que não se necessita de um retrabalho no resultado do desmonte primário. Deste modo, os parâmetros para as operações subsequentes determinam qual é o tamanho ótimo dos fragmentos. Por exemplo, se a rocha será cominuída em um britador, a maior dimensão dos fragmentos não deve ser superior a 80% da abertura da boca do britador (Persson, 1994).

Os fatores que influem na fragmentação são:

1. Geologia da rocha (falhas, juntas, etc.),
2. Razão de perfuração,
3. Razão de carregamento,
4. Malha de perfuração,
5. Padrão de detonação,
6. Inclinação do furo,
7. Desvio da furação,
8. Tamanho da bancada.

Este trabalho visa estudar especificamente a influência da razão de carga no resultado da fragmentação. A rocha será mais fragmentada quanto maior for a razão de carga, mantendo a malha de perfuração. Portanto, a fragmentação será melhor, reduzindo a ocorrência de matacos, mas como consequência a rocha será lançada com muito mais intensidade, aumentando o risco de ultra-lançamento.

O objetivo primário da detonação é o de fraturar a rocha em fragmentos que possam ser eficientemente escavados e manuseados nos processos subsequentes. A natureza do

maciço rochoso e do processo de fragmentação envolvidos no desmonte resultam na geração de uma distribuição de tamanhos de fragmentos, e não em um tamanho consistente e uniforme. Esta distribuição pode ser medida e prevista, e pode ser controlada com certa tolerância de acordo com a variabilidade do maciço rochoso e da precisão com que o plano de fogo é implementado.

Os fatores que afetam a performance da detonação em termos da fragmentação incluem (Scott, 1996):

1. Blocos (matacos),
2. Finos,
3. Escavabilidade,
4. Transporte do material, e
5. Especificações do cliente.

2.7.1. Blocos oversize (Matacos)

É a ocorrência de blocos e fragmentos que possuem dimensões excessivas, grandes demais para serem eficientemente escavados, transportados ou processados. Eles devem ser retrabalhados, de forma mecânica ou com detonações secundárias. Tais detonações secundárias consomem tempo, são caras e potencialmente mais perigosas do que as detonações primárias. Uma maneira de se medir a eficiência da detonação é no monitoramento das extensões das detonações secundárias e na ocorrência de matacos.

2.7.2. Finos

Fragmentação excessiva leva à geração de uma proporção significativa de material fino. Esta é uma consequência de pouca importância se na remoção de estéril, mas pode ter um impacto econômico significativo na eficiência do processamento e valor dos produtos minerais. Produtos de brita devem ser vendidos com base de tamanho e forma dos fragmentos, e a geração de finos excessiva pode resultar em produto não desejado.

2.7.3. Escavação

O material detonado não deve somente se ajustar fisicamente na caçamba da escavadeira, como também se ajustar de modo a não reduzir o coeficiente de enchimento desta, ou o tempo de enchimento. Alguns operadores podem até carregar blocos e matacos na caçamba, mas a uma produtividade muito mais reduzida e com certa insegurança. A produtividade de equipamentos é diretamente afetada pela distribuição de tamanhos do material, e também é uma maneira de se medir a performance da detonação.

2.7.4. Transporte

Os caminhões são projetados para transportar várias caçambas de material, portanto são mais tolerantes quanto ao material *oversize* do que a escavadeira em si. No entanto, blocos grandes podem causar problemas no transporte, como no impacto da queda de tais blocos no corpo do caminhão, podendo danificá-lo mecanicamente. Quando transportando material para remoção de estéril, blocos muito grandes não são de muita importância, mas isto não é verdade quando transportados para a britagem. Também, os britadores e transportadores de correias são fatores limitantes da distribuição de tamanho.

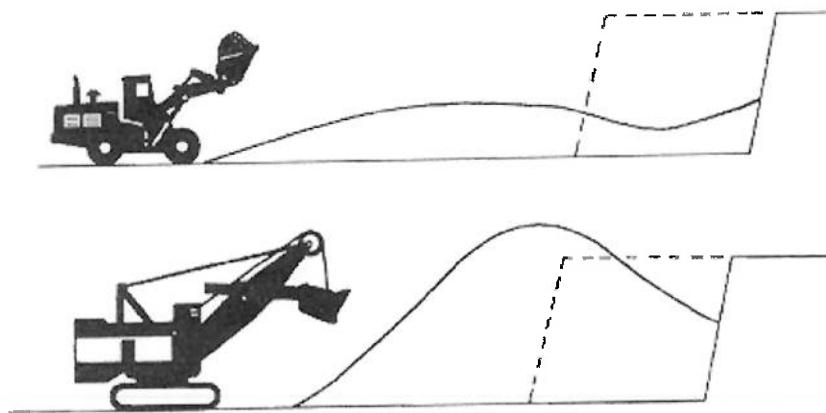


Figura 6: Perfil da pilha de acordo com o equipamento utilizado (Lopez Jimeno, 1995)

2.8. SABREX

O software *SABREX (Scientific Approach to Blasting Rock with Explosives)*, de utilização do grupo *ORICA EXPLOSIVES*, realiza a modelagem da detonação a fim de predizer a performance desta. Tais modelos por computador podem ser utilizados para avaliar

rapidamente várias alternativas para o projeto da detonação, reduzindo a necessidade de triagens em escala real que dispensam tempo e custo (Beevers, 1994)

O SABREX é um modelo computacional para predizer a performance da detonação em termos de:

1. Distribuição de tamanho da fragmentação;
2. Movimento da pilha;
3. Perfil da pilha;
4. Dano remanescente na bancada.

Vale lembrar que algumas aplicações práticas do SABREX são:

1. Determinar o efeito de variações no diâmetro do furo, padrão de detonação, tipo de explosivo e seqüência de ignição no resultado da pilha e na fragmentação;
2. Determinar os efeitos de desvios do projeto (exemplo: locação incorreta das minas);
3. Efeitos de diferentes tipos de propriedades da rocha;
4. Projetar uma técnica de desmonte para prover um resultado específico, consistindo de fragmentação otimizada, dano reduzido e uma pilha de perfil definido.

O método utilizado pelo SABREX baseia-se na criação de um modelo em que a geometria das minas e as fraturas radiais formadas ao redor de cada uma são representadas em um plano horizontal que intersecta perpendicularmente as colunas de explosivos.

O algoritmo utilizado para calcular o número de fraturas radiais ao redor de cada carga e a uma determinada distância desta é:

$$N_0 = \frac{\sigma_b}{RT^l}$$

Onde:

N_0 = número de fraturas ao redor da carga,

σ_b = tração na parede do furo de mina,

RT' = resistência à tração dinâmica da rocha

A uma distância DS do eixo do furo de mina, o número de fraturas será N:

$$N = \frac{N_0}{DS/b} \cdot e^{-\alpha \cdot \frac{bs}{b}}$$

Onde:

b = raio do furo de mina,

α = coeficiente de absorção, que varia entre 0,002 e 0,008.

Os parâmetros geomecânicos da rocha que são utilizados na modelagem são:

1. Densidade,
2. Módulo de Young,
3. Coeficiente de Poisson,
4. Resistência à compressão,
5. Resistência à tração,
6. Porosidade.

Os dados básicos do explosivo utilizado relacionam-se à energia induzida na parede do furo, que é uma função da densidade do explosivo, da velocidade de detonação e do acoplamento da carga.

A orientação das fraturas é originada de forma aleatória, para cada furo, e sua propagação pela ação de abertura dos gases é interrompida quando alcançam uma face livre ou um comprimento máximo equivalente ao tamanho do afastamento.

Em detonações múltiplas em seqüência, a propagação das fraturas em furos adjacentes é paralisada no momento em que as fraturas se interceptam. Deste modo, o efeito que um mesmo padrão de detonação agindo em diferentes seqüências de ignição podem ser estudadas.

Após ter gerado o padrão de fraturas para cada furo, a avaliação da fragmentação é feita pelo método de Monte Carlo, que consiste em analisar diferentes pontos aleatórios no

plano. Para cada um destes pontos o tamanho do bloco, formado pelas fraturas radiais, incluso naqueles pontos, é determinado, como mostrado na Figura 7.

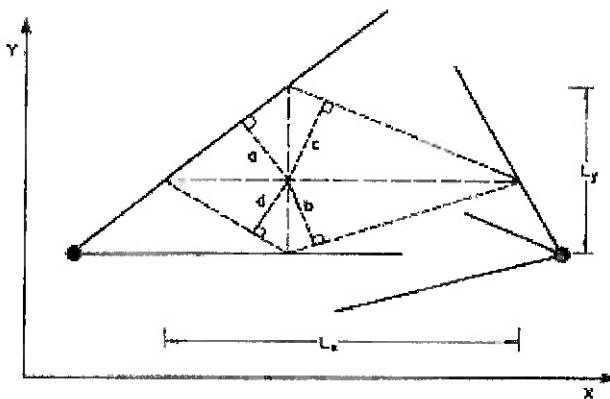


Figura 7: Determinação do tamanho de blocos entre fraturas radiais (Lopez Jimeno, 1995)

Pela repetição deste processo por um determinado número de vezes, a curva de distribuição de tamanho pode ser gerada.

Algumas das aplicações deste modelo de simulação de fragmentação são baseadas nos seguintes estudos:

1. Efeitos de diferentes tipos de explosivos para o mesmo padrão de furação,
2. Influência da sequência de iniciação na fragmentação,
3. Repercussão de falhas,
4. Efeitos da estrutura do maciço rochoso nos resultados do desmonte.

Para esta última aplicação, o processo inicia com a modelagem das descontinuidades do maciço rochoso, como mostra a Figura 8:

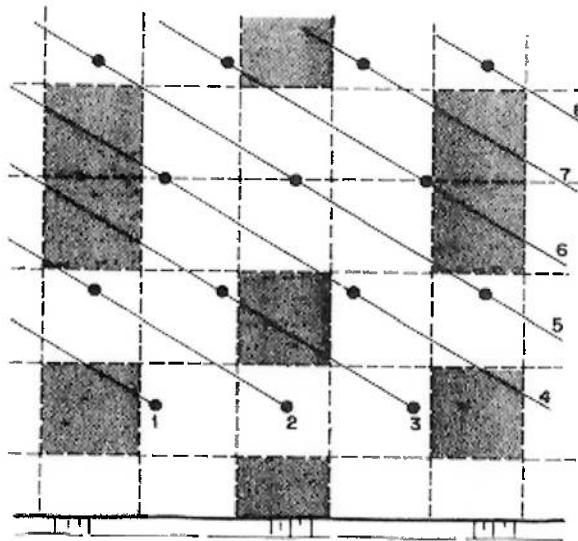


Figura 8: Modelagem das descontinuidades do maciço (Lopez Jimeno, 1995)

Se o padrão de furação é grande, em relação ao espaçamento das juntas naturais, a distribuição de tamanho da pilha será afetada por grandes blocos previamente formados por descontinuidades. A influência destas fissuras na rocha pode ser avaliada considerando diferentes tipos de preenchimento nas juntas, e consequentemente diferentes tipos de coeficientes de absorção das ondas de choque quando estas cruzam tais planos.

Na Figura 9, pode-se ver um exemplo de modelagem para um determinado padrão e iniciação.

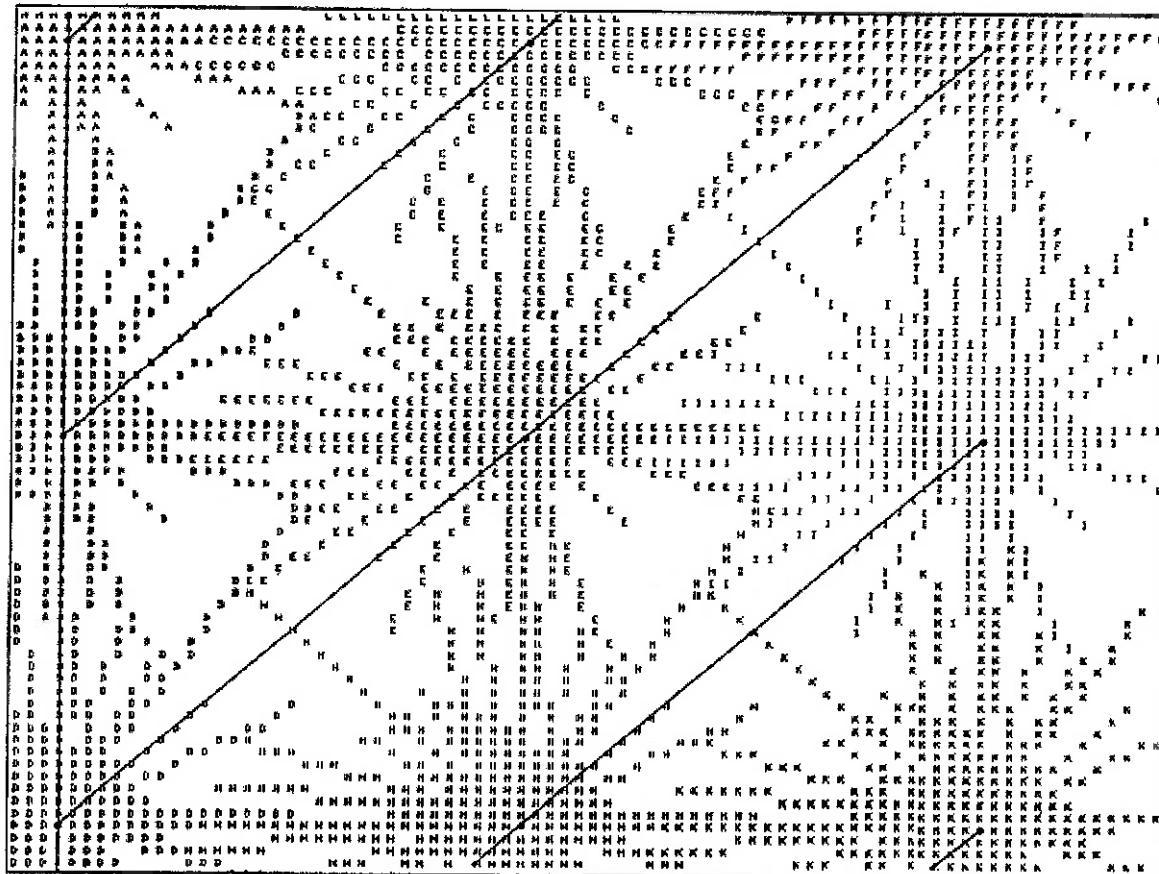


Figura 9: Representação das fissuras originadas ao redor de cada furo (Lopez Jimeno, 1995)

3. METODOLOGIA DE TRABALHO

O trabalho tem como metodologia a análise de dados reais da pedreira *Embu S.A.*, localizada no município de mesmo nome, na Grande São Paulo. Foram selecionadas de 1 a 2 frentes de detonação, de onde se coletaram os dados do estudo.

Com os dados dos arquivos existentes, fornecidos pelos profissionais da pedreira, é feito o cadastramento de tais dados como malha, inclinação, volume de material, metros perfurados, razão de carga, e quantidade de fogachos (blocos de grande tamanho).

É feita então a entrada dos parâmetros de calibragem do SABREX, de acordo com as propriedades da rocha, e a seguir, todo o ajuste dos parâmetros de detonação no *software*, como mostrado a seguir.

A Figura 10 mostra uma caixa de diálogo representando a edição das propriedades da rocha, com densidade, resistência à compressão, tração, módulo de Young e coeficiente de

Poisson. Tais dados foram assumidos como reais, próximas das propriedades da rocha encontrada na localidade, servindo então como método de calibragem do SABREX.

