

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
CAMPUS DE SÃO CARLOS

Serviço de Pós-Graduação EESC/USP

EXEMPLAR REVISADO

Data de entrada no Serviço.....30/08/05.....

Ass.:.....*lesan*.....

APLICAÇÃO DA TEORIA FRACTAL À QUANTIFICAÇÃO DA  
RUGOSIDADE E EFEITO ESCALA DA RUGOSIDADE

Henry Willy Revilla Amezquita

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, para concorrer ao Título de Mestre, pelo curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Área de concentração: Geotecnia.

DEDALUS - Acervo - EESC



31100052270

Orientador: Prof. Dr. Tarcísio Barreto Celestino

São Carlos

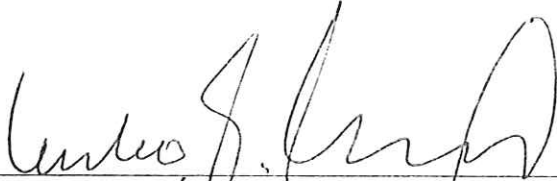
2005



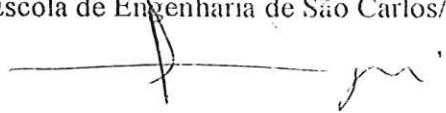
FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Bacharel **HENRY WILLY REVILLA AMEZQUITA**

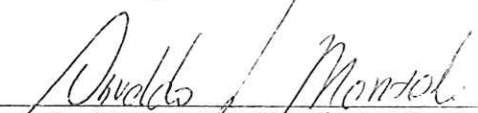
Dissertação defendida e julgada em 21-01-2005 perante a Comissão Julgadora:

  
Prof. Dr. **TARCÍSIO BARRETO CELESTINO (Orientador)**  
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)


Aprovado

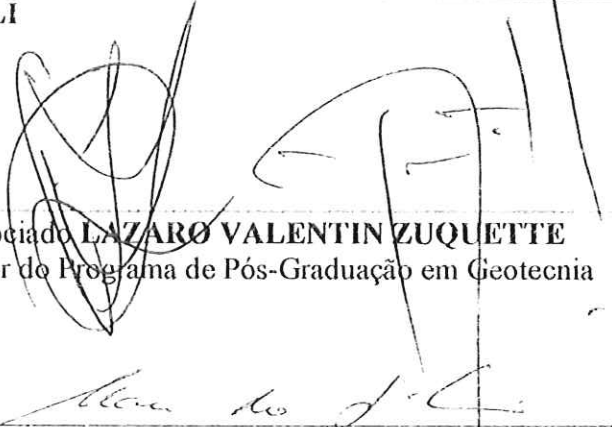
  
Prof. Titular **FAZAL HUSSAIN CHAUDHRY**  
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

APROVADO

  
Prof. Dr. **OSVALDO LUIZ MANZOLI**  
(UNESP/Bauru)

APROVADO

  
Prof. Associado **LAZARO VALENTIN ZUQUETTE**  
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia

  
Prof. Associado **MARCIO ROBERTO SILVA CORRÊA**  
Vice-Presidente da Comissão de Pós-Graduação, em Exercício

## DEDICATÓRIA

Aos meus pais (Luis B. Revilla Tovar e Ninfa F. Amezquita de Revilla), exemplos de caráter, força, honestidade, dignidade, dedicação e carinho. Muito obrigado *viejos*.

## AGRADECIMENTOS

A Deus pela força e orientação nos momentos difíceis, como também nos bons momentos acontecidos nesta etapa.

Aos meus irmãos (Letícia, Luis, Yeisson e Yessenia), aos meus sobrinhos (Carlos Fabian, Angie Cecília e Luis Angel), meus cunhados (Angel e Carlos) e toda minha família, por serem os grandes responsáveis por esta conquista, em seu apoio incondicional, carinho e compreensão nesta etapa da minha vida. E especialmente a minha namorada Nadia, por compreender, ajudar, apoiar, esperar e mostrar seu amor ainda estando afastados.

Ao Prof. Dr. Tarcísio B. Celestino, por ter aceitado a proposta deste trabalho e por ter orientado com extrema dedicação e compreensão a execução do mesmo, elucidando com clareza todas as dúvidas que apareceram durante a realização deste trabalho. Também, em especial, agradecer ao Prof. Dr. Antonio Airton Bortolucci pelo apoio.

À Coordenaria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES pelo apoio financeiro para realização desse mestrado.

Ao departamento de Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos-USP.

Aos professores do departamento pela amizade.

Aos funcionários Maristela, Álvaro, Neiva, Toninho e Herivelto, e os técnicos do laboratório: Benedito, José Luiz, Oscar, Décio, Silvío, Klever e Antônio.

Às amigas do 21B, Aristotelina Ferreira da Silva e Fernanda de Figueiredo Damasceno pelas boas-vindas em São Carlos, com tanto afeto, hospitalidade, carinho e amizade. Aos amigos Gisele e Myrko.

Aos colegas da pós-graduação, em especial aos companheiros de turma (Fernanda, Roberto, Rui, Victor Hugo, Jean Carlos, Enrique, Ivan, Rossana, Leonardo) e da mecânica das rochas.

À amizade que encontrei ao atravessar o continente, minha amiga Marcilene Dantas Ferreira, pela amizade, companheirismo durante estes anos de mestrado, por sempre apoiar e ajudar em momentos difíceis e ajudar na conquista de meus objetivos.

Ao Professor Pablo Ruben Meza, meu orientador na graduação em Arequipa. Aos amigos de graduação Gonzalo, Javier, Raphael, Jesus, Juan de Dios, Arturo, Carlos, Besylu, Mijandu, Yenny, Lourdes, Sandra. Assim como os amigos de bairro Pavel e Leifeng.

Enfim, a todos aqueles que de uma forma ou de outra colaboraram com este trabalho e participaram da minha vida nesse período.

.....E também o mundo,  
Com tudo aquilo que contém,  
Com tudo aquilo que nele se desdobra  
E afinal é a mesma coisa variada em cópias iguais.  
(Álvaro de Campos)

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	i
LISTA DE TABELAS.....	iv
LISTA DE SÍMBOLOS.....	v
RESUMO.....	vi
ABSTRACT.....	vii
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1. Objetivos.....	3
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>4</b>
2.1. Teoria Fractal e Métodos Fractais.....	4
2.1.1. Resenha Histórica.....	5
2.1.2. Terminologias e Definições.....	6
2.1.3. Teoria Fractal.....	6
2.1.3.1. Introdução à Teoria Fractal.....	6
2.1.3.2. Dimensão Fractal.....	7
2.1.4. Fractais Auto-Semelhantes.....	9
2.1.4.1. Método para determinar a Dimensão Fractal do Fractal Auto-Semelhante.....	10
2.1.5. Fractais Auto-Afins.....	11
2.1.5.1. Métodos para determinar a Dimensão Fractal dos Fractais Auto-Afins.....	12
2.1.5.1.1. Método Modificado do Divisor.....	12
2.1.5.1.2. Método das Caixas.....	14
2.1.5.1.3. Método do Ângulo.....	15
2.1.5.1.4. Parâmetro de Intersecção.....	16
2.2. Aspectos teóricos da Rugosidade de uma Descontinuidade.....	17
2.2.1. Introdução.....	17
2.2.2. Resistência a Cisalhamento.....	18
2.2.3. Parâmetros e Ensaio para caracterizar a rugosidade.....	21
2.2.4. Efeito Escala da Rugosidade.....	28
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>31</b>
3.1. Perfis de Rugosidade escala 10 cm.....	32

3.2. Efeito Escala na Rugosidade.....	35
3.3. Programas Computacionais utilizados.....	38
<b>4. APLICAÇÃO DA TEORIA FRACTAL À QUANTIFICAÇÃO DA RUGOSIDADE, EFEITO ESCALA.....</b>	<b>40</b>
4.1. Determinação do parâmetro <i>JRC</i> utilizando a Teoria Fractal.....	41
4.2. Resultados e Análises da utilização da Teoria Fractal na quantificação da Rugosidade.....	41
4.2.1. Método Modificado do Divisor.....	41
4.2.2. Método das Caixas.....	47
4.2.3. Método do Ângulo.....	52
4.2.4. Comparação dos resultados obtidos.....	56
4.2.4.1. Determinação do parâmetro mais adequado para quantificar o perfil de rugosidade.....	59
4.2.5. Análises do parâmetro de Intersecção do Método Modificado do Divisor.....	59
4.2.6. Utilização da equação 35 na determinação dos valores de <i>JRC</i> dos Perfis Típicos.....	68
4.3. Comportamento dos parâmetros fractais no Efeito Escala da rugosidade da descontinuidade.....	70
4.3.1. Análises e resultados do comportamento dos parâmetros fractais no Efeito Escala.....	71
4.3.2. Correlação dos parâmetros fractais no efeito escala.....	76
4.3.3. Comparação entre a Equação do Efeito Escala com a Equação 37....	86
<b>5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....</b>	<b>90</b>
<b>6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>92</b>
<b>7. APÊNDICE A.....</b>	<b>104</b>
<b>8. APÊNDICE B.....</b>	<b>114</b>
<b>9. APÊNDICE C.....</b>	<b>124</b>
<b>10. APÊNDICE D.....</b>	<b>134</b>
<b>11. APÊNDICE E.....</b>	<b>141</b>

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.	Comprimentos da régua para obter o comprimento da linha.	8
FIGURA 2.	Gráfico de $\log L$ vs. $\log \gamma$ onde se obtém a Dimensão de Hausdorff-Besicovith.	8
FIGURA 3.	Curva de Von Koch	9
FIGURA 4.	Curva de Koch (Bunde A. & Havlin S., 1995)	11
FIGURA 5.	Conjunto de Cantor (Bunde A. & Havlin S., 1995)	11
FIGURA 6.	Exemplo de curva Auto-Afin (Xie H., 1993)	12
FIGURA 7.	Intersecção dos intervalos horizontais com o perfil (McWilliams et al., 1990)	13
FIGURA 8.	Obtenção do valor da Dimensão Fractal do M. M. Divisor.	14
FIGURA 9.	Perfil coberto pelas caixas quadrados de lado $r \times r$ .	14
FIGURA 10.	Obtenção da Dimensão Fractal de um perfil do M. Caixas.	15
FIGURA 11.	Aplicação do Método do Ângulo	15
FIGURA 12.	Determinação da Dimensão Fractal do perfil do M. Ângulo.	16
FIGURA 13.	Representação gráfica do ensaio de cisalhamento direto.	19
FIGURA 14.	Diferentes escalas de rugosidade da descontinuidade (ISRM, 1978).	21
FIGURA 15.	Perfis típicos propostos por Barton & Choubey (1977).	22
FIGURA 16.	Representação esquemática do ensaio de inclinação (Bandis et al., 1981).	23
FIGURA 17.	Ensaio de puxar blocos (Bandis et al., 1981).	24
FIGURA 18.	Análise de Renger da rugosidade.	25
FIGURA 21.	Perfis de comparação visual propostos por Barton & Choubey (1977).	32
FIGURA 22.	Perfis de Grasselli (2001) com seus valores do <i>JRC</i> .	33
FIGURA 23.	Perfis de Beer et al. (2002) e Papaliangas et al. (1990) com seus valores do <i>JRC</i> .	33
FIGURA 24.	Perfis de Bandis et al. (1983) e Makurat et al. (1990) com seus valores do <i>JRC</i> .	34
FIGURA 25.	Perfis de Grasselli (2001), Papaliangas et al. (1990) e Makurat et al. (1990) com seus valores do <i>JRC</i> .	35
FIGURA 26.	Perfis da <i>ISRM</i> (1978) com seus valores do <i>JRC</i> .	36
FIGURA 27.	Perfis de Bandis et al. (1981) com seus valores do <i>JRC</i> .	37
FIGURA 28.	Comportamento dos 10 perfis de Barton com o Método Modificado do Divisor.	42
FIGURA 29.	Comparação dos resultados obtidos com os de outros pesquisadores.	42
FIGURA 30.	Obtenção da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção pelo Método Modificado do Divisor.	44
FIGURA 31.	Correlação entre <i>JRC</i> e Dimensão Fractal.	45
FIGURA 32.	Correlação entre <i>JRC</i> e parâmetro de Intersecção	45
FIGURA 33.	Comparação de <i>JRC</i> da literatura com <i>JRC</i> da Equação 27.	46
FIGURA 34.	Comparação de <i>JRC</i> da literatura com <i>JRC</i> da Equação 28.	47
FIGURA 35.	Comportamento dos perfis de Barton (1977) com o Método das Caixas.	47



FIGURA 36.	Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção pelo M. Caixas.	49
FIGURA 37.	Correlação entre a Dimensão Fractal e o valor de <i>JRC</i> dos perfis do segundo grupo.	50
FIGURA 38.	Correlação entre o parâmetro de Intersecção e o valor de <i>JRC</i> dos perfis do segundo grupo.	50
FIGURA 39.	Comparação de <i>JRC</i> da literatura com <i>JRC</i> da Equação 29.	51
FIGURA 40.	Comparação de <i>JRC</i> da literatura com <i>JRC</i> da Equação 30.	51
FIGURA 41.	Comportamento dos perfis de Barton com o Método do Ângulo.	52
FIGURA 42.	Obtenção da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção pelo Método do Ângulo.	53
FIGURA 43.	Correlação entre a Dimensão Fractal e o valor de <i>JRC</i> dos perfis.	55
FIGURA 44.	Correlação entre o parâmetro de Intersecção e o valor de <i>JRC</i> dos perfis.	55
FIGURA 45.	Comparação de <i>JRC</i> da literatura com <i>JRC</i> da Equação 31.	56
FIGURA 46.	Comparação dos valores da Dimensão Fractal dos três métodos apresentados.	56
FIGURA 47.	Comparação dos valores de <i>A</i> dos métodos aplicados.	57
FIGURA 48.	Comparação entre os valores do <i>JRC</i> usando as Equações 27, 28, 29, 30 e 31.	57
FIGURA 49.	Perfis com igual grau de ondulações e diferentes graus de irregularidades.	60
FIGURA 50.	a. Apresentação do comportamento dos perfis da Figura 49. b. Comportamento da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção dos perfis.	62 62
FIGURA 51.	Correlação entre os valores do <i>JRC</i> com o Peso Fractal.	64
FIGURA 52.	Comparação entre <i>JRC</i> da literatura com o <i>JRC</i> obtido da Equação 33.	65
FIGURA 53.	Valores do <i>JRC</i> , $DF_M$ e <i>H</i> no gráfico 3D.	66
FIGURA 54.	Correlação bilinear de <i>JRC</i> com <i>DF</i> e <i>H</i> .	66
FIGURA 55.	Comparação dos valores de <i>JRC</i> da literatura com os valores da Equação 34.	67
FIGURA 56.	Correlação Quadrática dos parâmetros <i>JRC</i> , $DF_M$ e <i>H</i> .	67
FIGURA 57.	Comparação de <i>JRC</i> da literatura com <i>JRC</i> obtido da Equação 35.	68
FIGURA 58.	Comparação dos valores de <i>JRC</i> dos perfis propostos por Barton & Choubey (1977)	70
FIGURA 59.	Perfis de rugosidade para o efeito escala.	71
FIGURA 60.	Comportamento da Dimensão Fractal com relação ao seu comprimento do perfil.	73
FIGURA 61.	Comparação entre parâmetro de Intersecção e comprimento do perfil.	74
FIGURA 62.	Comparação entre parâmetro de Intersecção e logaritmo do comprimento do perfil.	74
FIGURA 63.	Comportamento de <i>H</i> com relação ao comprimento do perfil.	75
FIGURA 64.	Comportamento da Dimensão Fractal em relação ao comprimento do perfil.	79
FIGURA 65.	Comparação entre parâmetro de Intersecção e comprimento do perfil.	79
FIGURA 66.	Relação entre o parâmetro de Intersecção e logaritmo do comprimento do perfil	80
FIGURA 67.	Comportamento de <i>H</i> com relação ao comprimento do perfil.	80