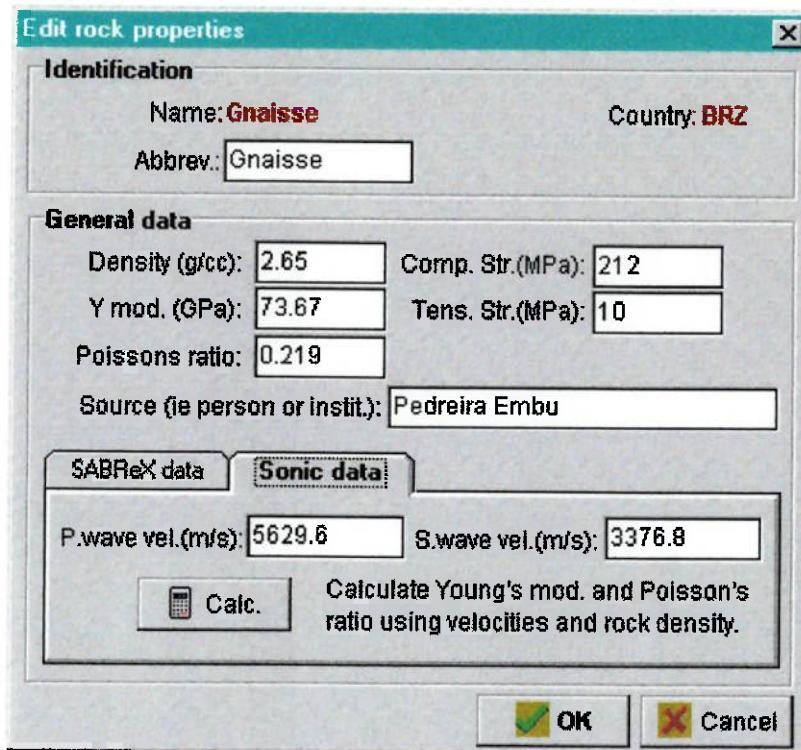


Figura 10: Propriedades da rocha

Após a entrada de dados de propriedades da rocha, o próximo passo é a entrada dos dados de geometria da bancada, como mostrado na Figura 11. Inclui-se então altura da bancada, ângulo de face, grade, largura do pit, existência de pilha, etc.

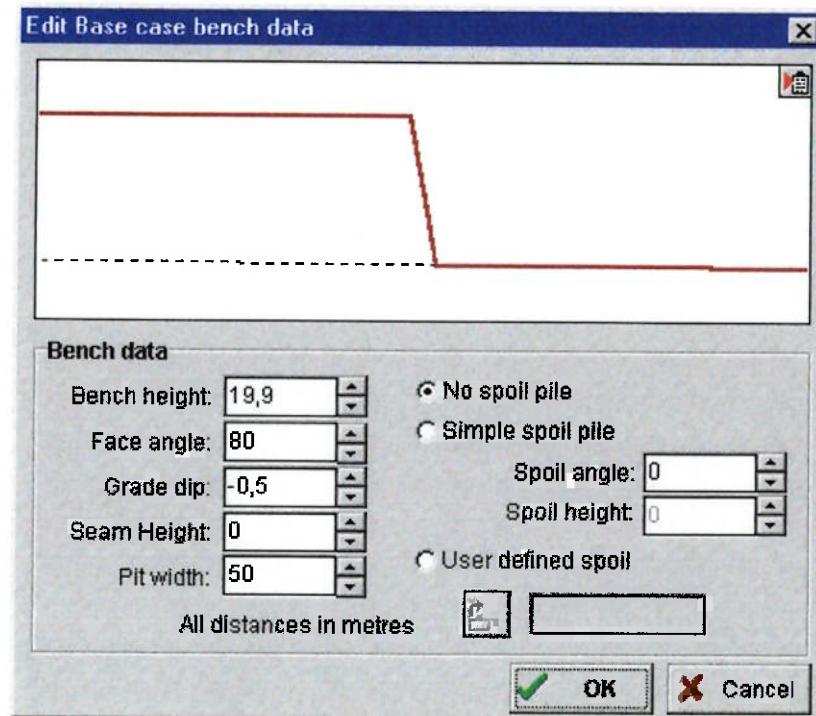


Figura 11: Geometria da bancada

Na seqüência, é feita a entrada do padrão de furação, como mostra a Figura 12. No caso, com o diâmetro real e o custo de furação por metro, e se a malha é quadrada ou intercalada, com o “pé de galinha”.

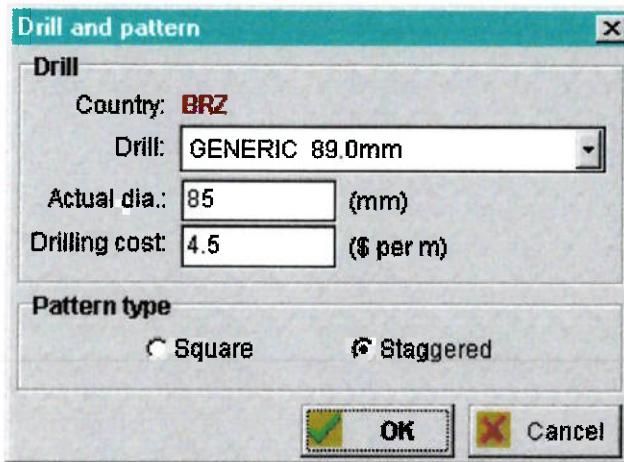


Figura 12: Padrão de furação

O carregamento de explosivos é feito a partir de um banco de dados existente, dos explosivos de fabricação da empresa Orica Brasil Ltda., com os respectivos dados de densidade, força, e custo a definir. Tal esquema pode ser visto na Figura 13.

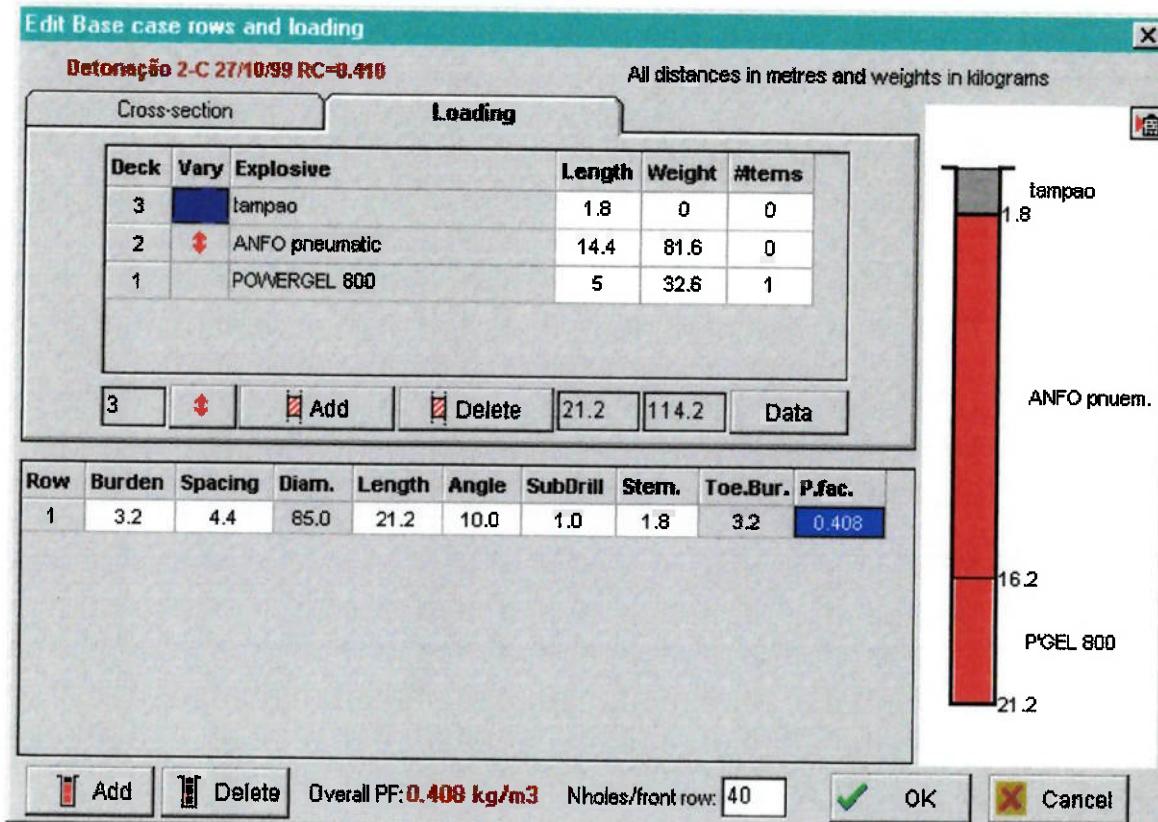


Figura 13: Carregamento de explosivos

Na caixa de diálogo acima, pode-se também observar o cálculo automático da razão de carga, $PF=0,408 \text{ kg/m}^3$, para o caso base de dados do início da década de 90.

Com todos os dados já inseridos, resta apenas a entrada dos dados de iniciação da detonação, com os retardos utilizados. Como mostra a Figura 14, inclui-se a espera entre linha e entre furos.

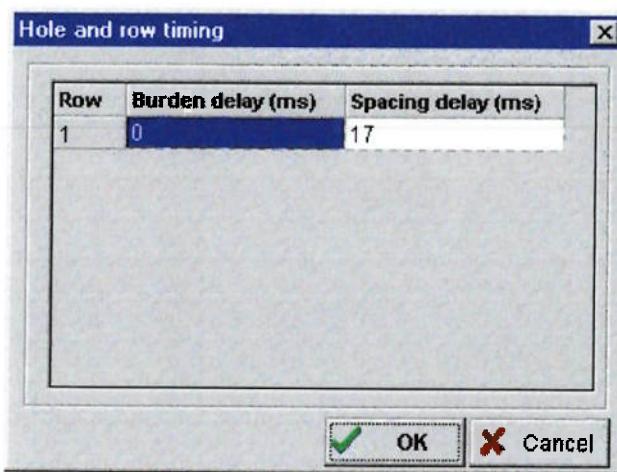


Figura 14: Retardos utilizados

A seguir, incluem-se os dados de custos de acessórios utilizados, como cordel detonante, espoletas, iniciadores, etc. como mostrado na Figura 15.

Accessory data				
Accessories				
Name	Cost \$	units	#hole	\$/Hole
CORD.18 spool	0,8	/m	2	1,6
EXEL CA 21m	0,9	/item	1	0,9

Add CORD.18 spool

Delete

OK

Figura 15: Dados de acessórios

Na Figura 16, observa-se a tela principal do SABREX, com os vários casos em estudo, feita uma comparação entre eles.

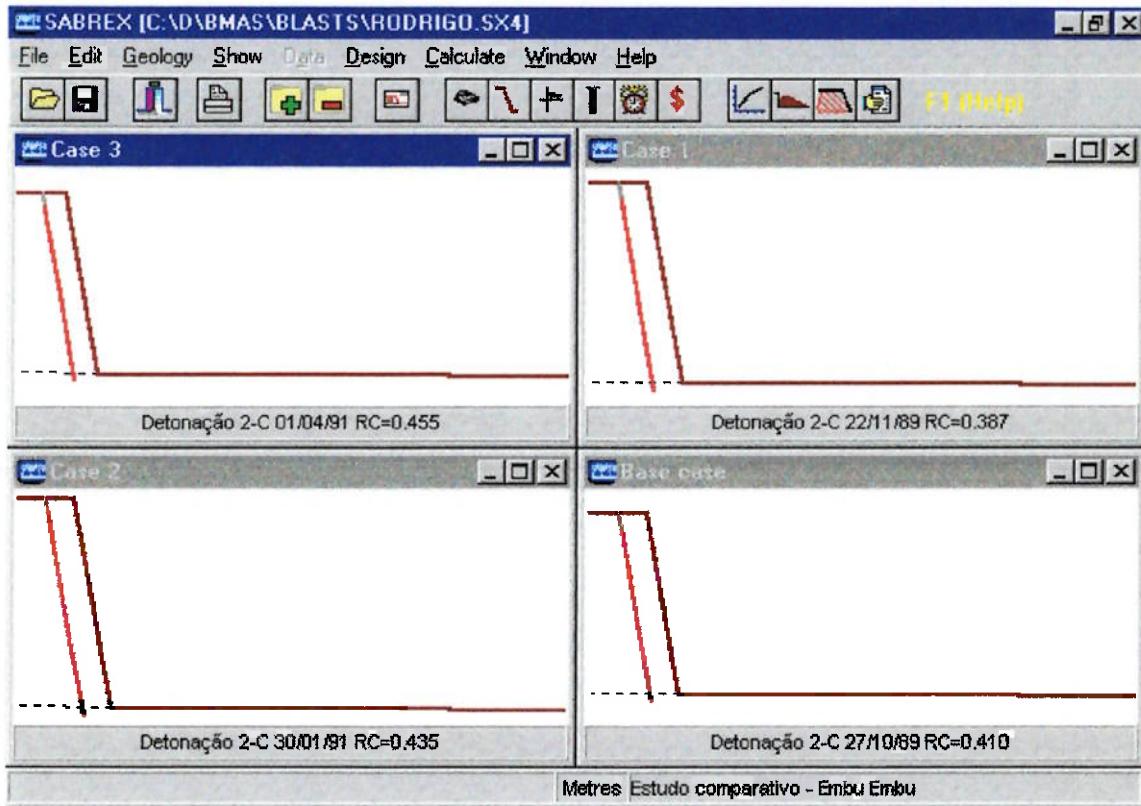


Figura 16: Tela principal do SABREX com os casos em estudo

Os resultados apresentados pelo programa têm como principais aspectos a simulação da fragmentação, lançamento de pilha, e análise de danos na rocha remanescente, além de um sumário relacionando os custos associados à detonação.

4. DADOS EXPERIMENTAIS

Os dados escolhidos para se realizar a comparação foram tomados de uma forma genérica, como uma média aproximada das detonações, para uma determinada frente da pedreira, no caso frente 2-C. Foi feito um estudo para os dados considerados antigos, do início da década de 90, em que se utilizava uma razão de carga diferente da utilizada atualmente. Da mesma forma, foi feito um estudo para os dados atuais, cada uma com suas respectivas características de geometria, padrão de carregamento, custos, razão de carga, etc.

4.1. Detonações “Antigas”

A Tabela 3 mostra as características de três detonações, realizadas nas datas citadas também na tabela.

Tabela 3: Estudos Casos Antigos

	Base Case	Case 1	Case 2
Data	27/10/89	22/11/89	20/01/91
Bancada			
Altura (m)	19,9	22	23
Ângulo de Face	80	80	80
Largura do pit (m)	50	50	50
Grade de drenagem	-0,5	-0,5	-0,5
Padrão			
Tipo de furação	Intercalada	Intercalada	Intercalada
Diâmetro do bit (mm)	85	85	85
Número de linhas	1	1	1
Furos/linha	40	37	32
Afastamento médio (m)	3,2	3,2	3,1
Espaçamento médio (m)	4,4	4,3	4,2

Continuação – Tabela 3: Estudos Casos Antigos			
Razão de carga média (kg/m^3)	0,408	0,464	0,435
Volume da detonação (m^3)	11.200	11.194	9.577
Massa de detonação (t)	29.679	29.663	25.379

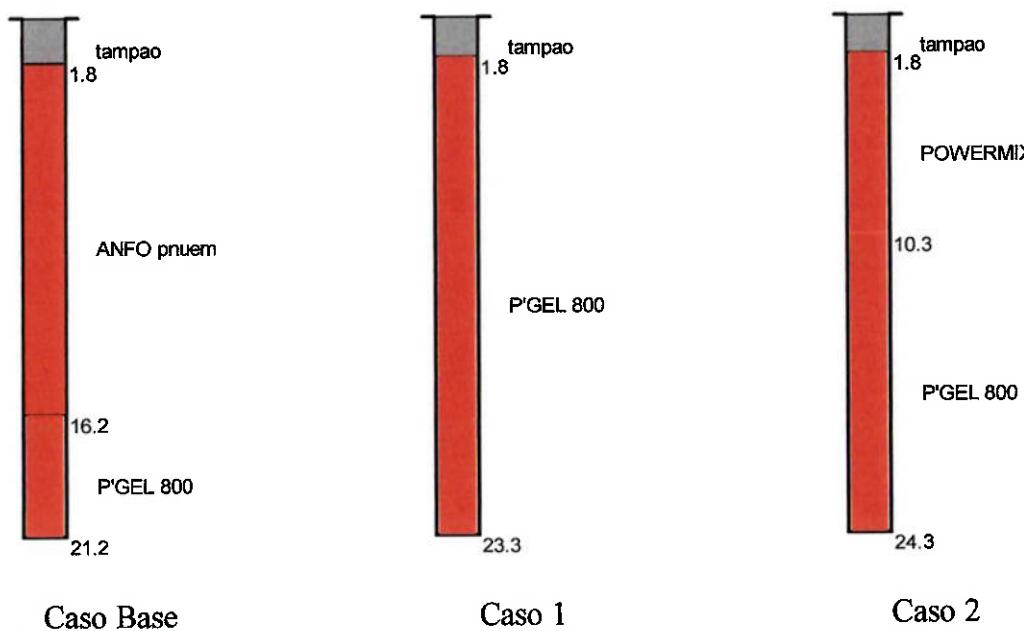


Figura 17: Formas de carregamento dos furos - Detonações antigas

A Figura 17 mostra os explosivos utilizados no carregamento dos furos. Foram assumidas formas variadas de carregamento, com a utilização de ANFO, explosivo encartuchado (POWERGEL), e explosivo granulado ANFO (POWERMIX), que eram utilizadas na época.

4.2. Detonações Atuais

A Tabela 4, assim como no item anterior, mostra os dados de detonações recentes.

Tabela 4: Estudos Casos Atuais

	Base case	Case 1	Case 2
Data	06/05/99	02/06/99	04/08/99
Bancada			
Altura (m)	20,3	20	20,4

Continuação - Tabela 4: Estudos Casos Atuais			
Ângulo de Face	80	80	80
Largura do pit (m)	50	50	50
Grade de drenagem	-0,5	-0,5	-0,5
Padrão			
Tipo de furação	Staggered	Staggered	Staggered
Diâmetro do bit (mm)	85	85	85
Número de linhas	1	1	1
Furos/linha	25	26	24
Afastamento médio (m)	3,1	3	3,1
Espaçamento médio (m)	2,8	2,7	2,8
Razão de carga média (kg/m^3)	0,746	0,701	0,732
Volume da detonação (m^3)	4.402	4.209	4.247
Massa de detonação (t)	11.666	11.154	11.254

A Figura 18 mostra as formas de carregamento de explosivos nos furos, utilizando emulsão bombeada, ANFO granulado, e encartuchado *POWERGEL 800*.

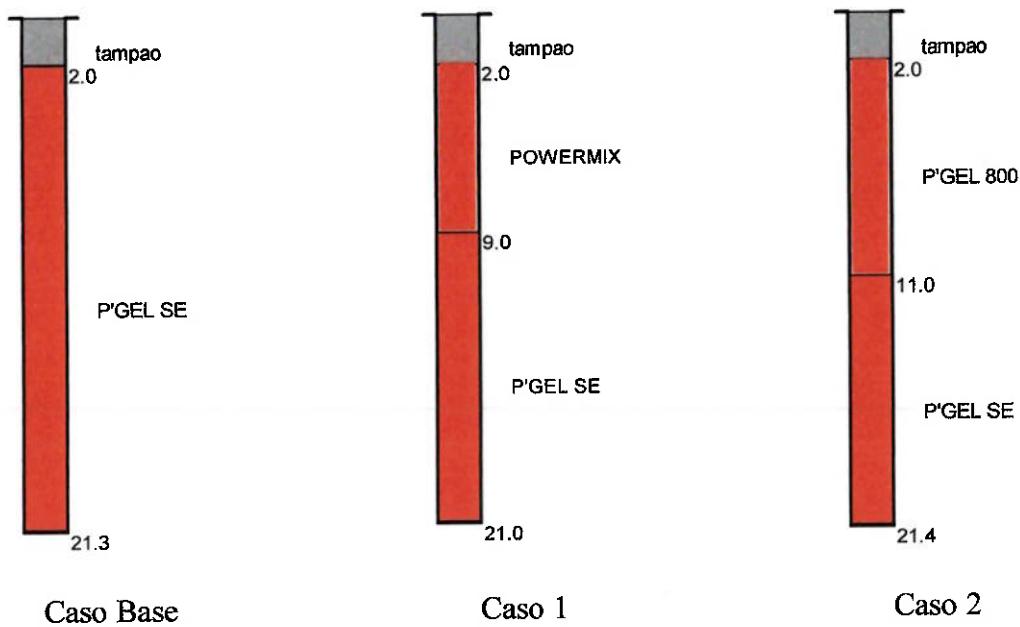


Figura 18: Formas de carregamento dos furos - Detonações atuais

Os dados acima, tanto de detonações antigas como as atuais, foram tratadas no SABREX, utilizando dados reais fornecidos pela pedreira EMBU.

Os preços adotados para explosivos nas detonações antigas são mostrados na Figura 19 a seguir. Tais preços foram cedidos por profissionais da empresa ORICA BRASIL Ltda., expressos em US\$/kg. Por serem confidenciais, foi mantida somente a ordem de grandeza de tais preços.

Edit explosive data		
Explosives		
Name (nominal density)	Cost	Density
ANFO pneumatic(1.00)	1.4	1
POWERGEL 800(1.15)	2	1.15
POWERMIX(0.80)	1	0.8
tampão(2.00)	0.1	2

Cost specified in \$/kg Density in g/cc

OK

Figura 19: Preços de explosivos nas detonações antigas

Na Figura 20, são mostrados os preços de explosivos para as detonações atuais.

Edit explosive data		
Explosives		
Name (nominal density)	Cost	Density
POWERGEL 800(1.15)	0.7	1.15
POWERGEL SE(1.25)	0.58	1.2
POWERMIX(0.80)	0.3	0.8
tampão(2.00)	0.1	2

Cost specified in \$/kg Density in g/cc

OK

Figura 20: Preços dos explosivos atuais

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

O software SABREX apresenta como resultados da simulação, relatórios de custos, gráficos de granulometria, lançamento de pilha e danos na rocha.

5.1. Custos

A seguir demonstram-se os custos associados às detonações, relacionando custo de explosivos e perfuração. Também existem custos associados aos acessórios utilizados, mas devido à diferença de características, propriedades e preços em relação aos utilizados antigamente e aos utilizados atualmente, não foram considerados tais custos.

5.1.1. Custos de Detonações Antigas

A Tabela 5 relaciona os custos associados às detonações antigas:

Tabela 5: Custos de detonações antigas

US\$ por m ³	Base case	Case 1	Case 2
Explosivos	0,648	0,935	0,747
Perfuração	0,378	0,385	0,406
<i>Total</i>	1,027	1,32	1,153
US\$ por t			
Explosivos	0,245	0,353	0,282
Perfuração	0,143	0,145	0,153
<i>Total</i>	0,387	0,498	0,435
US\$ por detonação			
Explosivos	7.261	10.463	7.151
Perfuração	4.236	4.313	3.892
<i>Total</i>	11.497	14.776	11.043

5.1.2. Custos de Detonações Atuais

A Tabela 6 relaciona os custos de detonações atuais:

Tabela 6: Custos de detonações atuais

US\$ por m³	Base case	Case 1	Case 2
Explosivos	0,445	0,365	0,477
Perfuração	0,484	0,518	0,483
<i>Total</i>	0,929	0,884	0,960
US\$ por t			
Explosivos	0,168	0,138	0,180
Perfuração	0,182	0,196	0,182
<i>Total</i>	0,351	0,334	0,362
US\$ por detonação			
Explosivos	1.961	1.538	2.026
Perfuração	2.129	2.182	2.053
<i>Total</i>	4.090	3.721	4.079

Analizando as tabelas acima, verifica-se que o custo da detonação atual é significantemente menor do que nas detonações antigas, levando em consideração que o preço do explosivo diminuiu historicamente. Também deve-se considerar que, com a diminuição da malha atualmente, inversamente a perfuração aumenta, aumentando então o custo desta.

O custo do metro perfurado no início da década de 90 era de US\$ 5,00/m ,enquanto que atualmente é de US\$ 4,00/m.

5.2. Fragmentação

O SABREX gera curvas granulométricas, como mostrado a seguir, em relação a porcentagem passante.

5.2.1. Granulometria das Detonações Antigas

A Figura 21 mostra a curva granulométrica das detonações antigas. Tal curva também se encontra no Anexo 1.

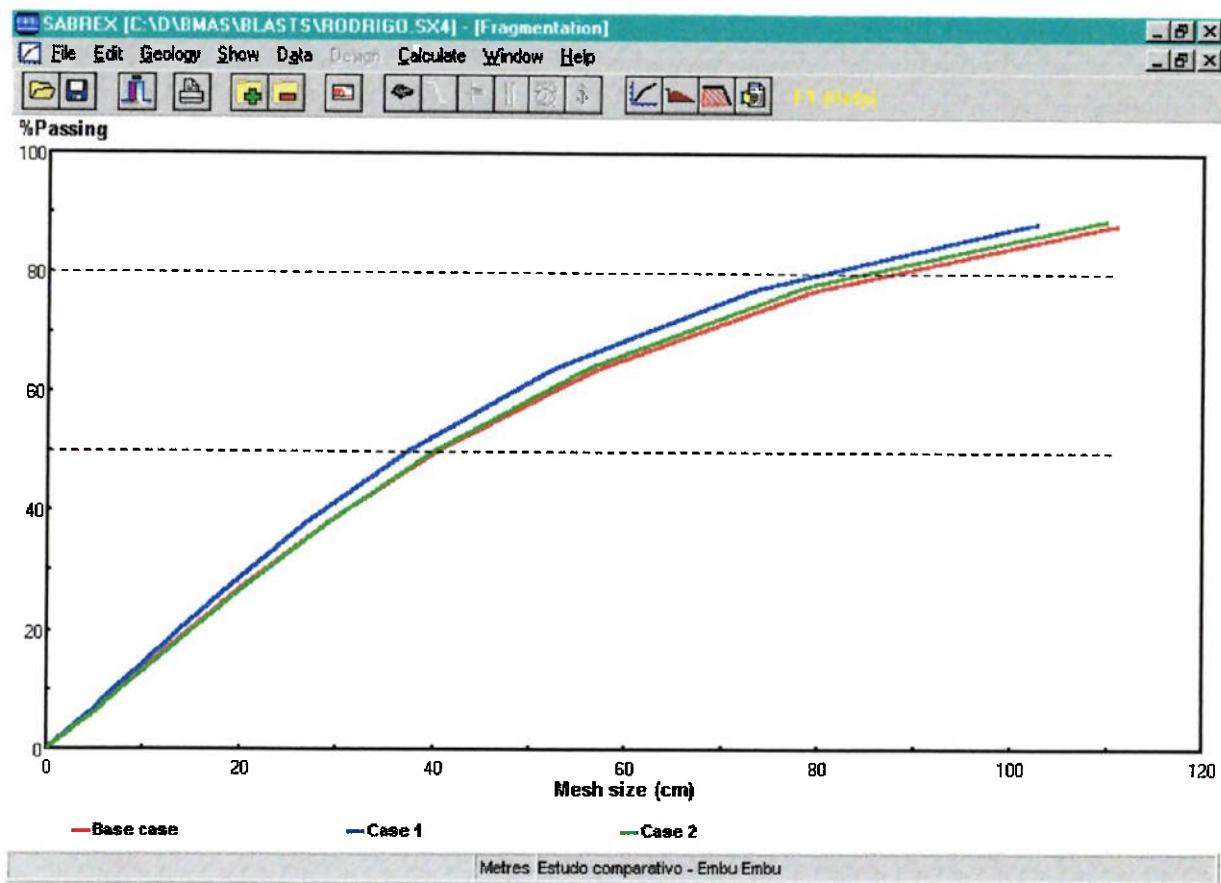


Figura 21: Granulometria das detonações antigas

5.2.2. Granulometria das Detonações Atuais

A Figura 22 mostra a curva granulométrica das detonações atuais, que também se encontra no Anexo 2.

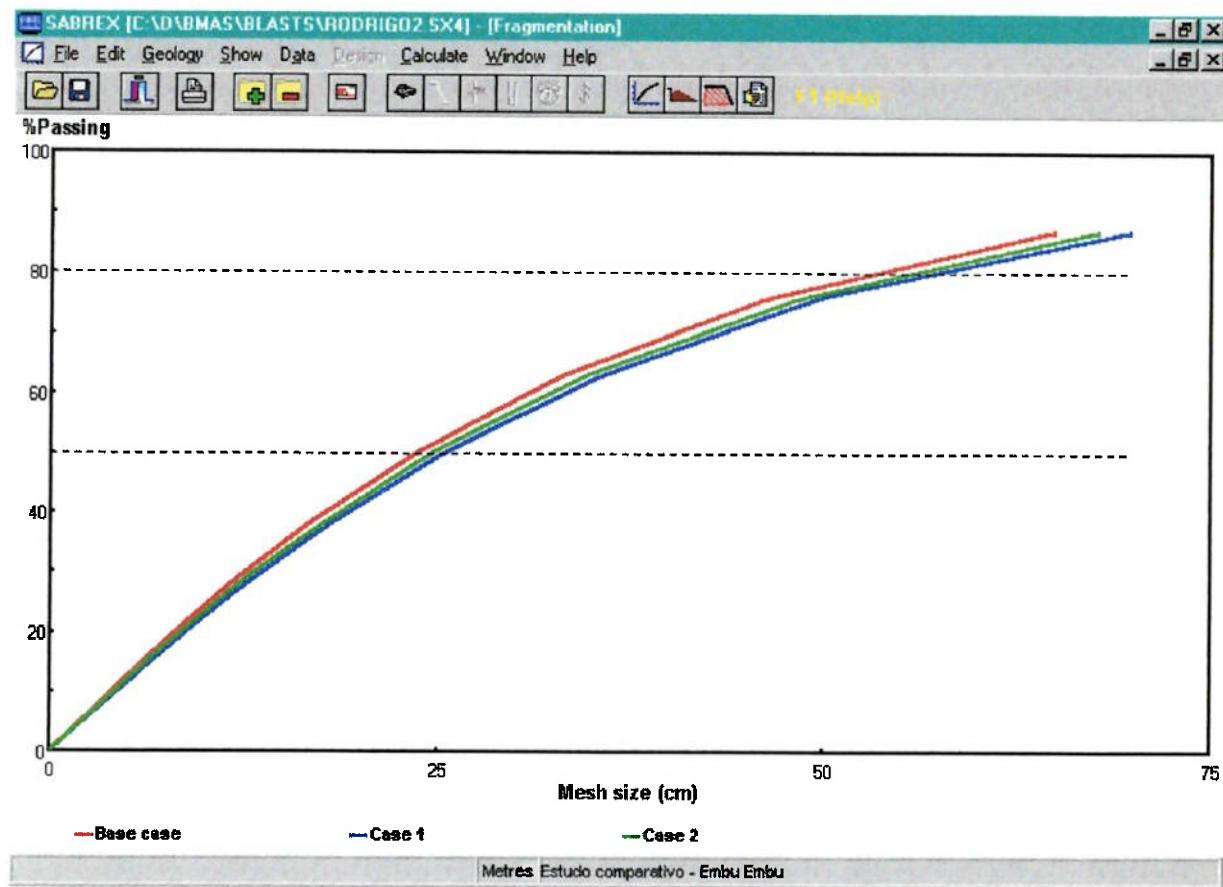


Figura 22: Granulometria das detonações atuais

5.2.3. Comparaçāo entre os Dois Estudos

A título de comparação, relacionaram-se os casos bases de cada uma das análises, detonações antigas com as atuais, plotados no gráfico da Figura 23.