FIGURA 68.	Comparação entre <i>JRC</i> e Dimensão Fractal dos perfis de Bandis et al. (1981).	81
FIGURA 69.	Comportamento do <i>JRC</i> com relação ao parâmetro de Intersecção dos perfis de Bandis et al. (1981).	81
FIGURA 70.	Comportamento do <i>JRC</i> com relação ao Peso Fractal dos perfis de Bandis et al. (1981).	82
FIGURA 71.	Valores da Dimensão Fractal, Peso Fractal com relação ao valor do <i>JRC</i> dos perfis do efeito escala.	82
FIGURA 72.	Correlação bilinear entre os três parâmetros no efeito escala.	83
FIGURA 73.	Comparação dos valores de <i>JRC</i> da literatura com os valores da Equação 36 onde o erro médio foi de 19,48 %.	83
FIGURA 74.	Correlação Polinomial para o efeito escala.	84
FIGURA 75.	Comparação dos valores do <i>JRC</i> utilizando a Equação 37 onde o erro médio foi de 14,98 %.	85
FIGURA 76.	Comparação dos valores dos <i>JRC</i> usando a equação do efeito escala e Equação 37 dos perfis de Makurat et al. (1990) com <i>JRC</i> 2,6.	87
FIGURA 77.	Comparação dos valores dos <i>JRC</i> da equação do efeito escala e Equação 37 dos perfis de Papaliangas et al. (1990) com <i>JRC</i> 10.	88
FIGURA 78.	Valores dos <i>JRC</i> da equação do efeito escala e Equação 37 dos perfis de Makurat et al. (1990) com <i>JRC</i> 6,9.	89

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1.	Diferença entre Geometria Euclidiana e Teoria Fractal	5
TABELA 2.	Valores da Dimensão Fractal para os perfis típicos de Barton & Choubey (1977).	43
TABELA 3.	Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção aplicando o M. M. Divisor.	45
TABELA 4.	Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção no M. Caixas dos perfis propostos por Barton & Choubey (1977).	48
TABELA 5.	Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção no M. Caixas.	49
TABELA 6.	Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção no M. Ângulo dos perfis propostos por Barton & Choubey (1977)	53
TABELA 7.	Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção aplicando o M. Ângulo.	54
TABELA 8.	Valores de <i>JRC</i> obtidos usando as Equações 27, 28, 29, 30 e 31.	58
TABELA 9.	Coefficientes de Determinação das correlações realizadas.	58
TABELA 10.	Valores da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção dos perfis de rugosidade.	62
TABELA 11.	Valores do <i>JRC</i> , <i>DF</i> , <i>A</i> e <i>H</i> dos perfis do segundo grupo.	64
TABELA 12.	Valores de <i>JRC</i> obtidos da Equação 35 para os perfis típicos propostos por Barton e Choubey (1977).	69
TABELA 13.	Valores do <i>JRC</i> , <i>DF<sub>M</sub></i> , <i>A<sub>M</sub></i> e <i>H</i> dos perfis no efeito escala.	72
TABELA 14.	Valores de <i>DF<sub>M</sub></i> , <i>A<sub>M</sub></i> e <i>H</i> .	77
TABELA 15.	Valores dos parâmetros fractais, <i>JRC</i> e erro obtido.	85
TABELA 16.	Valores dos <i>JRC</i> obtidos pelas equações do efeito escala (Barton & Bandis, 1982) e a Equação 37.	86

## LISTA DE SÍMBOLOS

$DF$	Dimensão Fractal
$JRC$	Coefficiente de Rugosidade da Descontinuidade ( <i>Joint Roughness Coefficient</i> )
$JRC_n$	valor do $JRC$ na escala $n$
$JRC_o$	valor do $JRC$ na escala de laboratório
$L_n$	valor do comprimento da amostra na escala $n$
$L_o$	valor do comprimento da amostra na escala de laboratório
$A$	parâmetro de Intersecção
$DF_M$	Dimensão Fractal obtida pelo Método Modificado do Divisor
$DF_C$	Dimensão Fractal obtida pelo Método das Caixas
$DF_A$	Dimensão Fractal obtida pelo Método do Ângulo
$A_M$	parâmetro de Intersecção aplicando o Método Modificado do Divisor
$A_C$	parâmetro de Intersecção obtido pelo Método das Caixas
$A_A$	parâmetro de Intersecção obtido pelo Método do Ângulo
$Le$	comprimento do perfil no qual foi obtido o valor do parâmetro de Intersecção
$H$	Peso Fractal

## RESUMO

REVILLA, H. A. (2004). Aplicação da Teoria Fractal à quantificação da rugosidade e efeito escala da rugosidade. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

O objetivo do presente trabalho é a aplicação da Teoria Fractal na quantificação de perfis de rugosidade de juntas rochosas. Para esta quantificação digitalizaram-se perfis de rugosidade encontrados na literatura e posteriormente determinou-se a Dimensão Fractal de cada perfil utilizando três métodos. Dentre estes, estabeleceu-se que o Método Modificado do Divisor é o mais adequado para determinar a Dimensão Fractal. Verificou-se também a importância do parâmetro de Intersecção, que também pode quantificar o perfil de rugosidade. De uma análise comparativa se estabeleceu que o parâmetro de Intersecção quantifica melhor o perfil que a Dimensão Fractal. Para uso prático, este parâmetro foi adimensionalizado e o novo parâmetro foi denominado como Peso Fractal. Este último junto com a Dimensão Fractal quantificam melhor o perfil de rugosidade. Avaliou-se também o comportamento da Dimensão Fractal, parâmetro de Intersecção e Peso Fractal no efeito escala da rugosidade. Estes têm uma dependência do comprimento do perfil.

Palavra-chave: Dimensão Fractal, Peso Fractal, perfil de rugosidade, efeito escala.

## ABSTRACT

REVILLA, H. (2004). Fractal Theory application to roughness quantification and roughness scale effect. Dissertation (M.Sc.). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

The purpose of the present work is the application of the Fractal Theory to the quantification of rock joint roughness. Rock joint roughness profiles available in the literature were digitized in order to allow quantitative analysis. The Fractal Dimension was determined for each profile using three different methods. Among those methods, it was found that the Modified Divider Method is the most adequate. The importance of the intercept parameter was also found for the fractal dimension determination and roughness quantification. Based on a comparative analysis, the intercept parameter was found to be better for roughness quantification than the fractal dimension. For practical purposes, a dimensionless form of the intercept parameter was established. The new parameter was called the Fractal Weight. The joint use of both fractal dimension and fractal weight was found to be the most effective way to quantify rock joint roughness profiles. The influence of the three mentioned parameters on joint strength scale effect was also analyzed.

Keywords: Fractal Dimension, Fractal Weight, roughness profile, scale effect.

## 1. INTRODUÇÃO

---

Durante muitos anos o homem empregou maciços rochosos como meio ou fundação de obras civis. Entre estas temos principalmente barragens, túneis, estradas e reservatórios onde se realizam grandes escavações subterrâneas ou a céu aberto. Também no maciço rochoso apresentam-se trabalhos subterrâneos de mineração ou a céu aberto.

Devido às perturbações provocadas pelas escavações subterrâneas e a céu aberto no maciço rochoso, vários pesquisadores estudam seu comportamento ante tais perturbações. O estudo do comportamento do maciço é principalmente efetuado para estabelecer a estabilidade das escavações. Este comportamento é principalmente governado pelas descontinuidades presentes no maciço, devido às grandes deformações concentradas ante tensões externas ou alívio de tensões. A resistência do maciço é também condicionada pela resistência a cisalhamento das descontinuidades, por vezes muito menor que a do material intacto.

A importância da resistência a cisalhamento é devida a sua influência na estabilidade das escavações. Por este motivo, vários pesquisadores realizaram ensaios tanto em campo como em laboratório, para compreender o comportamento das descontinuidades ante tensões externas, como também saber quais são os fatores que controlam este comportamento. Entre os estudos realizados sobre este tema, um dos mais relevantes é o apresentado por Barton & Choubey (1977).

Barton depois de realizar vários estudos sobre a resistência a cisalhamento determinou que a rugosidade da descontinuidade tem uma grande influência naquele parâmetro. Quantificou a rugosidade usando o coeficiente de rugosidade da junta *JRC*. Também propôs métodos laboratoriais para quantificar a rugosidade. Estes são o ensaio de inclinação, o ensaio de puxar blocos e o ensaio de cisalhamento direto. Mediante uma simples retroanálise se obtém o parâmetro de quantificação da rugosidade o *JRC*. Além dos ensaios laboratoriais, Barton & Choubey (1977) propuseram a conhecida

tabela dos perfis típicos de rugosidade, onde se apresentam 10 perfis de rugosidade com valores do *JRC* que variam de 0 – 2, valores para perfis quase planos, até 18 – 20, valores para perfis muito rugosos; a utilização adequada desta tabela tem que ser realizada por pessoal experiente nesta área. Por conseqüência desta incerteza da utilização da tabela, aos elevados custos e longos prazos de execução dos ensaios laboratoriais, vários pesquisadores trabalharam com parâmetros estatísticos e parâmetros geoestatísticos para a quantificação da rugosidade da descontinuidade principalmente mediante a utilização de perfis de rugosidade.

Entre os parâmetros estatísticos mais importantes temos os seguintes: o parâmetro  $Z_2$ , Função Estrutura (*SF*). Entre os parâmetros geoestatísticos, o mais utilizado pelos pesquisadores é o variograma. Além dos parâmetros mencionados, uma teoria relativamente nova foi utilizada por vários pesquisadores para a quantificação do perfil da rugosidade. Os resultados obtidos foram bons em comparação com os parâmetros estatísticos. Esta teoria é conhecida como a Teoria Fractal, e neste trabalho será utilizada para a quantificação dos perfis de rugosidade.

Tendo em vista que a Teoria Fractal não é muito conhecida, no capítulo 2 se apresentam conceitos gerais sobre a teoria, como também os métodos para determinar a Dimensão Fractal. Além da apresentação da Teoria Fractal, também é realizado um levantamento bibliográfico sobre a resistência a cisalhamento, os métodos usados para sua determinação dando maior destaque ao proposto por Barton. Também são apresentados os parâmetros e ensaios para quantificar a superfície da descontinuidade como os ensaios laboratoriais, parâmetros estatísticos e a tabela dos perfis típicos.

No capítulo 3 descrevem-se os materiais e métodos utilizados neste trabalho.

No capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos da aplicação da Teoria Fractal mediante os métodos para determinar a Dimensão Fractal para quantificar os perfis de rugosidade, o comportamento dos parâmetros fractais (Dimensão Fractal, parâmetro de Intersecção e Peso Fractal) no efeito escala da rugosidade.

No capítulo 5 apresentam-se as conclusões e recomendações atingidas ao término deste trabalho.



### 1.1. OBJETIVOS

Os objetivos da pesquisa são: a determinação da rugosidade mediante a utilização da Dimensão Fractal, usando para isso todo o conhecimento científico descrito na literatura durante mais de 20 anos desde a proposição dos mesmos; determinar qual é o melhor método para obter a Dimensão Fractal, utilizada na determinação da rugosidade da descontinuidade; observar o comportamento da Dimensão Fractal no efeito escala da rugosidade.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRAFICA

---

No presente capítulo é apresentado o aspecto teórico da pesquisa, dando maior importância à Teoria Fractal. O capítulo divide-se em duas partes.

A primeira parte é sobre o desenvolvimento dos conceitos básicos da Teoria Fractal e métodos a serem usados na determinação da dimensão fractal.

A segunda parte trata do desenvolvimento de alguns parâmetros e ensaios que são usados na quantificação da superfície rugosa de uma descontinuidade. Os parâmetros são aplicados a perfis que representam a superfície rugosa. Além do mencionado, também é apresentado o conceito de efeito escala na rugosidade.

### 2.1. TEORIA FRACTAL E MÉTODOS FRACTAIS

A Geometria Euclidiana representa a disposição de objetos feitos de pontos, linhas, planos e volumes que quando combinados, formam figuras específicas. As formas estabelecidas na natureza tal como montanhas, costa, sistema de rios, árvores e um número infinito de objetos não são descritos facilmente pela tradicional geometria Euclidiana. Em seu primeiro trabalho, *The Fractal Geometry of Nature*, Benoit Mandelbrot lançou o termo “fractal”, no vocabulário moderno (Mandelbrot, 1983), com o objetivo de preencher o espaço entre a geometria euclidiana e o caos (Mandelbrot, 1983; Byron, 1996; Muralha, 1991). Na tabela 1, apresentam-se algumas diferenças entre a Geometria Euclidiana e a Teoria Fractal.

As técnicas fractais em particular, mais do que um ramo da Matemática, têm-se revelado como uma ferramenta extremamente útil a muitas Ciências, mesmo as sociais, permitindo uma linguagem comum entre especialistas de diferentes áreas.

A aplicação da Teoria Fractal para o estudo da geologia requer necessariamente um entendimento dos conceitos de auto-semelhança e auto-afinidade (Carr, 1997).

Tabela 1. Diferença entre Geometria Euclidiana e Teoria Fractal.

Euclidiana	Fractal
Baseada numa escala característica	Sem escala específica
Serve os objetos construídos pelo homem	Apropriada para as formas de natureza
Descrita por fórmulas	Descrita por algoritmos recursivos
Dimensão inteira (topológica)	Aceita dimensões fracionárias

(Muralha, 1991).

### 2.1.1. RESENHA HISTÓRICA

O começo da história dos fractais foi pelo ano de 1975, quando Benoit Mandelbrot criou a palavra “*Fractal*” e também a sua primeira obra sobre o assunto. No entanto vários acontecimentos anteriores abriram caminho para que essa iniciativa pudesse surgir. Por essa “pré-história” dos fractais começaremos (Muralha, 1991).

Entre a segunda metade do século XIX e a primeira do século XX, foram propostos objetos matemáticos e por muito tempo foram considerados “monstros matemáticos”, pois desafiavam os conhecimentos comuns do infinito. Cantor (1845 – 1918), propôs retirar o segmento médio de uma linha dividida em três partes iguais, e assim com os segmentos restantes; este objeto foi conhecido como “poeira do cantor”, pois sendo infinito possuiria um comprimento total igual a zero (Figura 5). Em 1904 era apresentada a linha de Von Koch, que sendo uma linha rodeada por uma área finita, possuiria um comprimento infinito (Figura 4).

Com os acontecimentos mencionados, a figura de Benoit Mandelbrot apareceu. Ele nasceu em Varsóvia em 1924 e refugiou-se com a família em Paris em 1936, e apesar de ter feito os seus estudos básicos de uma forma irregular, ingressou na *École Polytechnique*.

Em 1952 doutorou-se em Matemática pela Universidade de Paris e em 1958 emigraria aos Estados Unidos, iniciando uma carreira no Thomas J. Watson Research Center da IBM. Estudou a variação dos preços de algodão, desenvolveu um trabalho relacionado com a transmissão de ruído em linhas telefônicas, ensinou em Harvard e investigou a teoria dos jogos entre outras atividades. Em particular, Mandelbrot debruçou-se sobre um problema antigo, qual era o comprimento da linha de costa de um país.

Esta e outras questões deram origem a uma teoria inovadora que terminaria no primeiro livro de Mandelbrot, que não foi bem recebido pela comunidade científica. Só em 1982, com a publicação de "*The Fractal Geometry of Nature*", este sairia do anonimato.

### 2.1.2. TERMINOLOGIAS E DEFINIÇÕES

A palavra Fractal tem sua origem na palavra do latim *fractus*, que significa fragmentado, irregular, partido (Mandelbrot, 1975; Osuna & Juan; Feder, 1989). Foi introduzida em 1975 por Mandelbrot no livro *Les objets fractales: forme, hasard et dimension*. Além disso, Mandelbrot também propôs algumas definições adicionais como, "um fractal é por definição um conjunto para o qual a dimensão Hausdorff-Besicovich excede estritamente à Dimensão Topológica" e também "que um fractal é uma forma feita de partes similares ao todo" (Feder, 1989; Mandelbrot, 1982).

Já Hubson (1993), tem seu próprio conceito de fractal: "um fractal pode ser pensado como uma ordem de pontos, que constitui um subconjunto de um espaço particular de interesse".

De acordo com Muralha (1991), as propriedades mais relevantes dos fractais são: i) os fractais são de forma tão "irregular" que não podem ser descritos pela linguagem da geometria tradicional (Euclidiana), tanto de uma forma global como local; ii) em muitos casos, os fractais são definidos de uma forma bastante simples, iii) os fractais têm uma estrutura "fina", isto é, apresentam detalhe a qualquer escala; iv) muitas vezes os fractais apresentam características de auto-semelhança ou de auto-afinidade, mesmo aproximadas ou estatísticas; v) a dimensão fractal é diferente da dimensão topológica, sendo geralmente superior.

### 2.1.3. TEORIA FRACTAL

#### 2.1.3.1. INTRODUÇÃO À TEORIA FRACTAL

A Teoria Fractal está estabelecida entre a excessiva ordem da Geometria Euclidiana e o caos da geometria da matemática geral. Os fractais são objetos geométricos complexos, que têm um aspecto similar à imagem original após uma série

de ampliações a diferentes escalas (Mandelbrot, 1988; Muralha, 1991; Gopalakrishnan & Zhang, 1994).

### 2.1.3.2. DIMENSÃO FRACTAL

Antes de tudo, sabemos da geometria elementar que um ponto isolado, ou um número finito de pontos, constitui uma figura de dimensão zero. Uma reta, bem como quaisquer outras linhas constituem figuras de dimensão um. Que um plano, ou qualquer outra superfície – padrão -, constitui figuras de dimensão dois. Que um cubo tem dimensão três. A estes conceitos de domínio geral, diversos matemáticos, a começar por Hassdorff (1919), acrescentaram que certas figuras idealizadas têm dimensão não inteira. Estas podem ser frações, como, por exemplo,  $\frac{1}{2}$ ,  $\frac{3}{2}$ ,  $\frac{5}{2}$ , mas são mais frequentemente números irracionais, como  $\log 4 / \log 3 = 1.2618\dots$ , ou mesmo raízes de equações complicadas.

Para caracterizar essas figuras, pode-se começar por dizer, de um modo grosseiro, que uma figura cuja dimensão se situe entre 1 e 2 deverá ser mais “afilada” que uma superfície ordinária, sendo, contudo, mais “maciça” que uma linha ordinária. Se em particular, tratar-se de uma curva, deverá ter uma superfície nula, mas um comprimento infinito. Da mesma maneira, se a sua dimensão estiver compreendida entre 2 e 3, deverá ter um volume nulo e uma superfície infinita.

A Dimensão Fractal é definida como sendo a medida das irregularidades (ou melhor, do grau de irregularidades) de um objeto em diferentes escalas. (Peterson & Branderhorst, 1993, Mandelbrot, 1991, Mandelbrot, 1983).

Para um melhor entendimento da Dimensão Fractal, tome-se, como exemplo, uma linha de costa, cujo comprimento deve ser determinado. Para medir o comprimento da linha de costa, será utilizada uma régua de comprimento  $\gamma$  e o número de régua necessárias para medir a linha de costa será registrado como  $N$ . Então o comprimento da linha  $L$  é expresso como:

$$L = N\gamma$$

O comprimento da régua  $\gamma$  é reduzido e o procedimento é repetido várias vezes, com diferentes comprimentos de régua, como está apresentado na Figura 1, obtendo-se

novos valores de  $\gamma$  e  $N$ . Observa-se que o comprimento da linha aumenta quando o comprimento da régua diminui (Mandelbrot, 1983; Byron, 1996).

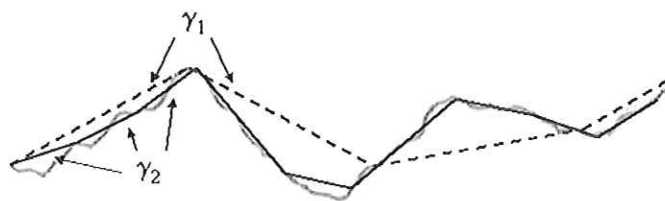


Figura 1. Comprimentos da régua para obter o comprimento da linha.

Os valores obtidos de  $\gamma$  e  $L$  são colocados sob a forma de logaritmo ( $\log L$  vs  $\log \gamma$ ) na Figura 2. Desta figura obtém-se uma reta, cuja inclinação constante é o parâmetro  $D$  da figura que é a Dimensão Fractal que anteriormente foi conhecida como a dimensão de Hausdorff-Besicovitch.

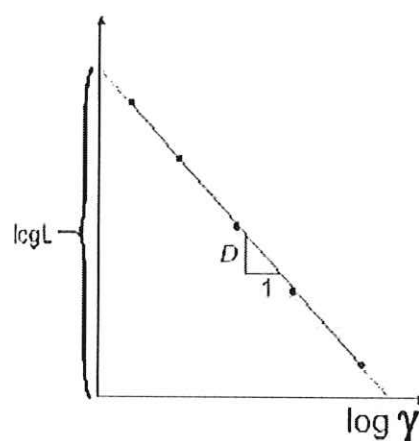


Figura 2-. Gráfico de  $\log L$  vs  $\log \gamma$ , onde se obtém a Dimensão de Hausdorff-Besicovitch.

A inclinação constante da reta da Figura 2 e dada por:

$$D = \frac{\Delta \log L}{\Delta \log \gamma} \quad (1)$$

O procedimento foi proposto por Mandelbrot, para determinar a Dimensão Fractal de formas complexas, apresentadas na natureza, e é conhecido como o Método do Divisor (*yardstick, ruler or divider method*).

Para algumas formas naturais, tal como a costa da Grã-Bretanha,  $D$  está compreendida entre as dimensões topológicas: um e dois. Quando a dimensão Hausdorff-Besicovitch de algumas formas naturais excede a dimensão topológica (Euclidiana), estas são consideradas fractais. A Dimensão Hausdorff-Besicovitch mudou de nome para Dimensão Fractal, por sugestão de Mandelbrot (Mandelbrot, 1983; Byron, 1996).

Os fractais se dividem em dois grupos: Fractais Auto-Semelhantes e Fractais Auto-Afins. A seguir apresentam-se ambos conceitos, além dos métodos para determinar a Dimensão Fractal dos Fractais Auto-Semelhantes e Fractais Auto-Afins.

#### 2.1.4. FRACTAIS AUTO-SEMELHANTES

Na Figura 3, apresenta-se a linha de Von Koch. Nota-se que ela possui uma estrutura ou forma semelhante ou similar independentemente da escala. A auto-semelhança implica que um determinado conjunto tenha o mesmo aspecto, qualquer que seja a escala utilizada. Em termos matemáticos dizer que dois conjuntos são semelhantes corresponde a afirmar que um deles pode ser definido a partir do outro, e vice-versa, através de transformações que se caracterizam por ampliar ou reduzir as distâncias entre dois pontos quaisquer segundo uma mesma razão, sem depender da direção que se esteja considerando (Muralha, 1991; Barabási & Stanley, 1995).

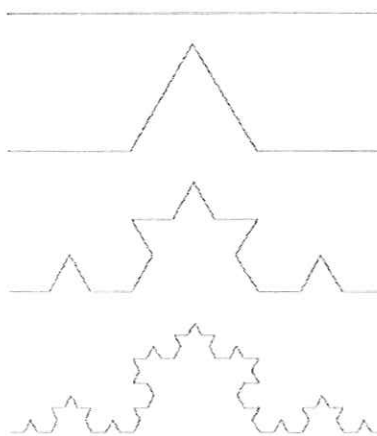


Figura 3- Linha de Von Koch

O termo auto-similar denota “estatisticamente auto-afim” como definido por Mandelbrot (1983, 1985) apud Sabbadini et al. (1995). Se um perfil é estatisticamente

auto-similar, uma porção do perfil, quando é magnificada isotropicamente, pode mostrar-se estatisticamente o mesmo como os perfis inteiros.

#### 2.1.4.1. MÉTODO PARA DETERMINAR A DIMENSÃO FRACTAL DO FRACTAL AUTO-SEMELHANTE

A determinação da Dimensão Fractal de fractais auto-semelhantes é realizada através da divisão do objeto em partes iguais,  $r$ , obtendo  $N$  cópias iguais ao objeto original.

Reciprocamente, obtém-se um objeto auto-similar de  $N$  partes iguais e de relação  $r$

$$N = \frac{1}{r^D} \quad (2)$$

A Dimensão Fractal é dada por,

$$D = \frac{\log(N)}{\log(1/r)} \quad (3)$$

A Linha de Kock e a Poeira de Cantor são exemplos de Fractais Auto-similares mais conhecidos (Barnsley et al., 1988).

**Linha de Kock** (Bunde & Havlin, 1995), tem-se um segmento de reta o qual será dividido em 3 partes iguais;  $1/3$  do total, a parte média, será trocada por dois segmentos de igual comprimento à parte trocada, ao final se obtém 4 partes iguais. Esta operação pode-se seguir até o infinito e sempre uma porção da linha será igual ao todo. A Dimensão Fractal da linha é:

$$D = \frac{\log 4}{\log 3} = 1,2618.....$$



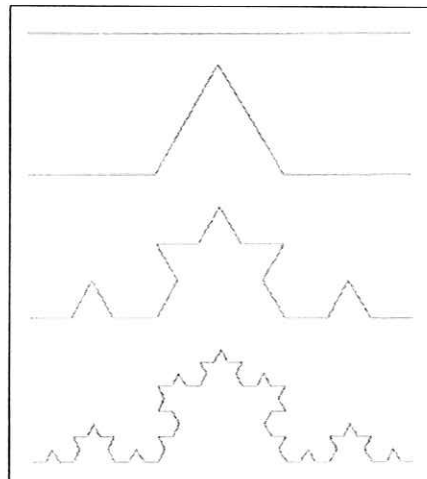


Figura 4. Linha de Kock (Bunde & Havlin, 1995)

**Poeira do Cantor** (Bande & Havlin, 1995), segue o mesmo processo da Linha de Kock, só que não se tem que trocar a parte média do segmento de reta, sem tirar a parte média, obtendo-se duas partes iguais. Esta operação pode-se seguir até o infinito. A Dimensão Fractal da Poeira de Cantor é:

$$D = \frac{\log 2}{\log 3} = 0,630929.....$$

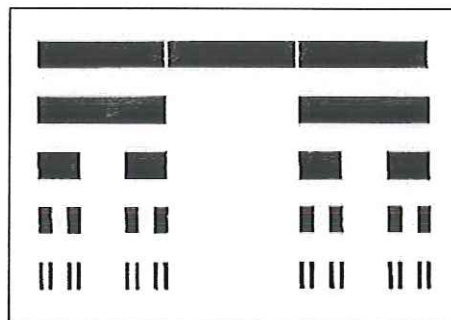


Figura 5. Poeira de Cantor (Bunde & Havlin, 1995)

#### 2.1.5. FRACTAIS AUTO-AFINS

A auto-afinidade corresponde a uma característica semelhante, mas que se baseia numa transformação em que as distâncias são ampliadas ou reduzidas segundo razões diferentes conforme a direção, o que implica que se obtenha uma imagem distorcida em

relação à inicial. Trata-se de um conceito a que estamos habituados, ao realizarmos cortes geológicos ou perfis longitudinais de estradas em que a direção vertical se encontra, geralmente, sobreelevada; outro exemplo são os perfis de rugosidade que representam uma superfície rugosa de uma descontinuidade (Muralha, 1991; Gopalakrishnan, 1994; Barabási & Stanley, 1995).



Figura 6- Exemplo de linha Auto-Afim (Xie, 1993).

Sabbadini et al. (1995) definiram que o termo auto-afim denota “estatisticamente auto-afim” como Mandelbrot definira. Para um perfil de rugosidade “estatística auto-afim”, uma porção do perfil mostra-se estatisticamente o mesmo como o perfil inteiro só se as diferenças de fatores de magnificação são usados nas direções paralela e perpendicular à superfície.

#### 2.1.5.1. MÉTODOS PARA DETERMINAR A DIMENSÃO FRACTAL DOS FRACTAIS AUTO-AFINS

Há numerosos métodos com os quais a Dimensão Fractal da rugosidade de uma descontinuidade de rocha poderia ser calculada. Porém só mencionaremos três métodos, com os quais vamos trabalhar nesta pesquisa. Os métodos usados para a determinação da Dimensão Fractal são o Método Modificado do Divisor, Método das Caixas e o Método do Ângulo.

Como resultado do levantamento bibliográfico, observou-se que vários pesquisadores determinaram outro parâmetro além da Dimensão Fractal, denominado neste trabalho de parâmetro de Intersecção. Este parâmetro será definido mais adiante.

##### 2.1.5.1.1. MÉTODO MODIFICADO DO DIVISOR

Primeiramente, será dada uma descrição do Método do Divisor para que se possa entender melhor o Método Modificado do Divisor. Considere-se uma linha de costa, cujo comprimento real tem que ser determinado. Para isso, utilizam-se várias réguas

com diferentes comprimentos e mede-se a linha de costa, obtendo-se diferentes comprimentos finais. Os resultados são lançados em um gráfico bilogárítico, o logaritmo do comprimento final contra o logaritmo do comprimento da régua usada (Mandelbrot, 1983; Feder, 1988; Muralha, 1991).

Este método foi modificado por Brown em 1987. Ele não utiliza uma régua com comprimento constante, mas coloca uma linha horizontal e divide-a em intervalos iguais,  $r$ . Posteriormente, a projeção dos intervalos intersecciona o perfil, como é mostrado na Figura 7. Assim, são somados os comprimentos das intersecções para obter o comprimento do perfil. Este procedimento é repetido para diferentes comprimentos de intervalos  $r$ . Da relação entre  $\log L$  e  $\log r$ , obtém-se  $\beta$  a inclinação da reta obtida da relação. Assim, obtém-se a Dimensão Fractal do perfil, que pode ser determinada pela equação:

$$D=1-\beta$$

e pode ser utilizada em perfis de rugosidade. Todo o procedimento é mostrado na Figura 8 (McWilliams et al., 1990).