A curva vermelha representa o caso de uma detonação atual, e a azul, uma detonação antiga. Observa-se claramente a diferença na fragmentação de cada uma, sendo a detonação atual, de melhor granulometria, ou seja, com o material mais fragmentado. Isto se deve à razão de carga mais alta, com diferentes explosivos, e diferente malha. Uma fragmentação deste tipo, como visto na detonação atual, é favorável para pedreiras com que uma parcela significativa de seus produtos seja de material fino. Com isso, garante-se que tal requisito seja atendido, como é o caso da Pedreira Embu.

Também com tal fragmentação, reduz-se a ocorrência de matacos e blocos, que ainda incidiriam com custos de perfuração e detonações secundárias, ou com o custo de equipamento de quebra de tais blocos mecanicamente.

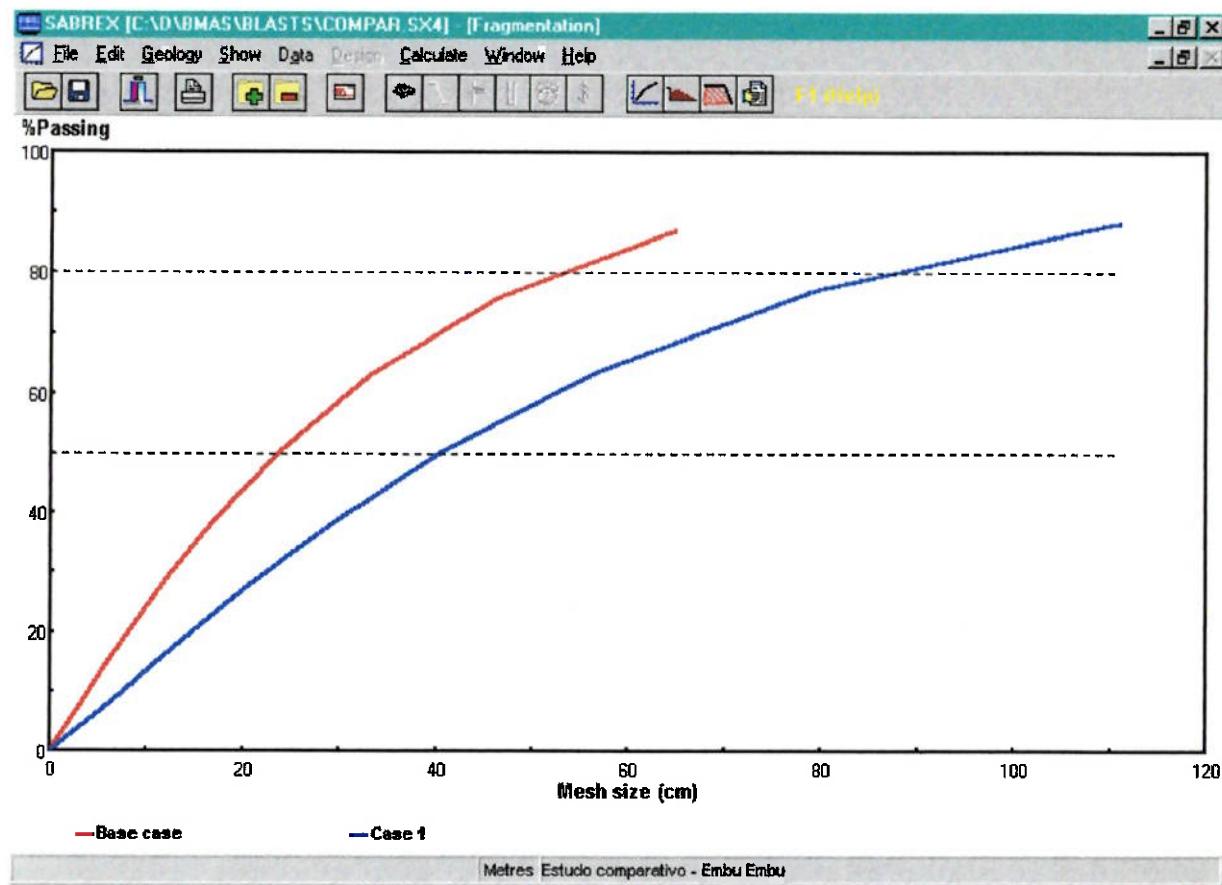


Figura 23: Comparaçao entre os dois estudos

Os equipamentos de carregamento, transporte e britagem são parâmetros importantes no desenvolvimento do estudo, em que se deve englobar as operações de lavra, desde a perfuração até a pilha de britagem. Com os dados apresentados de melhoria na fragmentação, estima-se que as carregadeiras e caminhões apresentem ganhos na disponibilidade, passando para aproximadamente 80% ou melhor.

O britador primário, consequentemente trabalhando com menos blocos *oversize* e engaiolamento, e trabalhando afogado, pode apresentar disponibilidade passando de 70 para 75%, e a relação de redução passando de 3 p/ 4 ou de 4 p/ 5.

5.3. Lançamento de Pilha e Dano na Rocha

A título de ilustração, encontram-se nos Anexos 3, 4, 5 e 6 as figuras de lançamento de pilha e dano causado na bancada, para cada um dos casos estudos, gerados pelo *software*.

6. CONCLUSÃO

As atividades de perfuração e desmonte são fatores fundamentais e determinantes dos custos das demais operações, tendo efeitos pronunciados em produtividade e custo de carregamento e transporte, volume de matacos e detonações secundárias (fogachos), problemas de repés ou nivelamento de pisos de bancadas, tempo e custo de proteção de vizinhanças, estruturas e residências próximas, e principalmente, no custo total da pedreira.

As pedreiras utilizam o desmonte por explosivos para preparação da rocha in situ para a escavação. À medida que áreas urbanas vão se expandindo, e as minas tornando-se cada vez maiores, tornam-se necessárias precauções apropriadas e procedimentos de segurança para o desmonte. A relação custo benefício de desmontes por explosivos é normalmente maior do que comparada a métodos mecânicos como escarificação ou remoção da rocha por meio de equipamentos hidráulicos.

Portanto, os desmontes por explosivos devem ser planejados e executados de modo a minimizar:

1. Aspectos ambientais, tais como: risco de danos às estruturas, incômodo às pessoas que moram e/ou trabalham próximas à área de detonação, controle da vibração, ultralançamento e poeira.
2. Custos:
 - Produzindo material bem fragmentado e pilhas
 - Mínima perda de minério e diluição
 - Minimizando problemas com repés
 - Pits finais bem projetados

O trabalho realizado teve como objetivo o estudo e comparação entre razões de carga utilizados no histórico de uma pedreira, e com o auxílio de *softwares* e ferramentas computacionais, a simulação de tais detonações. Com isto, chega-se a uma aproximação de uma razão de carga ideal, que oferecesse o menor custo total com uma fragmentação ótima.

A utilização do SABREX no trabalho, deve-se frisar, não teve como propósito a resolução de todos os problemas envolvendo tal questão da comparação entre razões de carga. O *software* foi aplicado para a simulação de tais detonações, com somente este intuito de servir como uma ferramenta de análise e comparação, contribuindo para a diminuição de erros e problemas, conforme foi mencionado nas alternativas de aplicação. Também os resultados apresentados na forma de gráficos de fragmentação, são valores aproximados da provável granulometria do material resultante da detonação.

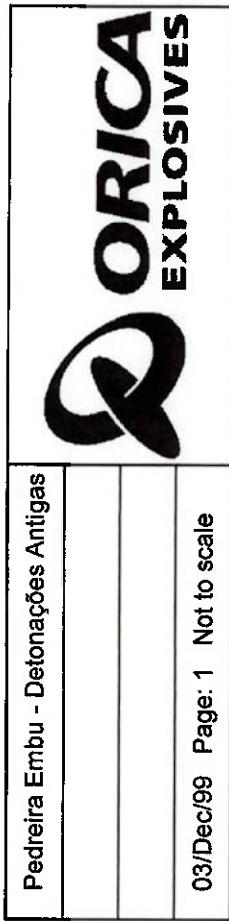
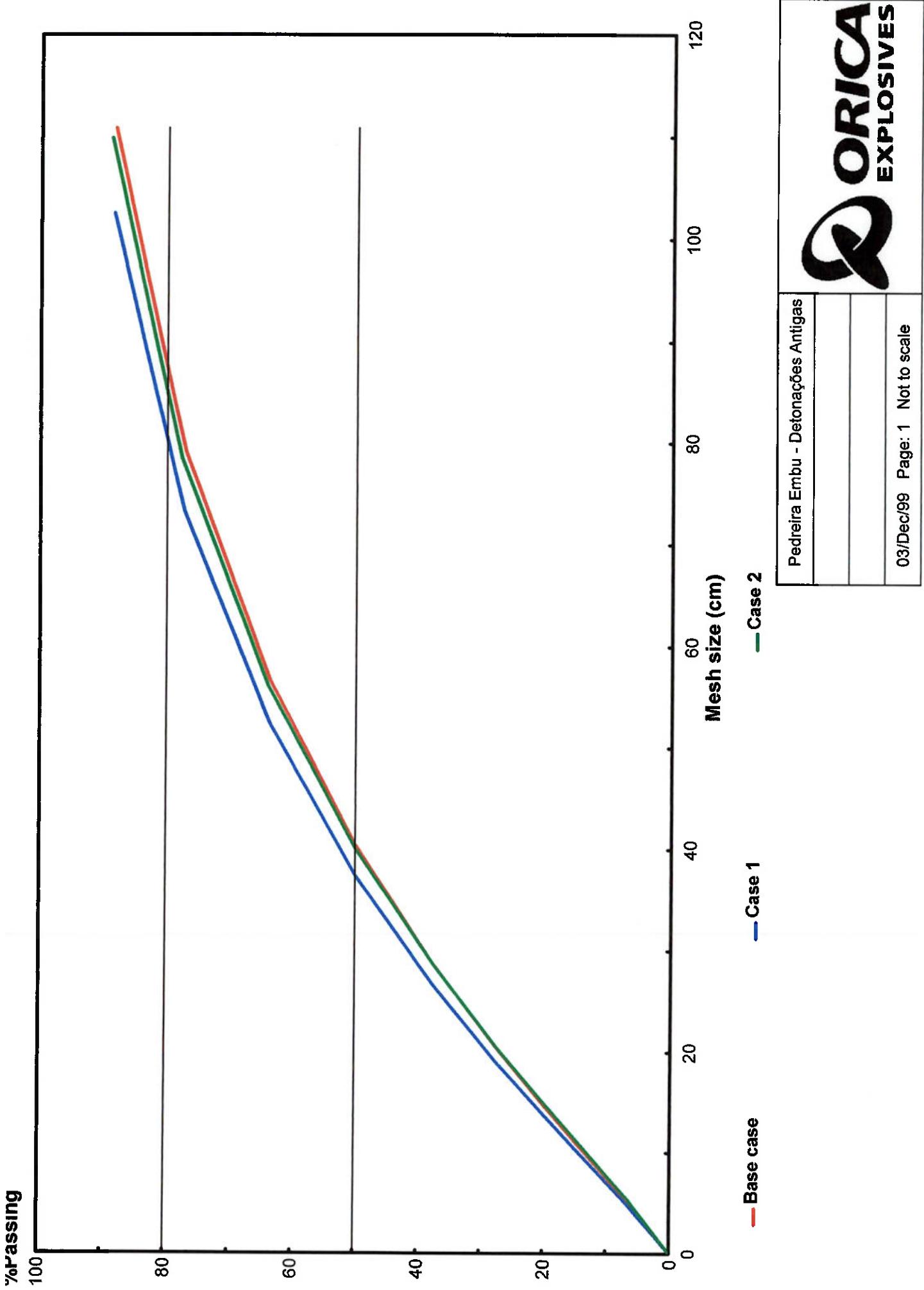
Conclusivamente, temos que cronologicamente a razão de carga utilizada na pedreira tem aumentado nos últimos anos, sendo constantemente ajustada para se obter o menor custo com a ótima fragmentação. Para seu ajuste, modificam-se a malha, tipo e quantidade de explosivos, formas de carregamento, geometria da bancada, ângulo de furação e outros. A Pedreira Embu chegou a uma razão de carga ideal, com sua malha, inclinação, explosivos, que dêem o resultado desejado, de acordo com suas necessidades. Com isso, seus custos totais foram minimizados, havendo o balanço de custos de perfuração e desmonte, com custos de carregamento, transporte e britagem. No entanto, deve-se frisar que tais parâmetros são características de somente esta pedreira, em sua devida localidade, tipo de rocha, etc.

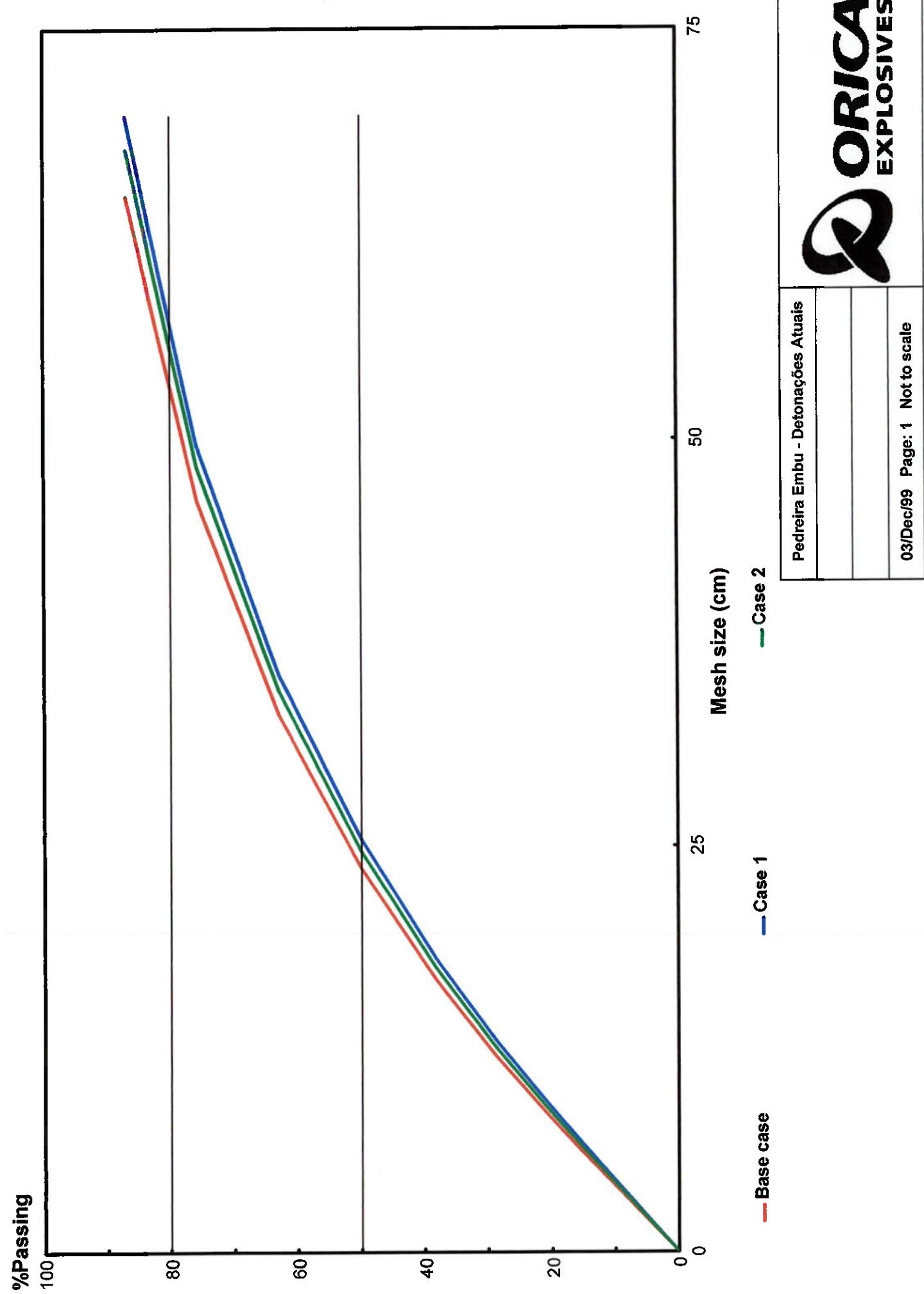
Estabelecida tal conclusão, do aumento da razão de carga historicamente, surge outra questão: o aumento com isso do risco de ultralançamento, meio ambiente, vibração, danos a estruturas. Para o controle de tais parâmetros, existem também inúmeros *softwares* de controle de vibração, sismógrafos, programas para a simulação dos tempos de retardo e ignição, medição de VOD, e com especial ênfase à perfilagem de bancadas e auditagem dos furos. O *software* de autoria da *MDL - Measurement Devices Limited*, permite que se faça uma auditoria completa da furação realizada, com afastamentos reais, inclinação, altura, e coordenadas dos furos, servindo como estação total. Com isso, conforme foi descrito em item anterior, pode-se tomar as medidas necessárias na hora do carregamento dos explosivos, de redução de carga, alívio, comprimento do tampão e outros, para que se possa eliminar o risco de ultralançamento. Encontra-se no Anexo 7, um relatório exemplo de uma auditoria e perfilagem de bancada, confirmado a importância de tal equipamento para a realização do carregamento de explosivos.