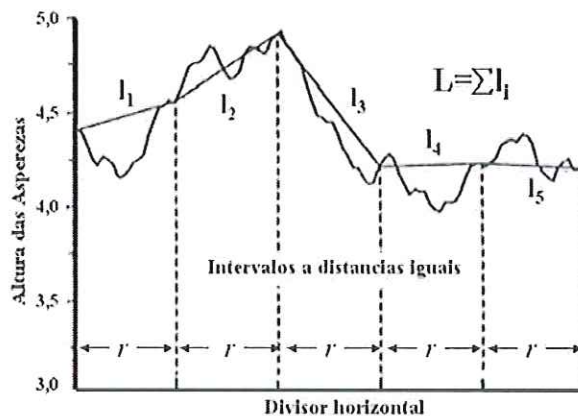


Figura 7. Intersecção dos intervalos horizontais com o perfil (McWilliams et al., 1990).

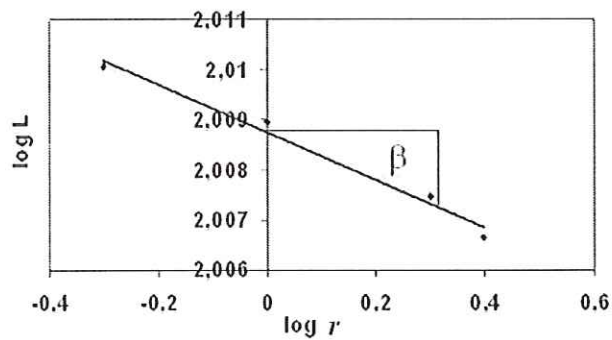


Figura 8. Obtenção do valor da Dimensão Fractal do M. M. Divisor.

O Método do Divisor foi modificado para mitigar as incertezas associadas com a aplicação do método na extremidade final do perfil. O Método Modificado elimina essa incerteza no momento em que os intervalos estão associados a uma reta horizontal (McWilliams et al. 1990; Muralha, 1990).

#### 2.1.5.1.2. MÉTODO DAS CAIXAS

O método consiste em cobrir todo o perfil com uma rede de caixas quadradas de lado  $r$  (exemplificado na Figura 9); depois, contam-se as caixas que cobrem o perfil ( $N$ ) posteriormente repete-se o procedimento com diferentes valores de  $r$  e finalmente, desenha-se a relação  $\log N$  vs  $\log r$ , de onde se obtém a Dimensão Fractal, como observado na Figura 10. A Dimensão Fractal é determinada a partir da inclinação da reta obtida da Figura 10. (Muralha, 1991; Kulatilake et al., 1997; Pal et al., 2003). Igualmente, a Dimensão Fractal é representada pela seguinte equação:

$$DF = \frac{\log N}{\log\left(\frac{1}{r}\right)} \quad (4)$$

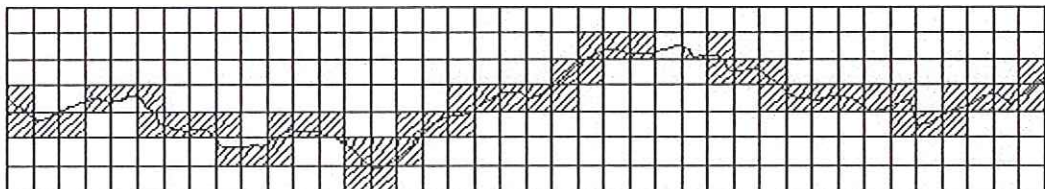


Figura 9. Perfil coberto pelas caixas quadradas de lado  $r \times r$ .

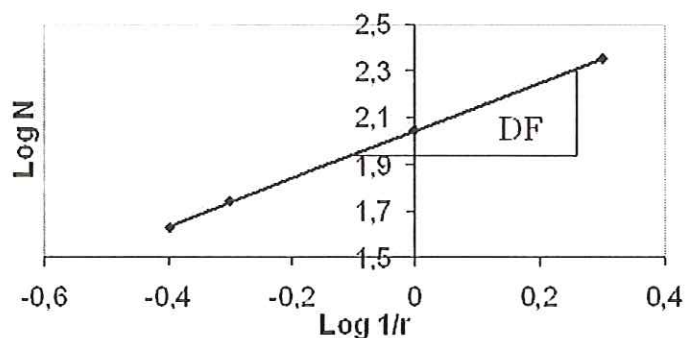


Figura 10. Obtenção da Dimensão Fractal de um perfil do M. Caixas.

### 2.1.5.1.3. MÉTODO DO ÂNGULO

O Método do Ângulo está baseado nas análises de Renger sobre a rugosidade de descontinuidades de rocha (Goodman, 1989; Fecker & Renger, 1971 e Byron, 1996). Serão utilizados os princípios desta análise para a implementação do método. Coloca-se uma reta paralela à base das rugosidades, com comprimento igual à base do perfil, que pode ser dividida em intervalos iguais,  $r$ . Depois, projetam-se os intervalos até atingir o perfil, como é mostrado na Figura 11.

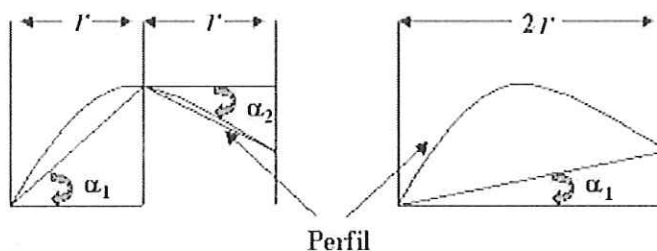


Figura 11. Aplicação do Método do Ângulo.

Posteriormente, são determinados os ângulos formados pelas intersecções das projeções dos intervalos com o perfil. Este processo é repetido, variando os comprimentos do intervalo, obtendo-se diferentes ângulos para cada novo intervalo. Depois, são determinados os valores absolutos dos ângulos para posteriormente se obter o valor do ângulo médio para cada diferente intervalo. Em seguida, os valores dos ângulos médios com o comprimento do intervalo são colocados num gráfico bilogarítmico, como mostrado na Figura 12.

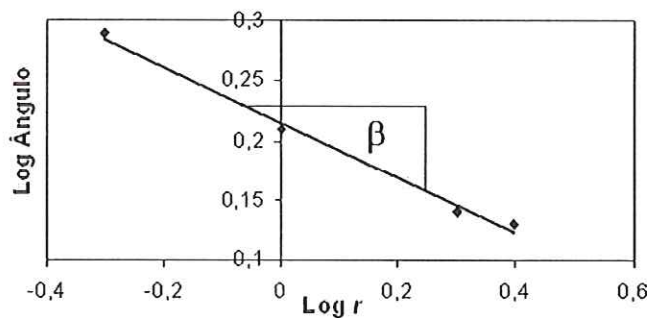


Figura 12. Determinação da dimensão fractal do perfil do M. Ângulo.

Para a determinação da Dimensão Fractal por este método, é usada a seguinte equação, onde está relacionada a inclinação da reta ( $\beta$ ) obtida da Figura 12:

$$D = 1 - \beta \quad (5)$$

#### 2.1.5.1.4. PARÂMETRO DE INTERSECÇÃO

Este parâmetro só é observado nos fractais auto-afins, especificamente quando se aplicam os métodos mencionados anteriormente na quantificação, como também na determinação dos perfis de rugosidade. O parâmetro surge quando se aplicam os métodos para determinar a Dimensão Fractal. O parâmetro é determinado quando a reta intercepta o eixo y, num ponto cujo valor foi usado para a quantificação como também para a determinação da rugosidade. Neste trabalho utiliza-se o termo de *parâmetro de Intersecção* para denomina-lo.

Muitos pesquisadores mencionam este parâmetro em seus trabalhos com definições ou denominações distintas.

A seguir se mostrarão algumas definições deste parâmetro, como também se mencionarão os métodos utilizados para determinar a Dimensão Fractal e o parâmetro de Intersecção.

Um dos primeiros em mencionar este parâmetro foi Brown (1987), nomeando-o como *constante de proporcionalidade (C)*, usando o Método Espectral. Não apresentou definição, nem tampouco alguma correlação com a rugosidade.

Outros foram Miller et al. (1990), que o denominaram como *y-interceptor (Am)*. O método utilizado por ele foi o Método Modificado do Divisor. Não apresentou definição nem uma correlação com a rugosidade da descontinuidade.

McWilliams et al. (1990), denominaram de *Interceptor Fractal (I)*, usando o Método Modificado do Divisor, não apresentando definição nem correlação alguma.

Power & Tullis (1991) denominaram de *Interceptor (F)* e definiram o parâmetro como a inclinação da topografia da superfície, utilizando o Método do Divisor para determinar a Dimensão Fractal.

Gopalakrishnan (1994), denominou-o de *Constante (C)*. Segundo este pesquisador, determina a declividade da topografia da superfície usando os métodos do Divisor e Espectral.

Odling (1994) denominam de *Parâmetro de Amplitude do perfil (A)*, trabalhando com o método estatístico Função Estrutura. Correlacionou-o com o valor de *JRC*, com bons resultados.

Xie et al. (1997), denominaram de *Interceptor (A)*, e utilizaram o Método do Variograma.

Shirono & Kulatilake (1997) e Kulatilake et al. (1998), coincidiram tanto na denominação como na definição do parâmetro, sendo *constante de proporcionalidade (Ks)* e *(Kv)*, que tem a potencialidade de capturar o efeito escala da rugosidade. Utilizaram-se respectivamente os métodos Espectral e Variograma.

Segundo Kulatilake & Um (1997) e (1999), a *constante de proporcionalidade (A)* captura a amplitude do perfil em diferentes escalas. O método usado foi o *roughness-length*.

## 2.2. ASPECTOS TEÓRICOS DA RUGOSIDADE DE UMA DESCONTINUIDADE

Apresentam-se aspectos teóricos sobre alguns parâmetros e ensaios para quantificar a rugosidade de uma descontinuidade, a resistência a cisalhamento da descontinuidade, como também o efeito escala da rugosidade, e a sua influência no comportamento diferenciado nas amostras de diferentes tamanhos.

### 2.2.1. INTRODUÇÃO

A rugosidade de uma descontinuidade é um importante parâmetro na Geotecnia, porque tem influência no comportamento de maciços rochosos, principalmente na resistência a cisalhamento das descontinuidades. Devido a este fato é que vários pesquisadores realizaram estudos para quantificar a rugosidade de uma descontinuidade. Entre estes estudos, um dos mais conhecidos é do Barton e Choubey

(1977), que propuseram o parâmetro *JRC* para caracterizar e quantificar a rugosidade. Os ensaios que podem ser usados para determinar o parâmetro *JRC* são o ensaio de inclinação, o ensaio de puxar blocos e o ensaio de cisalhamento direto, interpretados com retro-análise.

Além destes ensaios mencionados, realizados em campo e laboratório, existem outros que não precisam de ensaio algum, mas utilizam a geometria de perfis de rugosidade. Estes outros são os seguintes: parâmetro  $Z_2$  (Tse & Cruden, 1979), Função Estrutura (SF) (Tse & Cruden, 1979), CLA (centre-line-average) (Krahn, Morgenstern, 1979), parâmetros geoestatísticos como o variograma (Huang et al., 1992) (Piggott et al., 1995) e a utilização da Dimensão Fractal.

A estreita relação entre resistência ao cisalhamento e a rugosidade da descontinuidade tem levado vários investigadores a realizar estudos específicos sobre a influência da rugosidade na resistência ao cisalhamento, utilizando o conceito de Dimensão Fractal. (Clerici et al., 1990; Xie et al., 1999; Weissbach, 1978; Xie, 1993; Wu, 2000; Majumbar & Tien 1990). A teoria fractal pode quantitativamente caracterizar a rugosidade do perfil da junta (Muralha, 1991).

Primeiramente desenvolveram-se conceitos teóricos da resistência a cisalhamento da descontinuidade, propostos por vários pesquisadores, dando maior importância àquela proposta por Barton & Choubey (1977). Posteriormente serão apresentados os ensaios e parâmetros que são usados comumente para quantificar a rugosidade e finalmente aspectos do efeito escala da rugosidade e sua influência na resistência a cisalhamento.

### 2.2.2. RESISTÊNCIA A CISALHAMENTO

O ensaio mais amplamente aceito para determinar a resistência a cisalhamento da descontinuidade é o ensaio de cisalhamento direto. O ensaio de cisalhamento direto é realizada em blocos separados pela descontinuidade. Para isso, são aplicadas tensões tanto normal como cisalhante na descontinuidade. O objetivo do ensaio é determinar a resistência da descontinuidade em condições laboratoriais como também em campo, para posteriormente os resultados serem usados em obra (Figura 13).



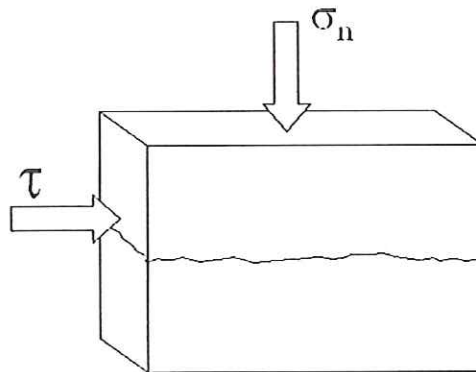


Figura 13. Representação gráfica do ensaio de cisalhamento direto.

Barton & Choubey (1977), depois de realizar vários ensaios e análises propuseram um critério de resistência a cisalhamento que utiliza os seguintes parâmetros: ângulo de atrito básico da descontinuidade ( $\phi_b$ ), a resistência à compressão simples do material das paredes da descontinuidade ( $JCS$ ), o parâmetro  $JRC$  (*joint roughness coefficient*) que caracteriza a rugosidade da descontinuidade. A resistência varia com o nível de tensão normal do ensaio de cisalhamento. O critério é representado pela seguinte expressão:

$$\frac{\tau}{\sigma_n} = \tan \left[ (JRC) \log \left( \frac{JCS}{\sigma_n} \right) + \phi_b \right] \quad (6)$$

onde  $\tau$  = resistência a cisalhamento

$\sigma_n$  = tensão normal efetiva

$JRC$  = Coeficiente de Rugosidade da Descontinuidade

$JCS$  = Resistência à compressão da parede da junta

$\phi_b$  = ângulo de atrito básico

Ladanyi & Archambault (1969), propuseram uma fórmula para a relação da resistência a cisalhamento com tensão normal, desenvolvida do trabalho de Rowe e Rowe et al. (1964), que toma consideração de cisalhamento intacto devido às asperezas. Esta equação é

$$\tau = \frac{\sigma_n (1 - a_s)(\nu + \tan \phi_r) + a_s S_R}{1 - (1 - a_s)\nu \tan \phi_r} \quad (7)$$

onde

$a_s$  = a relação da área cortada através das asperezas, e área total da descontinuidade.

$\nu$  = índice de dilatação (i.e.  $\Delta y / \Delta x$ )

$S_R$  = resistência a cisalhamento de rocha intacta.

$\phi_r$  = ângulo de atrito residual.