Portanto, conclui-se que mesmo com o aumento da razão de carga, no que implicaria no aumento do risco de ultralançamento, e danos ambientais, historicamente a

tecnologia de desmonte também se desenvolveu. Reduzindo riscos, eliminando problemas de ruídos, desenvolvendo novos acessórios e explosivos, amparados por simulações feitas com recursos computacionais e com o auxílio de equipamentos que permitem obter um controle completo da detonação, com isso certifica-se que, cada vez mais, a aplicação de explosivos em minerações seja realizada de forma segura, eficiente e produtiva.

7. ANEXOS

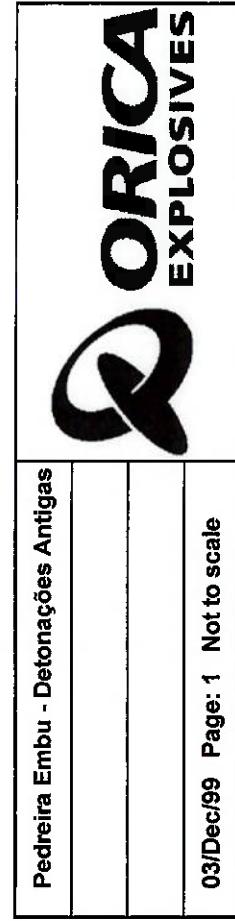
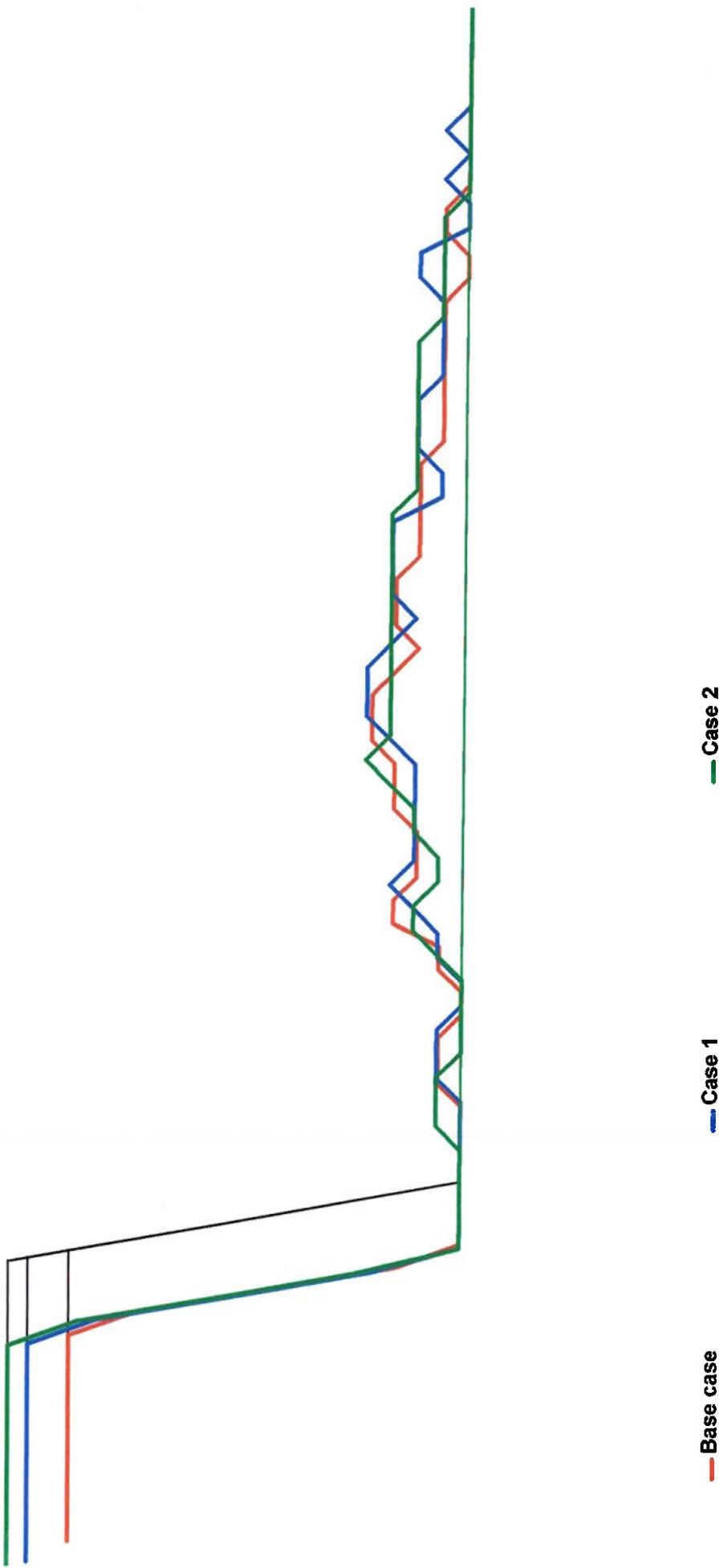


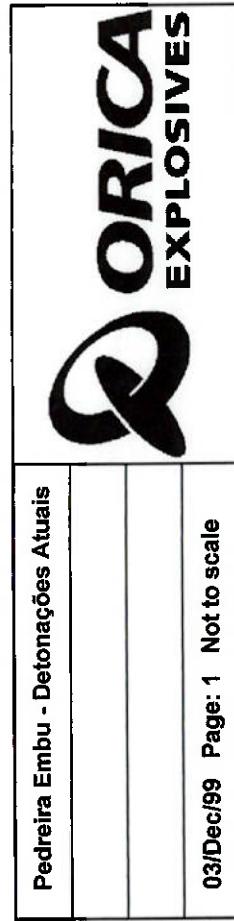
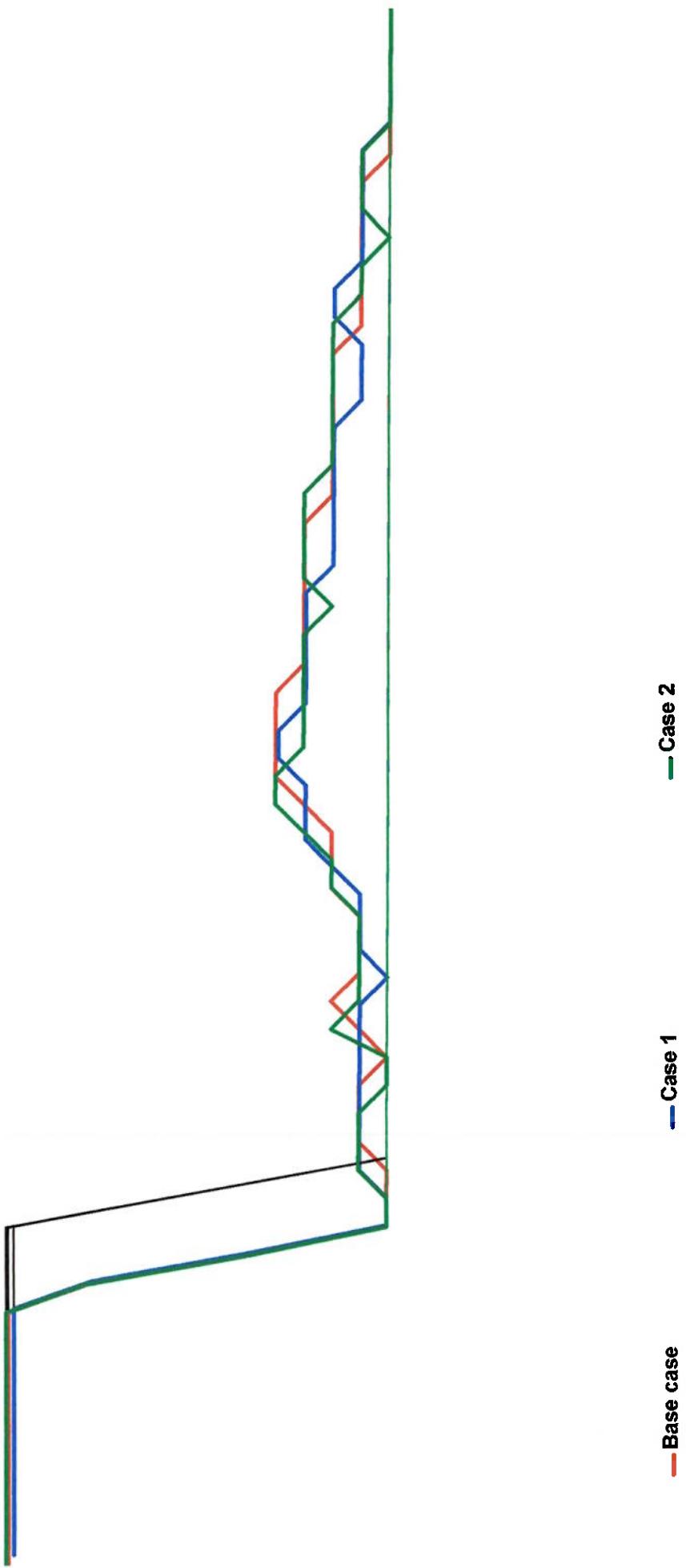