Em seu trabalho original, Ladanyi & Archambault utilizaram a expressão parabólica desenvolvida por Fairhurst para  $S_R$ .

$$S_R = q_u \left( \frac{m-1}{n} \right) \left( 1 + n \frac{\sigma_n}{q_u} \right)^{1/2} \quad (8)$$

onde

$$m = (n+1)^{1/2}$$

$q_u$  = resistência à compressão simples

$n$  = relação entre resistência a compressão simples  $q_u$  e resistência à tração

$T_o$

$S_R$  deveria ser igualado à resistência de Mohr-Coulomb

$$S_R = c + \sigma_n \tan \phi \quad (9)$$

onde

$c$  = coesão

$\phi$  = ângulo de atrito do material

Segundo a ISRM (1978), na prática as ondulações afetam a direção inicial do deslocamento de corte, relativo ao plano médio da descontinuidade. Portanto as irregularidades afetam a resistência a cisalhamento, que deveria ser normalmente ensaiada em um laboratório ou em escala de campo.

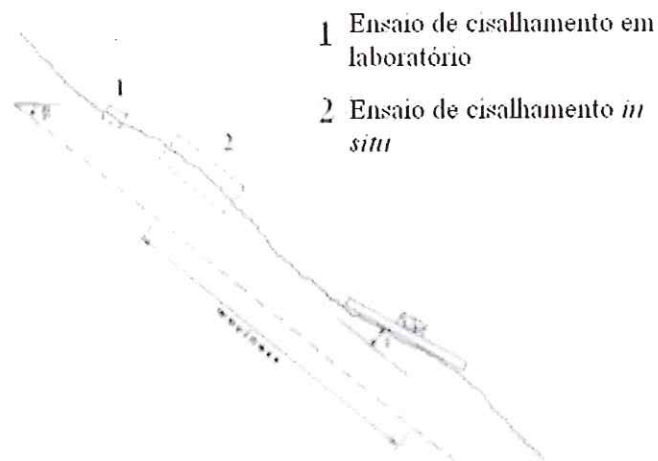


Figura 14. Diferentes escalas de rugosidade da descontinuidade (ISRM, 1978).

### 2.2.3. PARÂMETROS E ENSAIOS PARA CARACTERIZAR A RUGOSIDADE

Em termos gerais a rugosidade da descontinuidade pode ser caracterizada como ondulações (ondulações em grande escala em contacto, causam dilatância durante o cisalhamento, uma vez que são grandes demais para ser cisalhadas) e irregularidades (rugosidades de pequena escala que tendem a ser danificadas durante o cisalhamento, a menos que a parede da descontinuidade tenha alta resistência e/ou os níveis de tensão fiquem abaixo da resistência do material intacto; dilatância pode também ocorrer nestas características de pequena escala). A superfície rugosa e ondulação relativa ao plano médio da descontinuidade estão ligadas estruturalmente. Ambas, a rugosidade e a ondulação, colaboram com a resistência a cisalhamento (ISRM, 1978; Indraratna et al., 1995 e Clerici et al., 1990). As irregularidades da superfície de uma descontinuidade podem ser descritas em termos de rugosidade (irregularidades em dimensões milimétricas e centimétricas) e de ondulações (irregularidades em dimensões decimétricas ou métricas).

### 2.2.3.1. JRC (*Joint Roughness Coefficient*)

O *JRC* é um parâmetro criado para caracterizar a superfície rugosa de uma descontinuidade, que descreve desde uma superfície quase plana até uma superfície muito rugosa com valores de 0 a 20 respectivamente.

O parâmetro *JRC* foi proposto por Barton & Choubey (1977), depois que os autores realizaram 136 ensaios de cisalhamentos e retro-analisaram cada ensaio obtendo valores do *JRC* de cada amostra. Os resultados foram agrupadas nas series 0-2, 2-4,..., até 18 – 20. Destas foram selecionados os perfis mais típicos de cada grupo, os quais são reproduzidos na Figura 15.

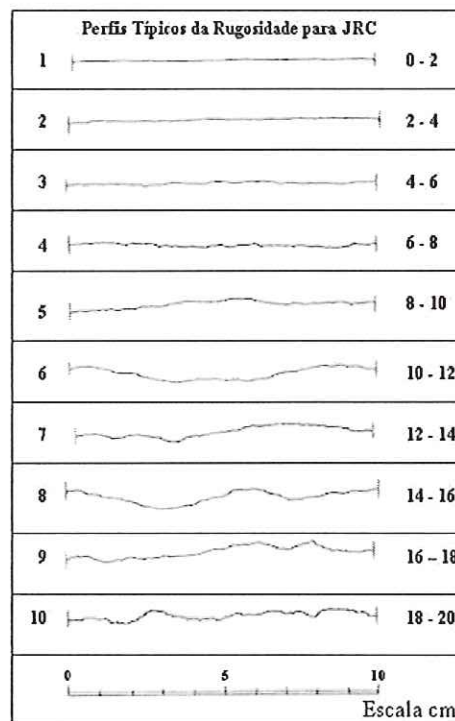


Figura 15. Perfis Típicos propostos por Barton & Choubey (1977).

### 2.2.3.2. ENSAIO DE INCLINAÇÃO (*TILT TEST*)

O ensaio de inclinação consiste em inclinar amostras do campo separadas por uma descontinuidade. A tensão normal no ensaio tem sua origem no peso do bloco superior (usada preferentemente para superfícies não muito rugosas que poderiam ter valores de *JRC* menores que 8).

Os blocos são inclinados lentamente (ângulo  $\alpha$ ), até quando ocorra o deslizamento no plano da junta. Os valores individuais de  $JRC$  podem ser retro-analisados a partir de cada ensaio, usando a Equação 10, cuja origem está relacionada com a equação de Resistência a Cisalhamento da junta:

$$JRC = \frac{\alpha^0 - \phi_r}{\log_{10} \left( \frac{JCS}{\sigma_{no}} \right)} \quad (10)$$

onde

$\alpha$  = ângulo de inclinação

$\sigma_{no}$  = tensão normal quando ocorre deslizamento

$JCS$  = resistência à compressão das paredes da descontinuidade

$\phi_r$  = ângulo residual de atrito

Uma ilustração deste ensaio simples é apresentada na Figura 16.

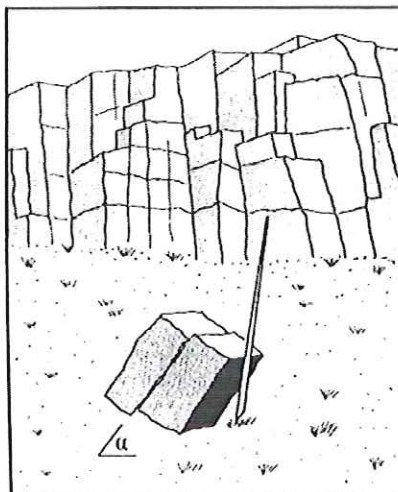


Figura 16. Representação esquemática do ensaio de inclinação (Bandis et al., 1981).

#### 2.2.3.3. ENSAIO DE PUXAR BLOCOS (*PULL TEST*)

O ensaio é aplicado no campo (para juntas com  $JRC$  entre 8 e 12, preferencialmente). Consiste em puxar o bloco que está acima da descontinuidade, como é mostrado na Figura 17.

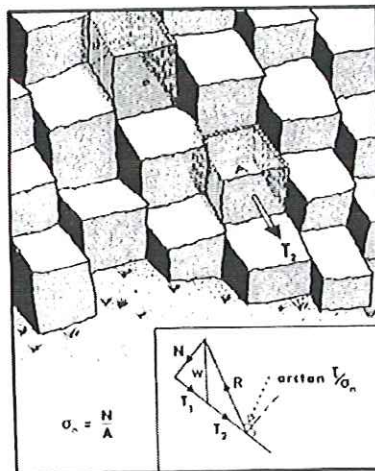


Figura 17. Ensaio de puxar blocos (Bandis et al., 1981).

O valor de  $JRC$  é obtido a partir da seguinte equação, a qual também tem sua origem na equação de Resistência a Cisalhamento da descontinuidade:

$$JRC = \frac{\tan^{-1}\left(\frac{T_1 + T_2}{N}\right) - \phi_b}{\log_{10}\left(\frac{JCS * A}{N}\right)} \quad (11)$$

onde

$T_1$  = componente tangencial do próprio peso do bloco sobreposto.

$T_2$  = força externa.

$N$  = componente normal do peso do bloco

$A$  = área da junta

$JCS$  = resistência à compressão das paredes da descontinuidade

$\phi_b$  = ângulo básico de atrito

#### 2.2.3.4. VALOR DO $JRC$ A PARTIR DA EQUAÇÃO DE RESISTÊNCIA A CISALHAMENTO

Realizando retro-análises a partir da equação de Resistência a Cisalhamento da junta, pode-se obter o valor do  $JRC$ . O parâmetro  $JRC$  é calculado a partir da seguinte equação (Barton e Choubey, 1977).

$$JRC = \frac{\arctan(\tau/\sigma_n) - \phi_b}{\log_{10}(JCS/\sigma_n)} \quad (12)$$

### 2.2.3.5. ANÁLISE DE Renger DA RUGOSIDADE

Renger (1976) apud Goodman (1989), propôs caracterizar a rugosidade através de uma série de ângulos que dependem do comprimento do intervalo usado. Na Figura 18 é observado um perfil de rugosidade que contém um plano médio ao perfil. O plano é dividido em intervalos de comprimentos constantes, os quais são projetados até atingir o perfil de rugosidade. Ao projetar os intervalos obtêm-se valores de ângulos, tanto positivos como negativos. O comprimento do intervalo é variado e o procedimento repetido, e novos valores de ângulos são obtidos. Os valores dos ângulos são colocados numa figura contra os seus correspondentes valores do comprimento do intervalo, como é mostrado na segunda parte da Figura 18. Nesta obtêm-se duas envoltórias, uma positiva e superior e outra negativa e inferior. A superior representa a influência da rugosidade em um ensaio de cisalhamento direto com direção da esquerda para a direita, e a inferior a influência da rugosidade em um ensaio de cisalhamento direto com direção da direita para a esquerda.

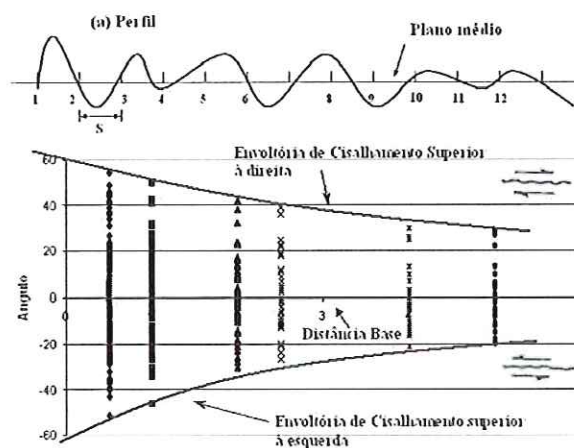


Figura 18. Análise de Renger da rugosidade.

### 2.2.3.6. PARÂMETROS ESTATÍSTICOS

Na literatura, tem-se uma grande variedade de parâmetros estatísticos que são utilizados para quantificar a rugosidade de uma descontinuidade a partir de perfis de

rugosidade. A seguir, apresentam-se alguns desses parâmetros. O *RMS* (*root mean square*) (Krahn & Morgenstern, 1979), o  $Z_2$  apresentado por Tse & Cruden (1979),  $Z_3$  apresentado por Myers (Maerz et al, 1990), a Função Estrutura (*SF*) (Tse & Cruden, 1979), o *CLA* (*centre-line-average*) (Krahn & Morgenstern, 1979), são mostrados a seguir:

$$RMS = \frac{1}{n_w} \sum_{i=1}^{n_w} \sqrt{\frac{1}{m_i - 2} \sum_{j \in w_i} (z_j - \bar{z})^2} \quad (13)$$

onde:  $n_w$  = número total de janelas de comprimento  $w$

$m_i$  = número de pontos

$z_j$  = altura das asperezas

$\bar{z}$  = média das alturas das asperezas

$$Z_2 = \left[ \frac{1}{MDx^2} \sum_{i=1}^M (y_{i+1} - y_i)^2 \right]^{1/2} \quad (14)$$

onde:  $M$  = números de intervalos

$Dx$  = comprimento do intervalo

$y_{i+1}$ ,  $y_i$  = alturas das asperezas

$$Z_3 = \left[ \frac{1}{n(dx_i - dx_{i-1})^2} \sum_{i=1}^n (dy_i - dy_{i-1})^2 \right]^{1/2} \quad (15)$$

onde:  $n$  = número de pontos com comprimento constante

$dx_i$ ,  $dx_{i-1}$  = comprimentos do intervalos

$dy_i$ ,  $dy_{i-1}$  = alturas das asperezas

$$SF = \int_{x=0}^{x=L} (f(x) - f(x + Dx))^2 \quad (16)$$

onde:  $f(x)$  = amplitude da altitude da aspereza

$L$  = distância

$Dx$  = constante de distância

$$CLA = \frac{1}{L} \int_{x=0}^{x=L} |y| dx \quad (17)$$

onde:  $L$  = distância



$y$  = amplitude da rugosidade

$dx$  = pequena distância entre duas amplitudes próximas

#### 2.2.3.7. VARIOGRAMA

Análises geoestatísticas da topografia da superfície descrevem a superfície rugosa e a correlação espacial da elevação. (Piggott & Elworth, 1995; Huang, Oelfke & Speck, 1992).

Calcula-se a função variograma usando a seguinte equação:

$$\tau(r) = \frac{1}{2(N)} \sum_{i=1}^{N-1} (y_i - y_{i+r})^2 \quad (18)$$

onde

$\tau(r)$  = variograma

$y_i$  = variável inicial

$y_{i+r}$  = variável a uma distância  $r$

$r$  = distância entre as duas variáveis

$N$  = número total de dados de pontos

O variograma é a ferramenta básica, que permite descrever quantitativamente a variação espacial da elevação do perfil de rugosidade mediante as variáveis obtidas a diferentes distâncias  $r$ .

#### 2.2.3.8. ESTIMATIVA DE *JRC* USANDO A TEORIA FRACTAL

Vários pesquisadores têm trabalhado com a Teoria Fractal anteriormente, para quantificar a rugosidade de discontinuidades. Apresentam-se alguns resultados obtidos pelos pesquisadores. Também é mostrado o método utilizado por eles, e a equação que representa a correlação entre o parâmetro *JRC* e a Dimensão Fractal ( $D$ ).

Carr e Warriner (1987), Método do Divisor:

$$JRC = -1022.55 + 1023.92D$$

Lee et al. (1990), Método do Divisor:

$$JRC = -0.878 + 37.7844\left(\frac{D-1}{0.015}\right) - 16.9304\left(\frac{D-1}{0.015}\right)^2$$

Wakabayashi & Fukushige (1995), Método do Divisor:

$$JRC = \left[ \frac{D-1}{0.00004413} \right]^{1/2}$$

#### 2.2.4. EFEITO ESCALA DA RUGOSIDADE

Usualmente, a quantificação da rugosidade é feita a partir de perfis de rugosidade que foram propostos por Barton e Choubey (1977) e adotados pela *ISRM*. A rugosidade é uma fonte de efeito escala na resistência a cisalhamento. Barton & Bandis (1982), propuseram uma correção do efeito escala com base na rugosidade, trabalhando na escala de laboratório e na escala de amostras *in situ*.

A rugosidade da descontinuidade é uma fonte de fenômenos ligados ao efeito escala na resistência a cisalhamento. Resultados indicam que quanto menor o comprimento da amostra, maior o valor do coeficiente de rugosidade *JRC* e vice-versa.

Conhecer o valor da rugosidade da descontinuidade em diferentes escalas ajuda a prever o comportamento desta aos diferentes requerimentos geomecânicos, como, por exemplo, a resistência a cisalhamento.

##### 2.2.4.1. O EFEITO ESCALA DA RUGOSIDADE E APLICAÇÃO DA TEORIA FRACTAL

As descontinuidades existem dentro dos maciços rochosos, governando, freqüentemente, a resistência mecânica do maciço rochoso. Elas também influem na deformabilidade do maciço rochoso, estabilidade de escavação, fluxo, entre outros (Ghost & Daemen, 1992).

A dependência do comportamento mecânico e hidráulico das descontinuidades com a escala foi investigada por Barton et al. (1985) e Bandis et al. (1981). Para um

gado deslocamento horizontal, incrementando o tamanho da amostra resulta em um incremento da área de contato da amostra e um decréscimo na dilatância. O  $JRC$  medido com o ensaio de inclinação ou ensaio de cisalhamento direto apresenta um decréscimo do valor, com aumento do tamanho da amostra. É notado que o efeito é mais marcante para rugosidade com altos valores de  $JRC$  (Odling, 1994).

Barton & Choubey (1977) e Bandis et al. (1981), concluem que a resistência a cisalhamento, e o valor de  $JRC$  como a resistência à compressão simples diminuem significativamente quando o tamanho da amostra é incrementado. O mesmo acontece com a dilatância da amostra durante o ensaio de cisalhamento.

Barton & Choubey (1977), Yang & Chen (1999) confirmaram que a rugosidade de uma descontinuidade é um potencial originário do efeito escala. A resistência a cisalhamento da descontinuidade é essencialmente dominada pela rugosidade da descontinuidade, aos níveis de baixas tensões normais. O efeito escala na resistência a cisalhamento deveria ser máximo para juntas com alto  $JRC$  e mínimo para juntas com baixo  $JRC$ . Barton & Bandis (1982), sugerem a seguinte equação empírica para determinar o  $JRC$  desejado.

$$JRC_n = JRC_0 \times \left( \frac{L_n}{L_0} \right)^{-0,02JRC_0} \quad (19)$$

Sendo  $JRC_0$  e  $L_0$  valores à escala de laboratório

$JRC_n$  e  $L_n$  os valores na escala  $n$ .

Vários pesquisadores trabalharam com o conceito de efeito escala da rugosidade de maneiras diferentes, aplicando a Teoria Fractal. Yang & Chen (1999), usaram o conceito de transformações auto-afins nos perfis de rugosidade. Esta transformação consiste em ampliar o perfil com fatores diferentes; na direção  $x$  o fator é de  $r$  e na direção  $y$  o fator é de  $r^\beta$ , onde  $\beta$  é o coeficiente angular da reta na determinação da Dimensão Fractal. O objetivo dos pesquisadores foi não mudar o valor do  $JRC$  em diferentes escalas, e poder observar o comportamento das amostras de diferentes escalas na resistência a cisalhamento e dilatância. O resultado foi que a dilatância das amostras durante o cisalhamento foi igual em diferentes escalas e a resistência a cisalhamento foi maior quanto menor a escala da amostra. Xie et al. (1997), afirmam que a Dimensão

Fractal diminui quando o comprimento do perfil também diminui, mas o parâmetro de Intersecção diminui quando o comprimento do perfil aumenta. Fardin et al. (2001), afirmam que a Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção diminuem quando se incrementa o comprimento do perfil de rugosidade.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

---

O desenvolvimento desta pesquisa consta de quatro partes, mencionadas a seguir: a Revisão Bibliográfica mostrada no capítulo 2, a aplicação da Teoria Fractal na determinação da rugosidade, as análises e resultados e finalmente as conclusões.

Na primeira etapa foi realizado um levantamento bibliográfico sobre estudos prévios desenvolvidos e de outras bibliografias atuais sobre o tema, como: o conceito da Teoria Fractal, os diferentes métodos para determinar a Dimensão Fractal e como estes são aplicados na determinação e quantificação do perfil da rugosidade. Também se investigaram os conceitos e importância da resistência a cisalhamento, o valor de *JRC* e os parâmetros geomecânicos que compõem a equação de resistência a cisalhamento. Deste levantamento bibliográfico se obtiveram os perfis de rugosidade a serem utilizados nas análises desta pesquisa, como também os métodos a serem utilizados neste estudo.

Já na segunda etapa aplicaram-se os métodos para determinar a Dimensão Fractal dos perfis de rugosidade escolhidos. Para isso os perfis foram escaneados e posteriormente se usou o AutoCAD®Release 14 para a digitalização destes. Este programa mostrou-se como uma ferramenta útil ao manuseio e manipulação dos perfis. Além do mencionado os perfis foram divididos em partes iguais com o objetivo de obter intervalos de comprimentos constantes, e com estes poder aplicar os métodos para a determinação da Dimensão Fractal.

Finalmente se obtiveram as conclusões e recomendações baseadas nos resultados, análises e interpretações deste trabalho.

Neste capítulo apresentam-se os materiais utilizados para realizar a pesquisa, os perfis de rugosidades utilizados nas análises e os programas computacionais para analisar a base de dados obtidos a partir dos perfis de rugosidades procurados.

Para uma melhor apresentação, este capítulo é dividido em três partes, sendo a primeira a tratar dos perfis de rugosidade de escala de 10 cm, a segunda parte dos perfis

utilizados no efeito escala da rugosidade e a última parte trata dos programas usados nas análises e interpretações realizadas.

### 3.1. PERFIS DE RUGOSIDADE ESCALA 10 cm

Os perfis de rugosidades utilizados nestes estudos são mostradas nas Figuras 21 a 24, divididos em dois grupos, os quais serão apresentadas a seguir.

O primeiro grupo é formado pelos perfis propostos por Barton e Choubey (1977), utilizados na determinação do valor de  $JRC$ . Os perfis são usados para identificar se a aplicação dos métodos está adequada. Para isso, compararam-se os valores obtidos com valores da literatura ou com o comportamento dos valores obtidos a partir de cada método aplicado em cada perfil. Estes perfis são apresentados na Figura 21.

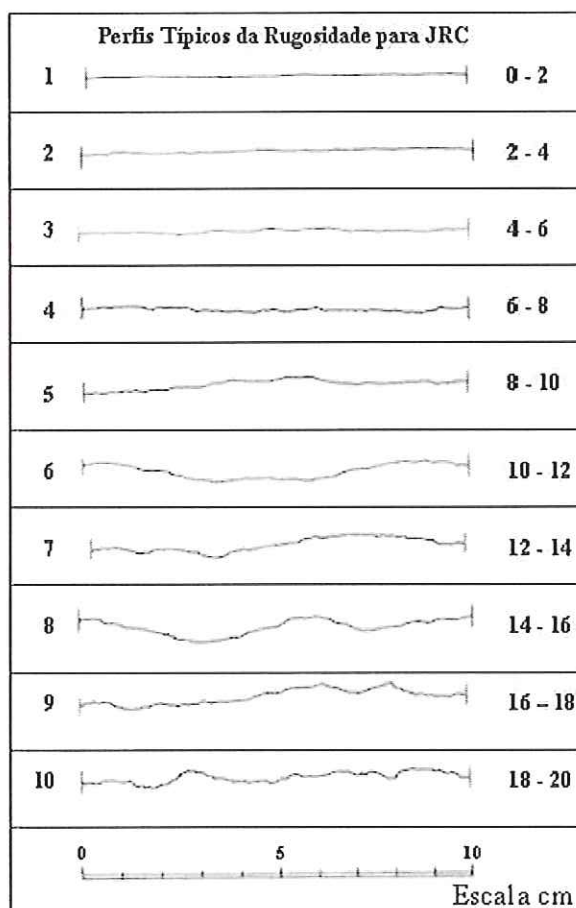


Figura 21. Perfis de comparação visual propostos por Barton & Choubey (1977)

O segundo grupo é formado pelos perfis que serão usados nas análises da determinação da Dimensão Fractal. Os valores da Dimensão Fractal serão correlacionados com os valores do *JRC* dos perfis do segundo grupo. Estes perfis foram encontrados na literatura, em relatos de Grasselli (2001), Bandis et al. (1983), Beer et al. (2002), Makurat et al. (1990) e Papaliangas et al. (1990). Os perfis são apresentados nas Figuras 22 a 24.

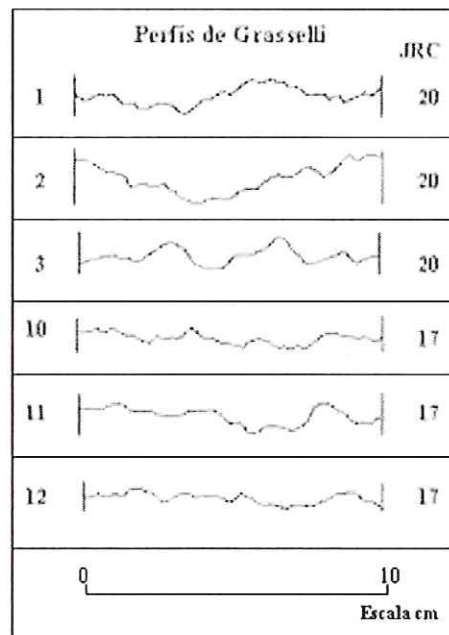


Figura 22. Perfis de Grasselli (2001) com seus valores do *JRC*.

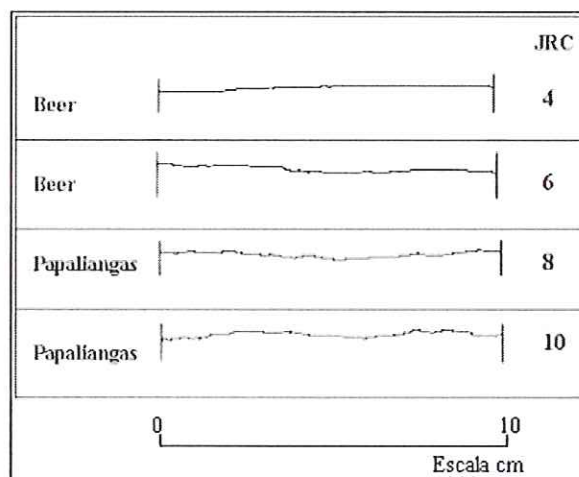


Figura 23. Perfis de Beer et al. (2002) e Papaliangas et al. (1990) com seus valores do *JRC*.


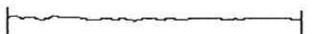




		JRC
Bandis		5,3
Bandis		6,8
Makurat		2,6
Makurat		4,3
Makurat		6,9
	 Escala cm	

Figura 24. Perfis de Bandis et al. (1983) e Makurat et al. (1990) com seus valores do *JRC*.

Os comprimentos dos perfis de rugosidade de Barton & Choubey (1977), Grasselli (2001), Beer et al. (2002) e Papaliangas et al. (1990) são de 10 cm, mas os perfis de Bandis et al. (1983) e Makurat et al. (1990) têm comprimentos maiores. Para analisar os perfis em uma mesma escala, foi usada a equação de efeito escala de rugosidade, proposta por Barton (1982), nos perfis de Bandis (1983) e Makurat (1990). A Equação 19 já apresentada antes é repetida a seguir:

$$JRC_n = JRC_0 \left[ \frac{L_n}{L_0} \right]^{-0,02JRC_0} \quad (26)$$

onde:  $JRC_n$  = valor da rugosidade na escala  $n$

$JRC_0$  = valor da rugosidade à escala laboratorial

$L_n$  = comprimento da amostra na escala  $n$

$L_0$  = comprimento à escala laboratorial

Para a escolha dos perfis considerou-se a facilidade para obter os perfis de rugosidade e a qualidade da impressão destes na literatura.

Para determinar a Dimensão Fractal dos perfis tanto do primeiro, quanto do segundo grupo, utilizaram-se os métodos: Método Modificado do Divisor, Método das



Caixas e Método do Ângulo. De acordo com os conceitos dos métodos mencionados, é preciso utilizar uma linha de referência horizontal de 100 mm de comprimento, para utilizar cada método. Esta linha é dividida em 200, 100, 50, 40 25 e 20 partes iguais, dando intervalos com comprimentos de 0,5 mm, 1 mm, 2 mm, 2,5 mm, 4mm e 5 mm respectivamente. Cada um dos intervalos é denominado de ponto 1, ponto 2 até ponto 6, respectivamente.

### 3.2. EFEITO ESCALA NA RUGOSIDADE

Aqui são mostrados os perfis utilizados nos estudos do comportamento da Dimensão Fractal com respeito ao efeito escala dos perfis de rugosidades. Este comportamento é devido principalmente à mudança do comprimento do perfil de rugosidade. Os perfis usados são apresentados na Figura 25, apresentados por Grasselli (2001), Papaliangas et al. (1990) e Makurat et al. (1990).

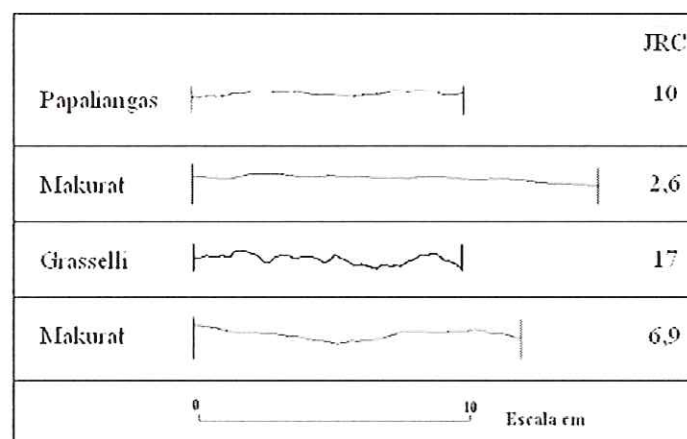


Figura 25. Perfis de Grasselli (2001), Papaliangas et al. (1990) e Makurat et al. (1990) com seus valores do *JRC*.

O perfil de Grasselli tem 10 cm de comprimento, o perfil de Papaliangas 10 cm, já os perfis de Makurat variam de comprimento, tendo o perfil com *JRC* 2,6 um comprimento de 15 cm e o perfil com *JRC* 6,9 um comprimento de 11,72 cm. Para realizar este estudo do comportamento da Dimensão Fractal com respeito ao efeito escala é que se vai dividir os perfis em comprimentos de 2,5; 5; 7,5; 10 cm como também serão considerados os comprimentos dos perfis maiores que 10 cm.

Para determinar a Dimensão Fractal dos novos perfis antes mencionados, é necessário definir os intervalos a serem empregados para cada diferente comprimento

de perfil. A seguir são mostrados os intervalos utilizados para os diferentes comprimentos de perfis:

Comprimento do perfil 15 cm: intervalos 0,75; 1,5; 3; 3,75 mm

Comprimento do perfil 11,72 cm: intervalos 0,58; 1,17; 2,34; 2,93 mm

Comprimento dos perfis 10 cm: intervalos 0,5; 1; 2; 2,5 mm

Comprimento dos perfis 7,5 cm: intervalos 0,37; 0,75; 1,5; 1,87 mm

Comprimento dos perfis 5 cm: intervalos 0,5; 1; 1,25; 2 mm

Comprimento dos perfis 2,5 cm: intervalos 0,25; 0,5; 0,62; 1 mm

Estes intervalos serão usados conforme o caso para obter o valor da Dimensão Fractal. Como mencionado anteriormente, o AutoCAD®Release 14 será utilizado para a determinação da Dimensão Fractal.