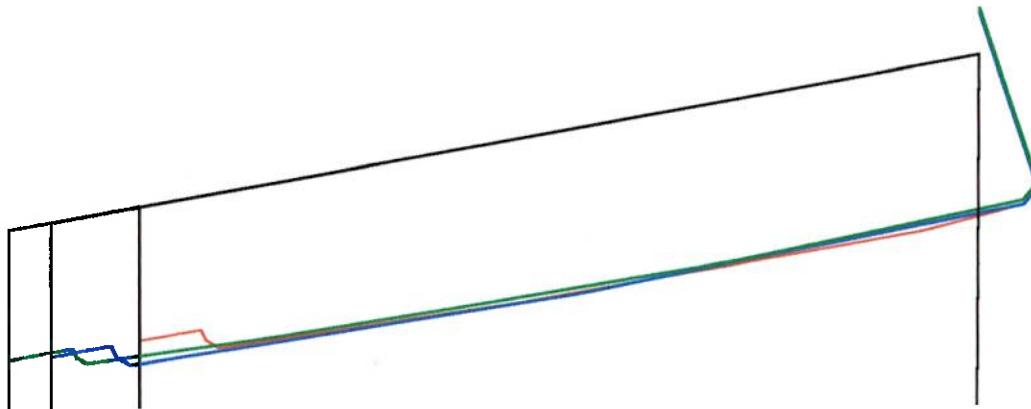
Pedreira Embu - Detonações Atuais

— Case 1
— Base case
— Case 2

03/Dec/99 Page: 1 Not to scale







— Case 1

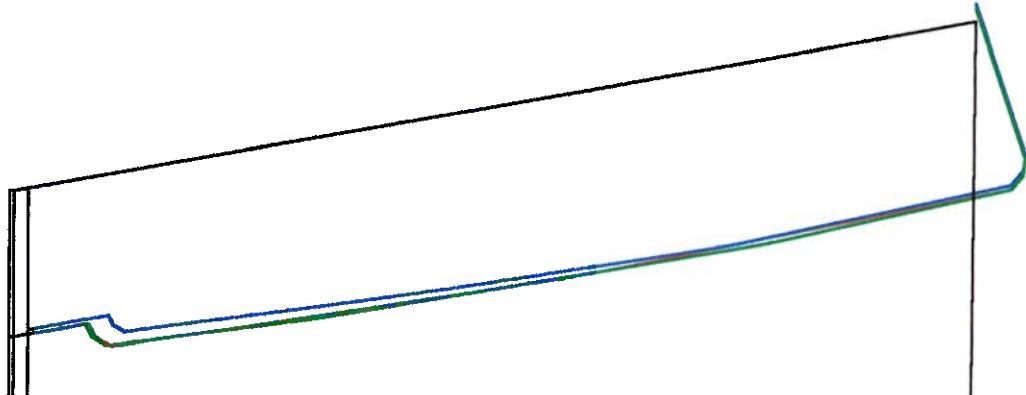
— Base case

— Case 2

Pedreira Embu - Detonações Antigas

03/Dec/99 Page: 1 Not to scale

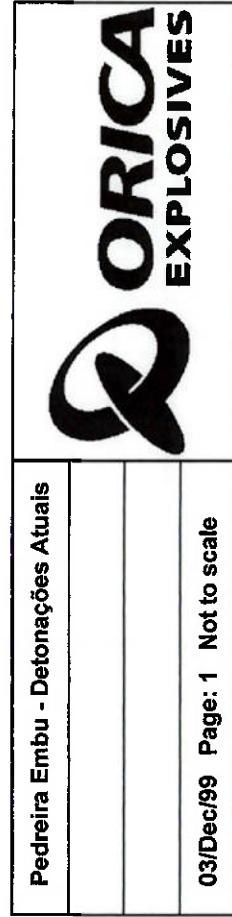




— Base case

— Case 1

— Case 2



7.7. Anexo 7

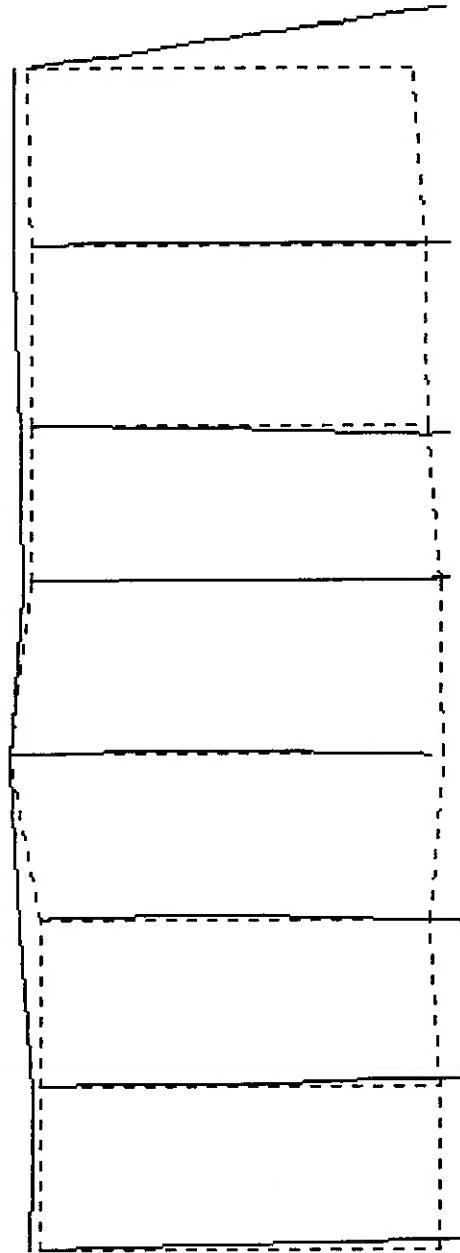
CLIENT: Rodriguez
Hayashida

SITE:
DATE: 28/09/99
FACE: 89C

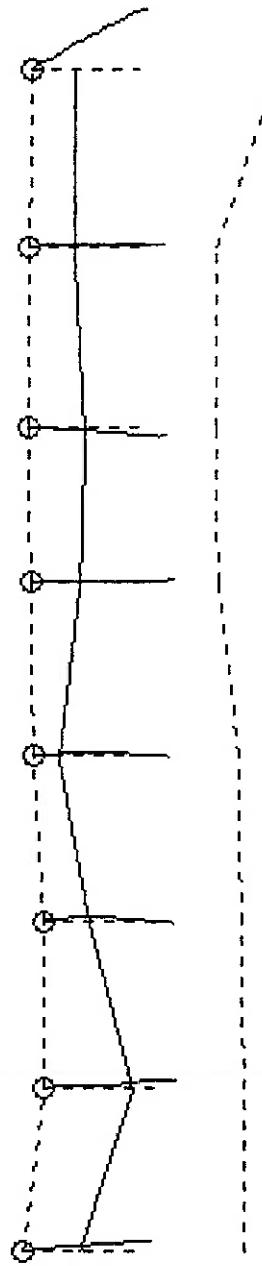
Min. Sep. is 2.8m between holes 5 and 6 at 14m and 14m respectively.
Press F1 to continue.

Quarryman(R) System Limited
Measurement Devices Limited
Aberdeen AB23 8EW UK
Copyright 1995 - MDL

FACE VIEW



PLAN VIEW



Details of Actual Boreholes Page 1

Face Name 89C Face Number 01 Survey Date 281099

All angles in degrees. All measurements in metres

Profiles have been edited

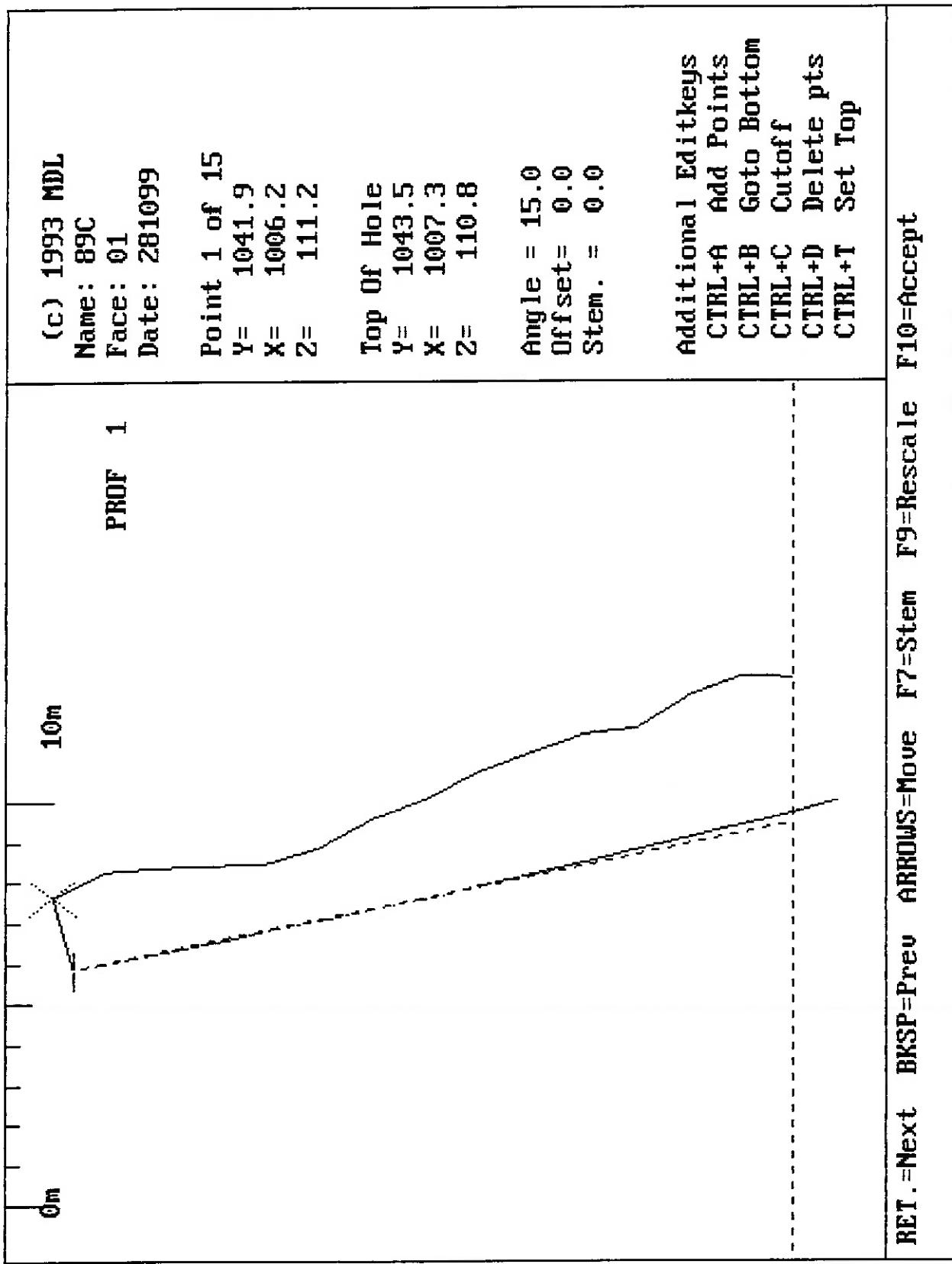
NOTE. A=Left Marker, B=Right Marker.

-ve Offset=Towards Face, +ve Offset=Away From Face

Average burden does not include stemmed area

Offsets: Left Marker 0.0 Right Marker 0.0

Hole No	Int. Angle	Max Y Dev	Max X Dev	Hole Depth	Diff Int	Sub Drill	Diff Int	Min Bur	Diff Int	MB Depth	Diff Int	Stem. Dep.
1	15.0	4.2	0.2	15.0	-1.0	1.0	-1.0	1.7	-0.0	4.0	0.0	0.0
2	15.0	4.4	0.2	14.9	-0.9	0.9	-0.9	1.6	0.1	7.0	0.0	0.0
3	15.0	4.3	0.1	15.0	-1.3	1.3	-1.3	1.8	-0.0	1.0	0.0	0.0
4	15.0	4.4	0.1	14.9	-0.5	0.5	-0.5	1.3	0.7	1.0	0.0	0.0
5	15.0	4.7	0.0	14.9	-0.5	0.5	-0.5	1.6	0.5	12.0	-11.0	0.0
6	15.0	4.6	0.0	14.9	-1.0	1.0	-1.0	1.7	0.2	13.0	-12.0	0.0
7	15.0	4.4	0.1	14.9	-1.0	1.0	-1.0	1.9	0.3	13.0	-12.0	0.0
8	15.0	3.8	1.2	14.7	-1.1	1.1	-1.1	1.5	-0.0	1.0	0.0	0.0



Tabulation of Burden against Depth

Face Name 89C Face Number 01 Survey Date 281099 Profile 1

Hole/Profile Data: Distance along 0.8 Offset 0.0

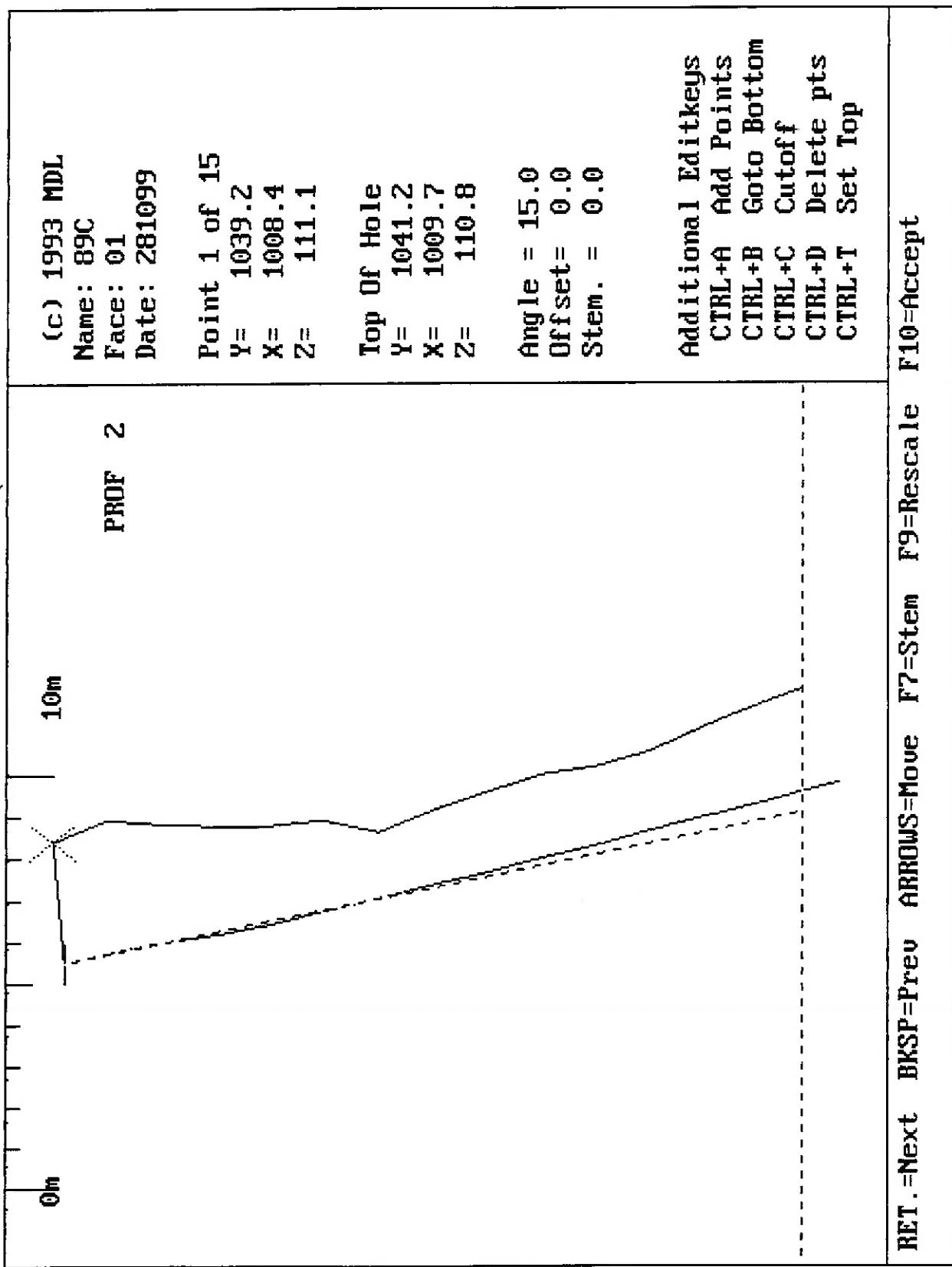
Bench Height 13.9 Drill Angle (Int) 15.0 Stem 0.0 Volume 117.2 Cu mt

Hole Y Posn 1043.5 X Posn 1007.3 Elevation 110.8

NOTE.

-ve Offset=Towards Face, +ve Offset=Away From Face
All measurements are in metres

Depth	Intended Burden	Remarks	Boretrak		Remarks
			Depth	Burden	
0.0	1.7		0.0	1.7	
1.0	2.1		1.0	2.1	
2.0	2		2.0	2.1	
3.0	1.8		3.0	1.8	
4.0	1.6	Minimum	4.0	1.6	Minimum
5.0	1.7		5.0	1.7	
6.0	2		6.0	2	
7.0	2.2		7.0	2.2	
8.0	2.5		8.0	2.4	
9.0	2.8		9.0	2.7	
10.0	3		10.0	2.8	
11.0	3		11.0	2.9	
12.0	3.1		12.0	2.8	
13.0	3.5		13.0	3.2	
14.0	3.7		14.0	3.4	
14.0	3.7		14.0	3.2	14% lighter



Tabulation of Burden against Depth

Face Name 89C Face Number 01 Survey Date 281099 Profile 2

Hole/Profile Data: Distance along 4.1 Offset 0.0

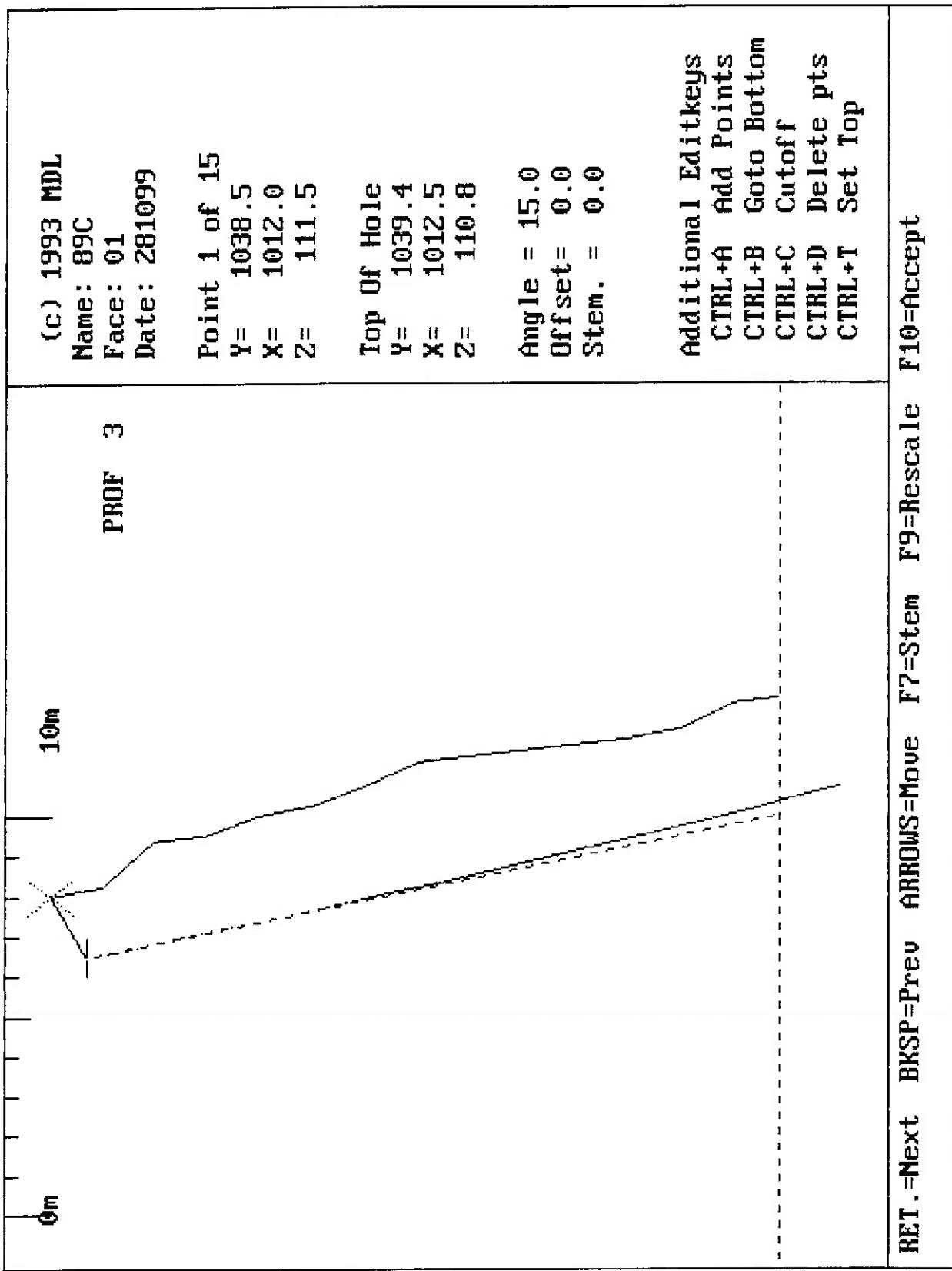
Bench Height 13.8 Drill Angle (Int) 15.0 Stem 0.0 Volume 102.3 Cu mt

Hole Y Posn 1041.2 X Posn 1009.7 Elevation 110.8

NOTE.