Além dos perfis mostrados na Figura 25, serão usados outros perfis para determinar a correlação entre a Dimensão Fractal e o valor do *JRC*. Esta correlação será utilizada para o efeito escala da rugosidade. Na Figura 26 como na Figura 27 são mostrados os perfis utilizados para determinar a correlação. Na Figura 26 são mostrados os perfis encontrados no relato da *ISRM* (1978), e na Figura 27 são mostrados os perfis propostos por Bandis et al. (1981).

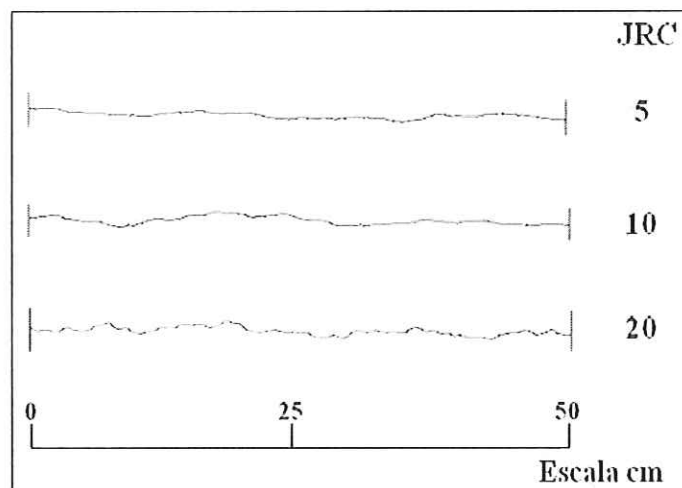


Figura 26. Perfis da *ISRM* (1978) com seus valores do *JRC*.

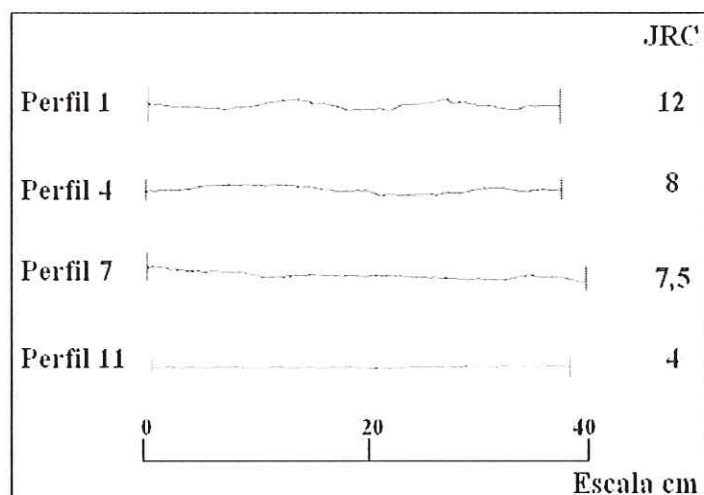


Figura 27. Perfis de Bandis et al. (1981) com seus valores do *JRC*.

Os perfis da Figura 26 têm um comprimento de 50 cm, e para determinar os valores da Dimensão Fractal para cada perfil se empregará os seguintes intervalos: 2,5 mm, 5 mm, 10 mm e 12,5 mm.

Na Figura 27 os perfis 1, 4 e 11 têm um comprimento de 36 cm, e o perfil 7 um comprimento de 40 cm. Além de obter a Dimensão Fractal dos perfis da Figura 27, estes também foram divididos em comprimentos diferentes. Os perfis de comprimento de 36 cm foram divididos em perfis de 18, 12 e 6 cm, e o perfil de 40 cm foi dividido em 20, 10 e 5 cm. Cada porção de perfil apresenta seu valor de *JRC* obtido a partir de vários ensaios realizados por Bandis et al. (1981); cada valor de *JRC* é uma media representativa dos ensaios executados.

Para determinar os valores da Dimensão Fractal de cada porção de perfil foram usados os seguintes intervalos.

- Comprimento do perfil 40 cm: intervalos 2; 4; 8; 10 mm
- Comprimento do perfil 36 cm: intervalos 1,8; 3,6; 7,2; 9 mm
- Comprimento do perfil 20 cm: intervalos 1; 2; 4; 5 mm
- Comprimento do perfil 18 cm: intervalos 0,9; 1,8; 3,6; 4,5 mm
- Comprimento do perfil 12 cm: intervalos 0,6; 1,2; 2,4; 3 mm
- Comprimento do perfil 10 cm: intervalos 0,5; 1; 2; 2,5 mm
- Comprimento do perfil 6 cm: intervalos 0,3; 0,6; 1,2; 1,5 mm
- Comprimento do perfil 5 cm: intervalos 0,25; 0,5; 1; 1,25 mm

Como mencionado anteriormente, cada perfil será digitalizado no AutoCAD®Release 14 e posteriormente os dados obtidos serão colocados no Microsoft®Excel 2000.

### 3.3. PROGRAMAS COMPUTACIONAIS UTILIZADOS

Os perfis de rugosidade encontrados e escolhidos foram guardados em formato gráfico e, posteriormente, digitalizados no AutoCAD®Release 14. A digitalização dos perfis se realizou, primeiramente, colando as imagens dos perfis com formato gráfico no AutoCAD®Release 14. Estas imagens foram ampliadas, com o comando *polyline* de AutoCAD®Release 14 se digitalizaram todos os perfis utilizados neste trabalho. Cada método utilizado teve sua forma de ser aplicado no AutoCAD®Release 14, para obter os valores na determinação da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção.

Para aplicar o Método Modificado do Divisor no AutoCAD®Release 14, realizaram-se os procedimentos mencionados nas seções 3.1 e 3.2, conforme o caso. Utilizou-se o comando *distance*, que permitiu determinar os comprimentos dos perfis dos diferentes pontos. Primeiro se determinará o comprimento da primeira intersecção, depois da segunda, e assim por diante até a última intersecção. Este procedimento é repetido com os outros pontos. Estes dados são analisados no Microsoft®Excel 2000.

Para o Método das Caixas, primeiro realizaram-se os procedimentos já mencionados nas seções 3.1 e 3.2, depois segundo o ponto a utilizar, cobrir o perfil com uma rede de caixa com um comprimento de lado segundo o ponto usado. Este procedimento é realizado no AutoCAD®Release 14 e repetido variando de comprimento do intervalo. Posteriormente são contadas as caixas que cobrem o perfil, e os dados serão analisados no Microsoft®Excel 2000.

Para o Método do Ângulo, o procedimento é igual ao Método Modificado do Divisor, a diferença é o comando utilizado. Para este método é *angular*, que determina o ângulo formado pela primeira e segunda intersecção, como foi exemplificado na Figura 11. Este procedimento é repetido com os outros comprimentos dos pontos. Os valores obtidos serão analisados no Microsoft®Excel 2000.

A utilização do software Microsoft®Excel 2000 foi essencialmente para analisar os dados obtidos dos métodos mencionados, como determinar a Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção de cada método e as interpretações realizadas neste trabalho. Para analisar os dados de cada método foi necessário criar planilhas específicas.

No caso do Método Modificado do Divisor, criou-se uma planilha, onde na coluna (B2, B3,.....) se colocaram os dados dos comprimentos das intersecções de primeiro ponto, na célula (C3) usou-se o comando *somatória* para determinar a soma dos comprimentos das intersecções e assim determinar o comprimento do perfil. Na coluna (D2, D3,.....) se colocaram os dados do segundo ponto, na célula (E2) a somatória, e assim por diante com os outros pontos. Na mesma planilha é criada uma tabela com os valores do logaritmo do comprimento do perfil e o logaritmo do comprimento do intervalo. Estes valores são colocados numa figura bilogarítmica, e desta figura foram determinados a Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção. Este procedimento é repetido para cada perfil estudado.

Para o caso do Método das Caixas, também é criada uma planilha especial, muito mais simples. É necessário criar uma tabela onde se colocam os valores das quantidades de caixas que cobrem o perfil e também se coloca o comprimento de cada intervalo utilizado, e é determinado o logaritmo de cada valor. Estes valores são colocados numa figura bilogarítmica, e depois determina-se a Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção. O procedimento é repetido para cada perfil estudado.

No Método do Ângulo, foi implementado em outra planilha. Na coluna (B2, B3,.....) são colocados os valores dos ângulos achados no primeiro ponto, na coluna (C2, C3,.....) são determinados os valores absolutos de cada ângulo usando o comando *ABS( )*, na célula D2 é determinado o valor médio dos ângulos usando para isso o comando *somatória* e dividindo este valor pelo número de dados achados. Na coluna (F2, F3,.....) são colocados os valores dos ângulos do segundo ponto, na coluna (G2, G3,....) são determinados os valores absolutos dos ângulos e na célula H2 determinado o valor médio dos ângulo. Depois como mencionado nos outros métodos se determina o logaritmo do valor médio dos ângulos e logaritmo do comprimento do intervalo, para achar a Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção. O procedimento é repetido para cada perfil estudado.

O software Statistica®5.5 foi utilizado no final das análises para realizar correlações tridimensionais entre os valores de *JRC*, Dimensão Fractal e Peso Fractal. Produtos destas correlações são equações para determinar o *JRC*.

#### **4. APLICAÇÃO DA TEORIA FRACTAL À QUANTIFICAÇÃO DA RUGOSIDADE E EFEITO ESCALA DA RUGOSIDADE**

---

Neste capítulo serão mostrados os resultados e análises obtidas a partir da aplicação da Teoria Fractal aos diferentes itens desenvolvidos anteriormente sobre a rugosidade de uma descontinuidade.

O capítulo é dividido em duas partes:

A primeira parte trata das análises realizadas na quantificação da rugosidade da descontinuidade utilizando a Teoria Fractal. Foram usados o Método Modificado do Divisor, o Método das Caixas e o Método do Ângulo para determinar a Dimensão Fractal e confirmar a importância do parâmetro de Intersecção que outros pesquisadores já tinham observado. Aqui se realizará a comparação dos métodos mencionados afim de determinar qual método é o mais adequado para determinar ambos parâmetros, assim como a avaliação entre a Dimensão Fractal e o parâmetro de Intersecção. Também se analisará qual deles quantifica melhor a rugosidade a partir do valor do *JRC*, através da correlação entre o valor do *JRC* e ambos os parâmetros. Como consequência deste trabalho se obteve um novo parâmetro denominado de Peso Fractal, o qual poderá ser utilizado na quantificação da rugosidade.

Na segunda parte do capítulo se observará o comportamento da Dimensão Fractal e do parâmetro de Intersecção em perfis de diferentes comprimentos. Tanto a Dimensão Fractal como o parâmetro de Intersecção serão obtidos usando o Método Modificado do Divisor. O Peso Fractal será analisado, principalmente para saber se este parâmetro é um elemento independente do efeito escala dos perfis de rugosidade.

#### 4.1. DETERMINAÇÃO DO PARÂMETRO $JRC$ UTILIZANDO A TEORIA FRACTAL

Para determinar a Dimensão Fractal dos perfis de rugosidades a serem estudados, utilizaram-se os métodos apresentados no capítulo II, ou seja: Método Modificado do Divisor ( $DF_M$ ), Método das Caixas ( $DF_C$ ) e Método do Ângulo ( $DF_A$ ). Além da Dimensão Fractal, também se determinou o parâmetro de Intersecção denotado como  $A_M$  para o Método Modificado do Divisor,  $A_C$  para o Método das Caixas e  $A_A$  para o Método de Ângulo.

#### 4.2. RESULTADOS E ANÁLISES DA UTILIZAÇÃO DA TEORIA FRACTAL NA QUANTIFICAÇÃO DA RUGOSIDADE

Apresentam-se os resultados e as análises dos métodos aplicados em ambos os grupos de perfis da rugosidade. Além de se obter a Dimensão Fractal ( $DF$ ) dos perfis de rugosidade, também se obteve o parâmetro de Intersecção ( $A$ ).

Serão mostrados os resultados de cada método aplicado nos perfis e, depois, será determinado qual método representa melhor a rugosidade e qual parâmetro quantifica melhor o perfil da rugosidade.

##### 4.2.1. MÉTODO MODIFICADO DO DIVISOR

O Método Modificado do Divisor foi aplicado aos perfis apresentados por Barton & Choubey (1977). Na Figura 28, onde são apresentados os resultados e o comportamento dos 10 perfis padrão, observa-se o comportamento diferenciado de cada perfil. O perfil 1 tem um comportamento quase horizontal, porque não é um perfil muito rugoso. Analisando o perfil 5, percebe-se que a inclinação da reta é maior e também que o valor da intersecção desta reta com o eixo das ordenadas é maior. O perfil é muito mais rugoso que o perfil 1.

Na Figura 28, cada reta representa um perfil e está determinada pelos seis pontos ( $r$ ). Primeiro será analisado o comportamento de cada ponto, para, depois, determinar-se o número de pontos a serem utilizados nas análises do segundo grupo de perfis de rugosidade.

O comportamento do primeiro (0,5mm), segundo (1 mm), terceiro (2 mm) e quarto pontos (2,5 mm) dos perfis da Figura 28 está de acordo com o esperado e com a literatura, ou seja, o comprimento do perfil diminui quando aumenta o

comprimento do intervalo utilizado para medir. Nos pontos 5 e 6, o comportamento é instável, sem o padrão de comportamento dos pontos anteriores. As análises realizadas sugerem que se utilizem nas determinações da Dimensão Fractal do segundo grupo de perfis os primeiros quatro pontos, por apresentarem um comportamento estável.

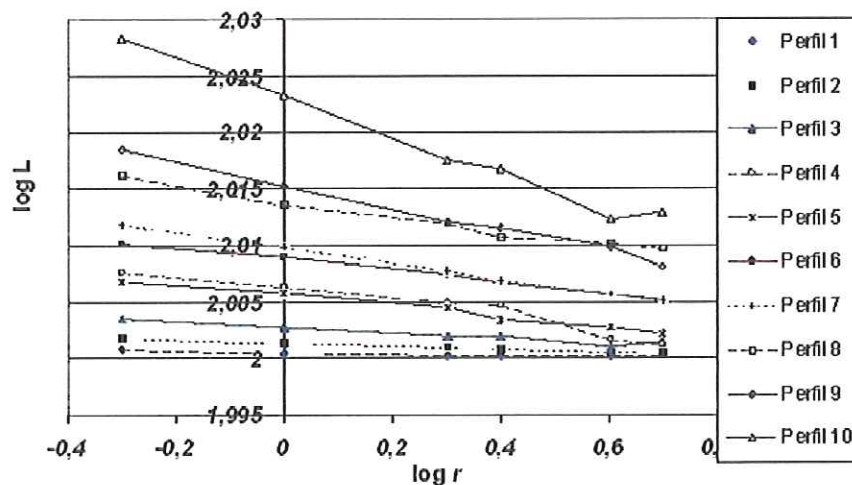


Figura 28. Comportamento dos 10 perfis de Barton & Choubey (1977) com o Método Modificado do Divisor.

Os quatro pontos também são usados para determinar a Dimensão Fractal dos perfis padrões de Barton & Choubey (1977). Os resultados obtidos são comparados com os de outros pesquisadores; estas comparações são apresentadas na Figura 29, como também na Tabela 2.