-ve Offset=Towards Face, +ve Offset=Away From Face
All measurements are in metres

Intended Depth	Burden	Remarks	Boretrak		Remarks
			Depth	Burden	
0.0	2.9		0.0	2.9	
1.0	2.9		1.0	2.9	
2.0	2.9		2.0	2.9	
3.0	2.6		3.0	2.6	
4.0	2.3		4.0	2.4	
5.0	2.1		5.0	2.2	
6.0	1.7		6.0	1.8	
7.0	1.6	Minimum	7.0	1.6	Minimum
8.0	1.8		8.0	1.7	
9.0	2		9.0	1.8	
10.0	2		10.0	1.8	
11.0	2		11.0	1.7	13% lighter
12.0	2.2		12.0	1.8	16% lighter
13.0	2.5		13.0	2.1	15% lighter
14.0	2.7		14.0	2.2	17% lighter
14.9			14.9	2.3	



Tabulation of Burden against Depth

Face Name 89C Face Number 01 Survey Date 281099 Profile 3

Hole/Profile Data: Distance along 7.4 Offset 0.0

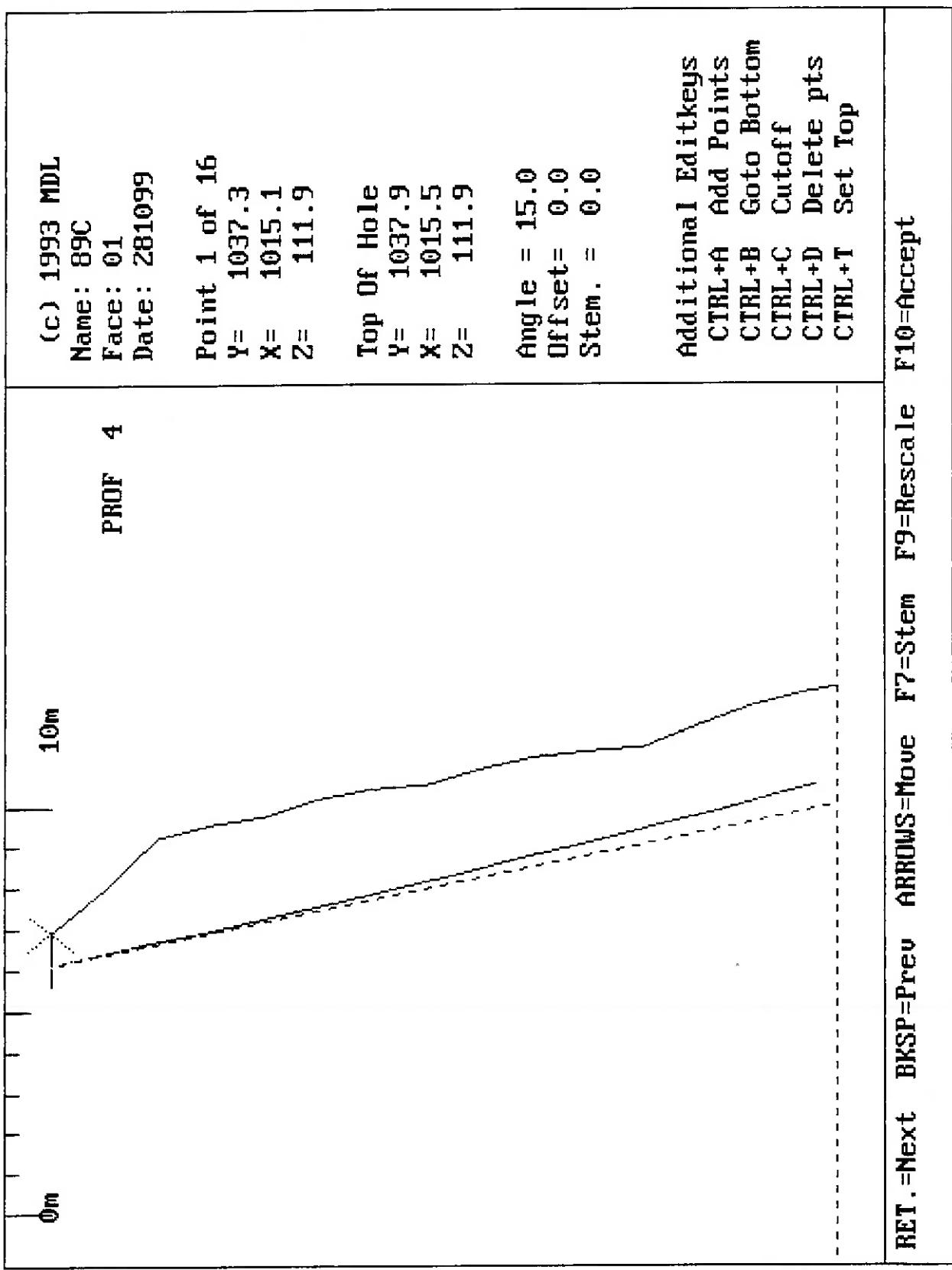
Bench Height 13.9 Drill Angle (Int) 15.0 Stem 0.0 Volume 116.7 Cu mt

Hole Y Posn 1039.4 X Posn 1012.5 Elevation 110.8

NOTE.

-ve Offset=Towards Face, +ve Offset=Away From Face
All measurements are in metres

Intended Depth	Burden	Remarks	Boretrak		Remarks
			Depth	Burden	
0.0	1.4		0.0	1.4	
1.0	1.7	Minimum	1.0	1.8	Minimum
2.0	2.4		2.0	2.4	
3.0	2.3		3.0	2.3	
4.0	2.5		4.0	2.5	
5.0	2.5		5.0	2.5	
6.0	2.7		6.0	2.6	
7.0	2.9		7.0	2.8	
8.0	2.9		8.0	2.8	
9.0	2.8		9.0	2.7	
10.0	2.7		10.0	2.6	
11.0	2.6		11.0	2.4	
12.0	2.5		12.0	2.3	
13.0	2.7		13.0	2.4	11% lighter
13.7	2.9		13.7	2.5	11% lighter
15.0		Invalid	15.0		



Tabulation of Burden against Depth

Face Name 89C Face Number 01 Survey Date 281099 Profile 4

Hole/Profile Data: Distance along 10.7 Offset 0.0

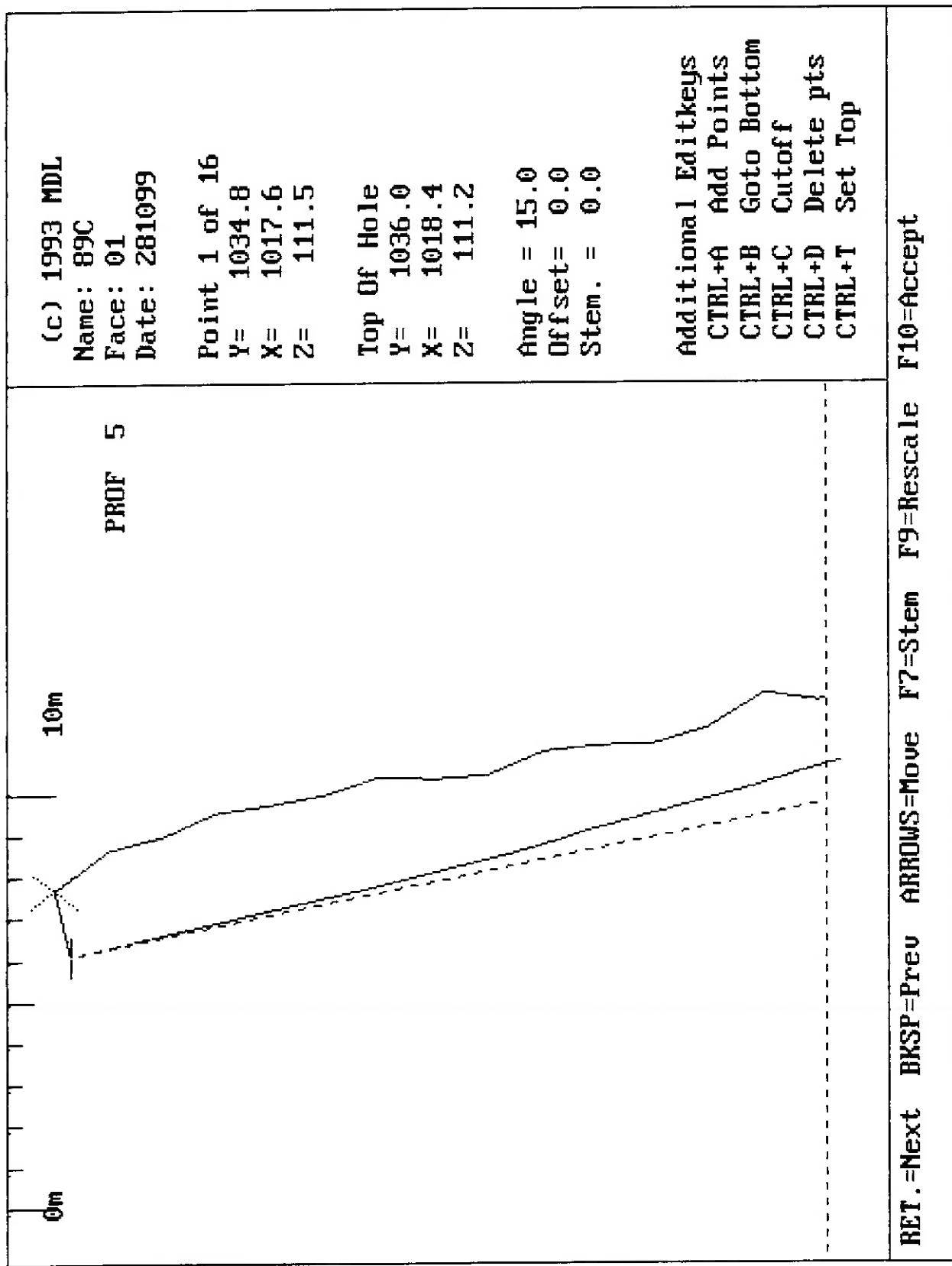
Bench Height 14.6 Drill Angle (Int) 15.0 Stem 0.0 Volume 111.3 Cu mt

Hole Y Posn 1037.9 X Posn 1015.5 Elevation 111.9

NOTE.

-ve Offset=Towards Face, +ve Offset=Away From Face
All measurements are in metres

Intended Depth	Burden	Remarks	Boretrak		Remarks
			Depth	Burden	
0.0	.8		0.0	.8	
1.0	1.9	Minimum	1.0	1.2	34% lighter
2.0	2.6		2.0	1.8	29% lighter
3.0	2.7		3.0	2.4	10% lighter
4.0	2.6		4.0	2.4	
5.0	2.7		5.0	2.4	13% lighter
6.0	2.7		6.0	2.5	
7.0	2.6		7.0	2.4	
8.0	2.7		8.0	2.2	16% lighter
9.0	2.7		9.0	2.2	16% lighter
10.0	2.6		10.0	2.2	15% lighter
11.0	2.5		11.0	2.1	15% lighter
12.0	2.6		12.0	1.9	27% lighter
13.0	2.8		13.0	2	29% lighter
14.0	2.9		14.0	2.1	26% lighter
14.4	2.9		14.4	2.1	26% lighter



Tabulation of Burden against Depth

Face Name 89C Face Number 01 Survey Date 281099 Profile 5

Hole/Profile Data: Distance along 14.2 Offset 0.0

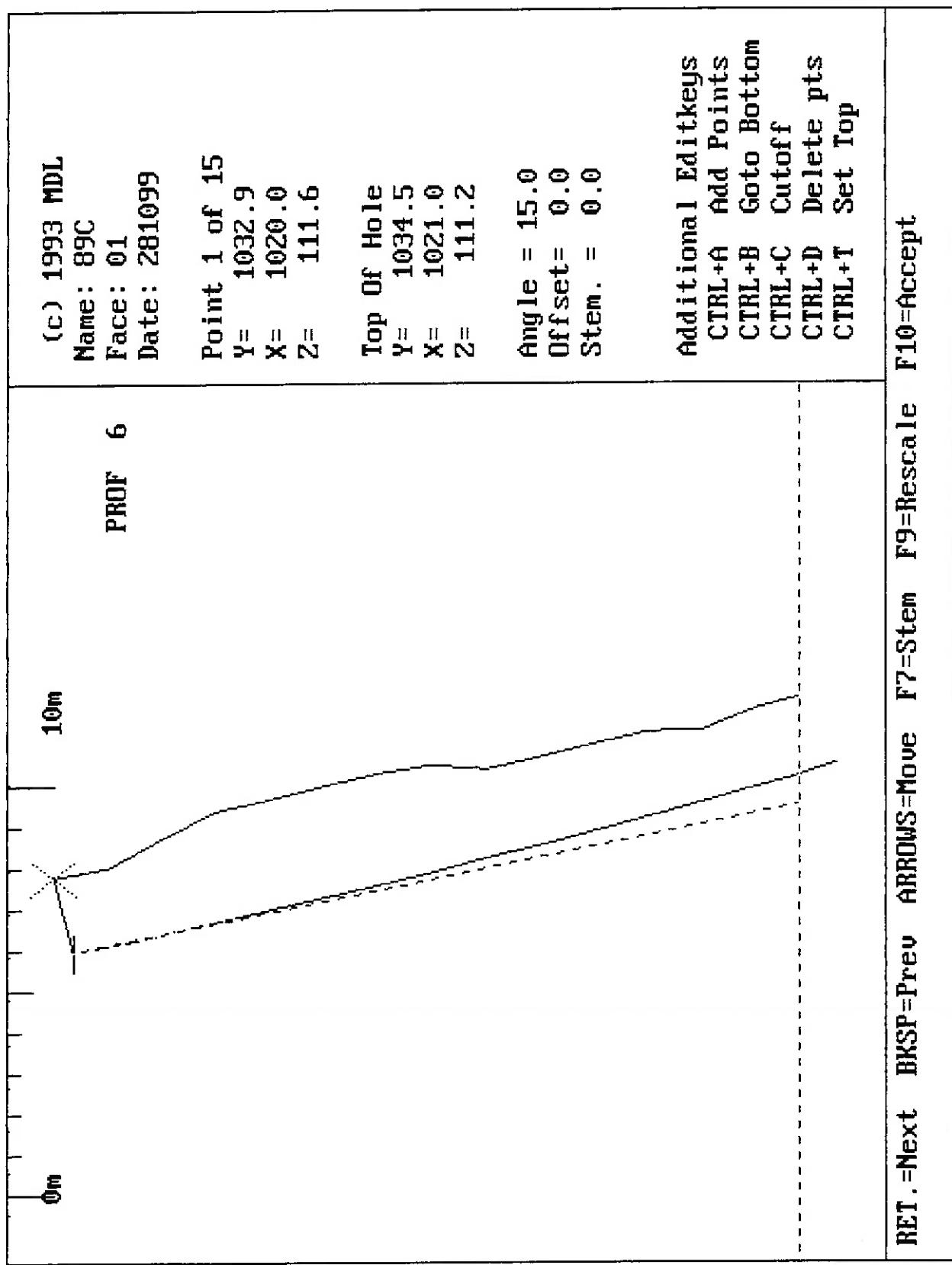
Bench Height 14.1 Drill Angle (Int) 15.0 Stem 0.0 Volume 100.0 Cu mt

Hole Y Posn 1036.0 X Posn 1018.4 Elevation 111.2

NOTE.

-ve Offset=Towards Face, +ve Offset=Away From Face
All measurements are in metres

Depth	Burden	Remarks	Boretrak		Remarks
			Depth	Burden	
0.0	1.6		0.0	1.6	
1.0	2.1	Minimum	1.0	2	
2.0	2.3		2.0	2.2	
3.0	2.5		3.0	2.4	
4.0	2.6		4.0	2.5	
5.0	2.5		5.0	2.4	
6.0	2.6		6.0	2.4	
7.0	2.5		7.0	2.3	
8.0	2.3		8.0	2	11% lighter
9.0	2.3		9.0	1.9	16% lighter
10.0	2.4		10.0	2	16% lighter
11.0	2.2		11.0	1.8	20% lighter
12.0	2.1		12.0	1.5	28% lighter
13.0	2.4		13.0	1.6	31% lighter
14.0	2.7		14.0	2	27% lighter
14.3	2.6		14.3	1.5	39% lighter



Tabulation of Burden against Depth

Face Name 89C Face Number 01 Survey Date 281099 Profile 6

Hole/Profile Data: Distance along 17.2 Offset 0.0

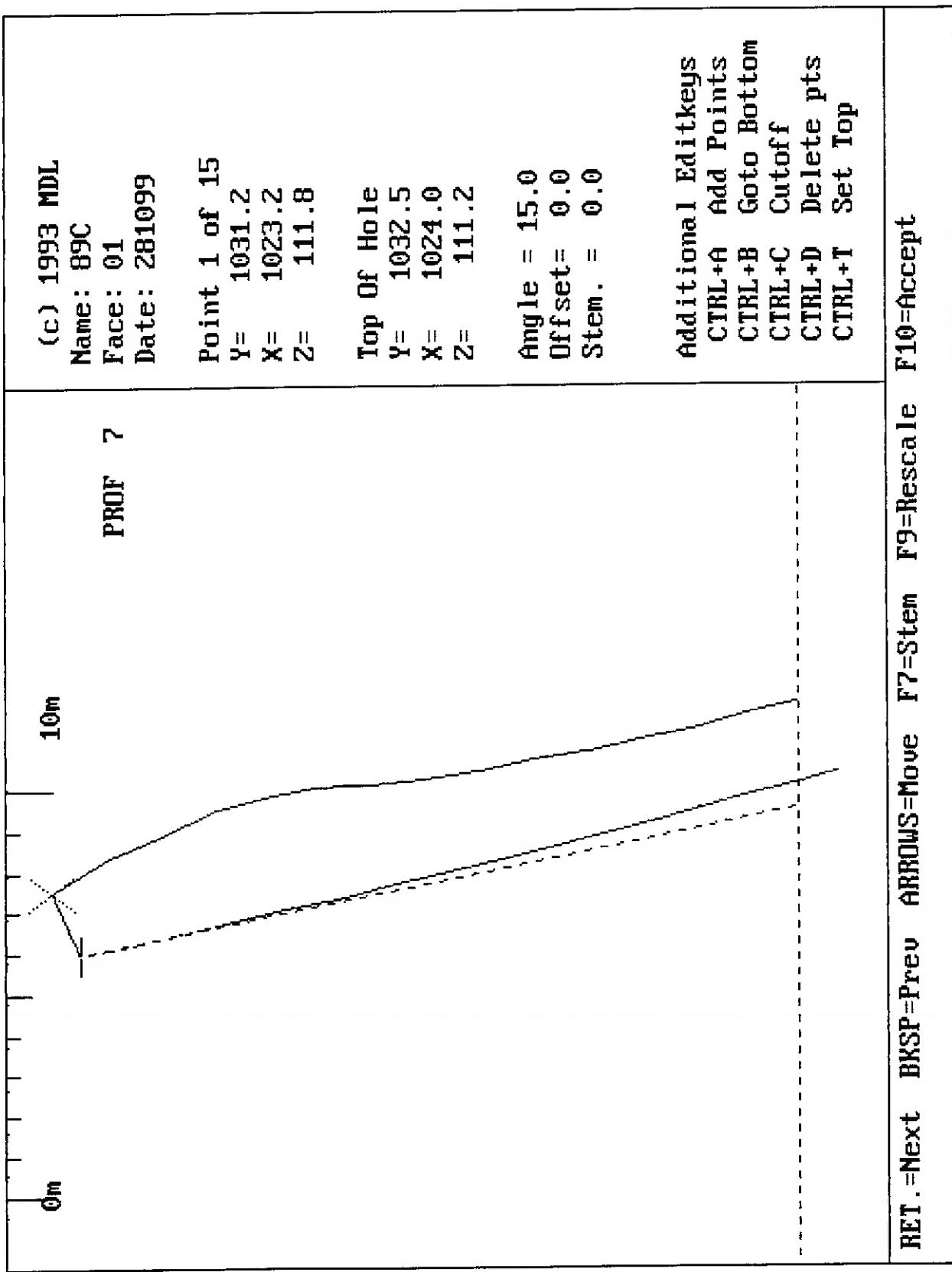
Bench Height 13.8 Drill Angle (Int) 15.0 Stem 0.0 Volume 102.6 Cu mt

Hole Y Posn 1034.5 X Posn 1021.0 Elevation 111.2

NOTE.

-ve Offset=Towards Face, +ve Offset=Away From Face
All measurements are in metres

Intended Depth	Burden	Remarks	Boretrak		Remarks
			Depth	Burden	
0.0	1.8		0.0	1.8	
1.0	1.8	Minimum	1.0	1.8	
2.0	2.1		2.0	2.1	
3.0	2.5		3.0	2.4	
4.0	2.6		4.0	2.5	
5.0	2.6		5.0	2.5	
6.0	2.7		6.0	2.5	
7.0	2.6		7.0	2.5	
8.0	2.4		8.0	2.3	
9.0	2.3		9.0	2	
10.0	2.3		10.0	2	11% lighter
11.0	2.4		11.0	2	14% lighter
12.0	2.3		12.0	1.8	16% lighter
13.0	2.2		13.0	1.6	19% lighter
13.9	2.4		13.9	1.7	Minimum 26% lighter
14.9			14.9	Invalid	27% lighter



Tabulation of Burden against Depth

Face Name 89C Face Number 01 Survey Date 281099 Profile 7

Hole/Profile Data: Distance along 20.8 Offset 0.0

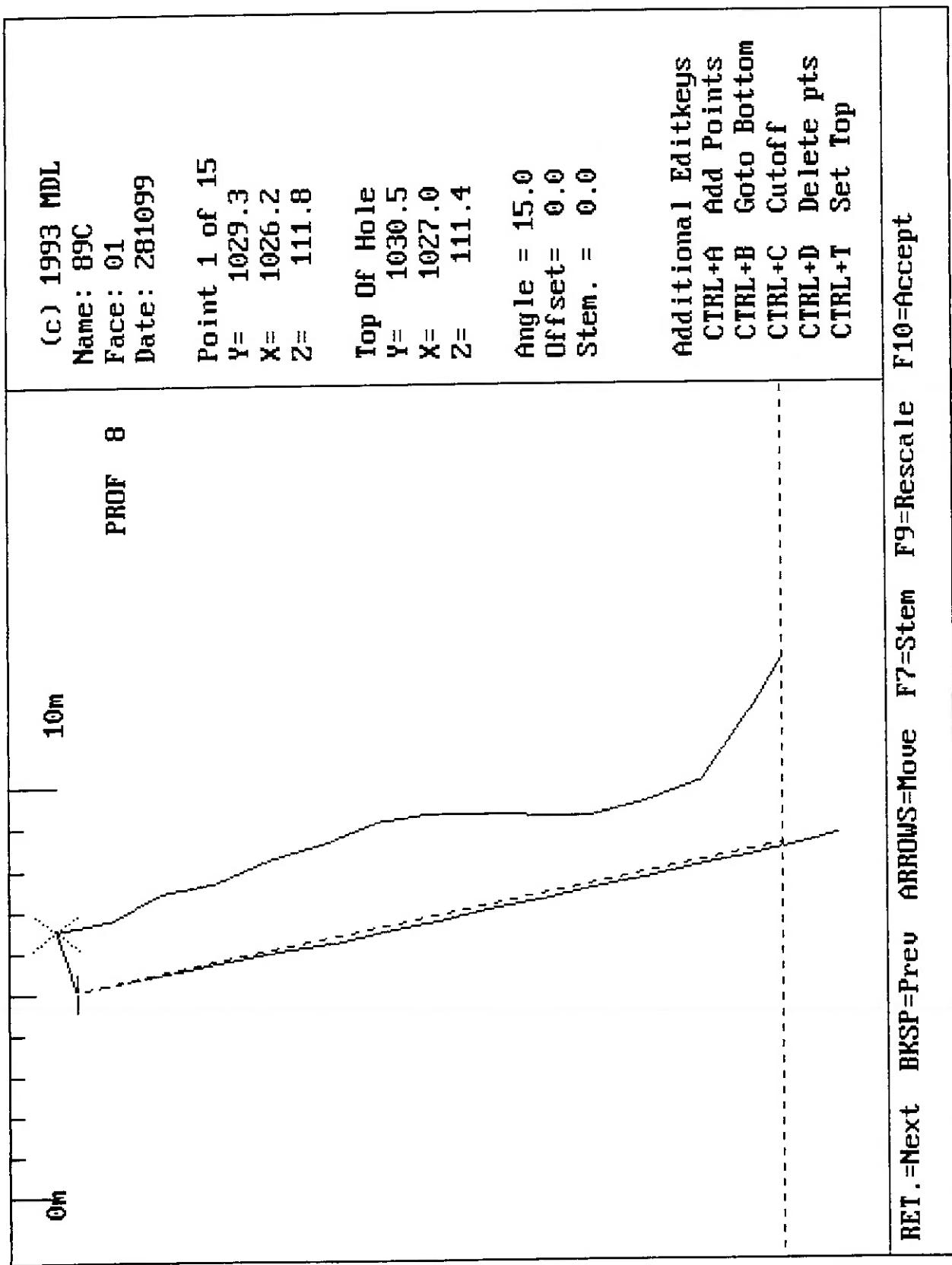
Bench Height 13.9 Drill Angle (Int) 15.0 Stem 0.0 Volume 115.2 Cu mt

Hole Y Posn 1032.5 X Posn 1024.0 Elevation 111.2

NOTE.

-ve Offset=Towards Face, +ve Offset=Away From Face
All measurements are in metres

Depth	Burden	Remarks	Boretrak		Remarks
			Depth	Burden	
0.0	1.5		0.0	1.5	
1.0	2.1	Minimum	1.0	2.1	
2.0	2.3		2.0	2.3	
3.0	2.6		3.0	2.6	
4.0	2.8		4.0	2.7	
5.0	2.8		5.0	2.7	
6.0	2.6		6.0	2.5	
7.0	2.5		7.0	2.3	
8.0	2.4		8.0	2.2	
9.0	2.4		9.0	2.1	10% lighter
10.0	2.3		10.0	2	12% lighter
11.0	2.3		11.0	1.9	15% lighter
12.0	2.3		12.0	1.9	17% lighter
13.0	2.3		13.0	1.8	Minimum 20% lighter
13.9	2.4		13.9	1.9	22% lighter
14.9			14.9	Invalid	



Tabulation of Burden against Depth

Face Name 89C Face Number 01 Survey Date 281099 Profile 8

Hole/Profile Data: Distance along 24.4 Offset 0.0

Bench Height 13.5 Drill Angle (Int) 15.0 Stem 0.0 Volume 107.7 Cu mt

Hole Y Posn 1030.5 X Posn 1027.0 Elevation 111.4

NOTE.

-ve Offset=Towards Face, +ve Offset=Away From Face
All measurements are in metres

Intended Depth	Burden	Remarks	Boretrak		Remarks
			Depth	Burden	
0.0	1.4		0.0	1.4	
1.0	1.4	Minimum	1.0	1.5	Minimum
2.0	1.8		2.0	1.8	
3.0	1.8		3.0	1.9	
4.0	2		4.0	2.1	
5.0	2.2		5.0	2.3	
6.0	2.3		6.0	2.5	
7.0	2.4		7.0	2.6	
8.0	2.3		8.0	2.4	
9.0	2		9.0	2.1	
10.0	1.7		10.0	1.8	
11.0	1.6		11.0	1.7	
12.0	1.7		12.0	1.8	
13.0	2.3		13.0	2.3	
13.6	3		13.6	3.4	13% heavier
14.7			14.7	4	

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BEEVERS, J. Quarry blasting – the latest technology. Chatswood, ICI Explosives, 1994 (Catálogo n. ICG4858 9/94).
- GAMA, C.D.; LOPEZ JIMENO, C. Rock Fragmentation control for blasting cost minimization and environmental impact abatement In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ROCK FRAGMENTATION BY BLASTING, 4. Vienna, 1993. Rock fragmentation by blasting: proceedings. Rotterdam, Balkema, 1993. p. 273-79.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. Curso internacional “Tecnologia de desmonte de rochas com explosivos para minas a céu aberto e subterrâneas”. Belo Horizonte, IBRAM, 1996.
- HAGAN, T.N.; Minimizando o custo de pedreiras através da otimização da perfuração e desmonte. Areia e Brita, n. 7, p. 27-30, out/dez. 1998.
- LOPEZ JIMENO, C.; LOPEZ JIMENO, E.; AYALA CARCEDO, F.J. Drilling and blasting of rocks. Rotterdam, Balkema, 1995.
- LAHÓZ, D.C. Análise tridimensional de bancadas no desmonte por explosivos. São Paulo, 1997. 74p. Monografia (Trabalho de Formatura). Departamento de Engenharia de Minas. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- ORICA BRASIL LTDA. Curso interno de explosivos e suas aplicações. São Paulo, s.d. (Notas).
- PERSSON, P.A.; HOLMBER, R.; LEE, J. Rock blasting and explosives engineering. Boca Raton, CRC Press, 1994.
- SCOTT, A., ed. Open pit blast design: analysis and optimisation. Queensland, Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, The University of Queensland, 1996. (JKMRC Monograph Series in Mining and Mineral Processing, 1).
- SEN, G.C. Blasting technology: for mining and civil engineering. Sidney, UNSW Press, 1995.