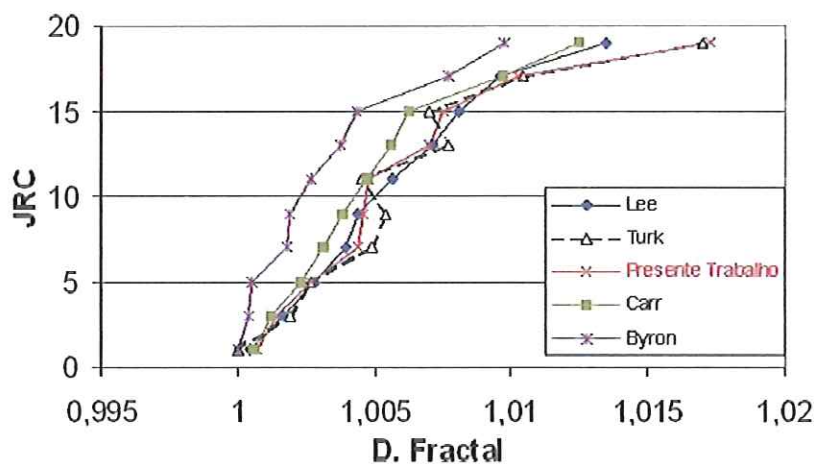


Figura 29. Comparação dos resultados obtidos com os de outros pesquisadores.



Tabela 2. Valores da Dimensão Fractal para os perfis típicos de Barton &amp; Choubey (1977).

Autor M. utilizado	Lee. 1990 Método do Divisor	Carr 1990 Método do Divisor	Turk. 1987 Método do Divisor	Byron 1996 Método do Divisor	Presente Trabalho Método Mod.Divisor
JRC	D. Fractal	D. Fractal	D. Fractal	D. Fractal	D. Fractal
0-2	1,000446	1,0006	1	1	1,0007
2-4	1,001687	1,0012	1,0019	1,00042	1,0014
4-6	1,002805	1,00229	1,0027	1,00054	1,0027
6-8	1,003974	1,00312	1,0049	1,00178	1,0044
8-10	1,004413	1,00382	1,0054	1,00191	1,0046
10-12	1,005641	1,00469	1,0045	1,00269	1,0048
12-14	1,007109	1,0056	1,0077	1,00377	1,007
14-16	1,008055	1,0062	1,007	1,00431	1,0075
16-18	1,009584	1,00965	1,0104	1,0077	1,0102
18-20	1,013435	1,01245	1,017	1,00974	1,0173

Na Figura 29, assim como na Tabela 2, apresentam-se os valores da Dimensão Fractal obtidos por Lee et al. (1990), Carr (1989), Turk et al. (1987) e Byron (1996), que são comparados com os valores obtidos neste trabalho. Observa-se que os valores do presente trabalho são semelhantes aos valores obtidos por outros pesquisadores, significando que a aplicação do método e a maneira como foram digitalizados os perfis foram adequadas.

Nos valores da Dimensão Fractal dos outros pesquisadores, observa-se que Turk et al. (1987) e Byron (1996) obtêm o valor de 1 da Dimensão Fractal para o perfil 1, com valor de *JRC* entre 0 e 2. Este valor não é coerente com a Teoria Fractal, pois um objeto que tem valor 1 de Dimensão Fractal é plano e liso e não apresenta irregulares em pequena escala.

A seguir serão analisados os perfis de Grasselli (2001), Bandis et al. (1983), Beer et al. (2002), Makurat et al. (1990) e Papaliangas et al. (1990). Será aplicado o Método Modificado do Divisor para obter a Dimensão Fractal,  $DF_M$ . Durante as análises dos perfis, observa-se o parâmetro de Intersecção,  $A_M$ , em todos os perfis estudados. Uma observação válida é que quanto mais rugoso o perfil, maior o valor do parâmetro de Intersecção. Este parâmetro deve ser explorado na caracterização da rugosidade, apesar de não ter sido considerado por muitos pesquisadores que trabalharam com a Dimensão Fractal.

Na Tabela 3, apresentam-se todos os valores do *JRC*, os valores da Dimensão Fractal e os valores do parâmetro de Intersecção dos perfis de rugosidades

estudados. Observa-se que os perfis de Bandis et al. (1983) têm o comportamento como esperado, ou seja, quanto menor o *JRC*, menores os valores da Dimensão Fractal e do parâmetro de Intersecção. Este comportamento também se observa nos perfis de Beer et al. (2002), Makurat et al. (1990) e Papaliangas et al. (1990). Entretanto, quando se comparam os valores da Dimensão Fractal e do parâmetro de Intersecção, entre os perfis com valores do *JRC* semelhantes, estes não são coerentes. As causas poderiam ser a maneira como foi realizado o ensaio de cisalhamento e a retróanálise para se obter o valor do *JRC* e como foi obtido o perfil da rugosidade, ou a inadequação de parâmetros fractais para correlação com a rugosidade de juntas.

O caso dos perfis de Grasselli (2001) é especial. Os valores de *JRC* são iguais, mas quando aplicado o método Modificado nos perfis, os valores obtidos de *DF* e *A* não são semelhantes, sendo em alguns casos totalmente diferentes. Esta diferença também pode ser devida à maneira como foram realizados o ensaio e a retroanálise e como foi obtido o perfil. Mas esses valores indicam que, por mais que se tenham valores de *JRC* iguais, os perfis de rugosidade não são iguais.

Na Figura 30, apresenta-se como obter a Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção. No Apêndice A se mostra como determinar estes parâmetros dos perfis típicos de Barton & Choubey (1977) como também dos perfis dos autores antes mencionados.

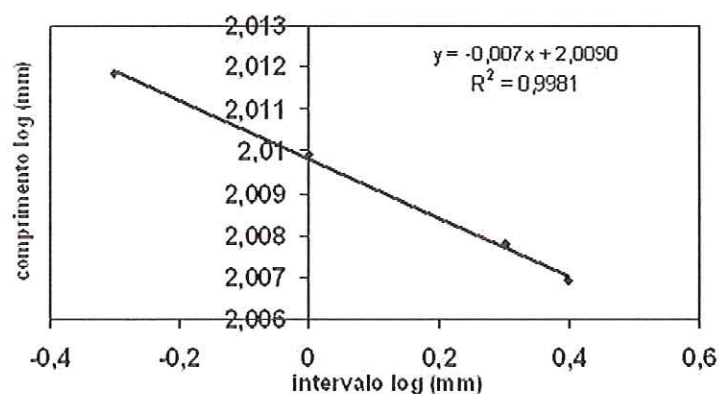
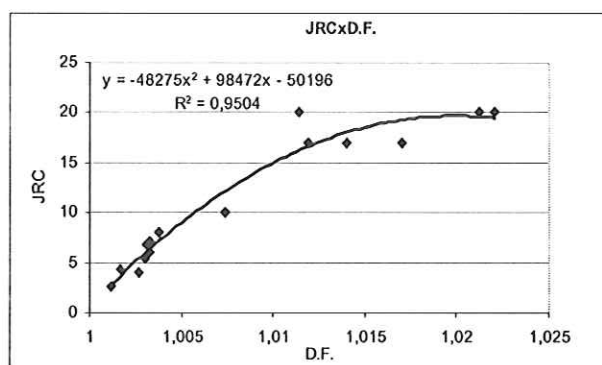
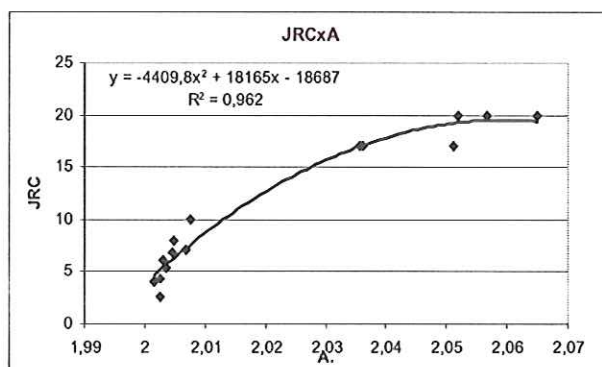


Figura 30. Obtenção da Dimensão Fractal e do parâmetro de Intersecção pelo Método Modificado do Divisor.

Tabela 3. Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção aplicando o M. M. Divisor.

Perfis	<i>JRC</i>	$DF_M$	$A_M$
Grasselli	20	1,0221	2,0519
	20	1,0212	2,0567
	20	1,0114	2,0651
	17	1,017	2,0357
	17	1,0119	2,0512
	17	1,014	2,0361
Bandis	5,37	1,003	2,0036
	6,85	1,0031	2,0046
Beer	4	1,0027	2,0015
	6	1,0033	2,0031
Makurat	2,65	1,0012	2,0026
	4,34	1,0017	2,0026
	7,05	1,0033	2,0069
Papaliangas	8	1,0038	2,0048
	10	1,0074	2,0076

Determinados a Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção de cada perfil de rugosidade buscou-se uma correlação dos valores obtidos com os valores de *JRC* de cada perfil, conforme mostrados nas Figuras 31 e 32.

Figura 31. Correlação entre *JRC* e Dimensão Fractal.Figura 32. Correlação entre *JRC* e parâmetro de Intersecção.

Na Figura 31 apresenta-se a curva de correlação entre  $JRC$  e a Dimensão Fractal, sendo o coeficiente de determinação de 0,95. Pode-se observar, que a maioria dos perfis apresentaram um comportamento definido. No entanto, os perfis de Grasselli (2001), com  $JRC$  20 e 17, e os de Papaliangas et al. (1990), com  $JRC$  10, estão afastados da curva de correlação. A seguir, apresenta-se a equação obtida da correlação entre  $JRC$  e a Dimensão Fractal:

$$JRC = -48275DF_M^2 + 98472DF_M - 50196 \quad (27)$$

Na Figura 32 apresenta-se a curva de correlação entre  $JRC$  e o parâmetro de Intersecção, sendo o coeficiente de determinação de 0,962. Os perfis de Grasselli (2001), com  $JRC$  17 e os de Papaliangas et al. (1990), com  $JRC$  10, também estão afastados da curva de correlação. Apresenta-se a seguir a equação obtida da correlação entre  $JRC$  e o parâmetro de Intersecção:

$$JRC = -4409,8A_M^2 + 18165A_M - 18687 \quad (28)$$

O erro médio encontrado foi de 12,3 %, quando comparados os valores de  $JRC$  da literatura com os determinados pela Equação 27 (Figura 33).

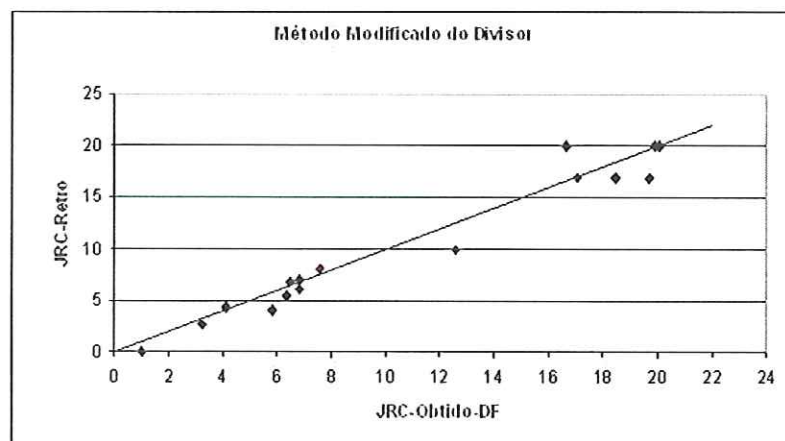


Figura 33. Comparação de  $JRC$  da literatura com  $JRC$  da Equação 27.

Quando comparados os valores de  $JRC$  da literatura com os determinados pela Equação 28 o erro médio é de 9,2% (Figura 34).

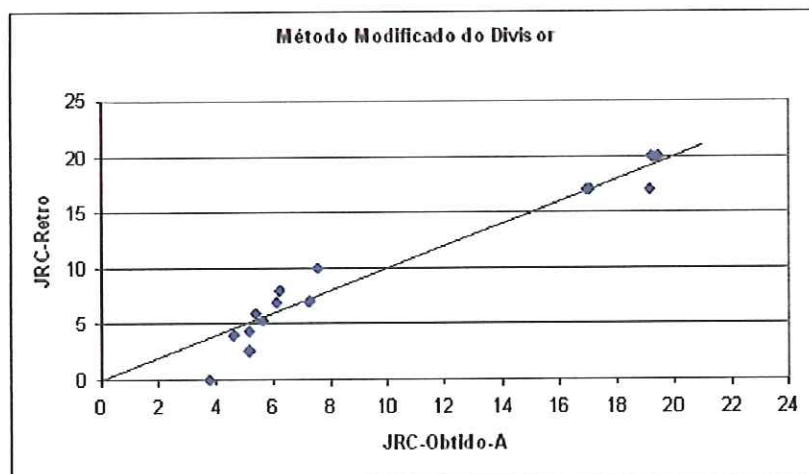


Figura 34. Comparação de  $JRC$  da literatura com  $JRC$  da Equação 28.

#### 4.2.2. MÉTODO DAS CAIXAS

O método das Caixas foi aplicado, primeiramente, aos perfis apresentados por Barton & Choubey (1977), cujos resultados podem ser vistos na Figura 35. Estes valores não foram comparados com valores de outros pesquisadores, porque, na literatura, não se encontrou valor da Dimensão Fractal, utilizando o Método das Caixas (*Box-counting method*).

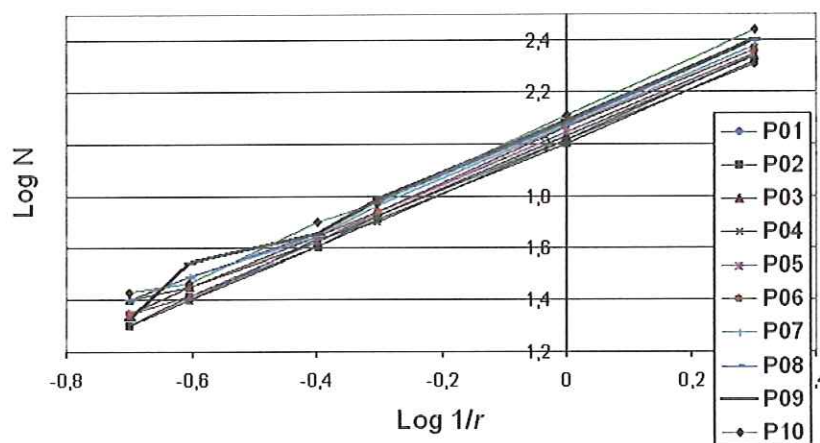


Figura 35. Comportamento dos perfis de Barton e Choubey (1977) com o Método das Caixas.

Na Figura 35, observa-se o comportamento dos dez perfis analisados com seis pontos. As inclinações das retas diferenciam-se pouco entre os perfis, o que

permite concluir que a Dimensão Fractal dos perfis esteja entre os valores de 1,003 e 1,0756 e o parâmetro de Intersecção entre 2,0136 e 2,1124. Isto significa que se deve aplicar o Método das Caixas com muito cuidado, porque uma inadequada aplicação do método faz com que se obtenham resultados totalmente inadequados dos valores da Dimensão Fractal, contudo, o mesmo não acontece com o parâmetro de Intersecção.

Analisando a tendência dos pontos, observa-se que a relação nos quatro primeiros pontos tem um comportamento esperado, entretanto, os pontos 5 e 6 apresentam resultados muito incoerentes. Claro exemplo é o perfil 9, cujo valor do ponto 6 é muito menor do que os outros valores. Por isso, trabalhou-se só com os primeiros 4 pontos para determinar a Dimensão Fractal e o parâmetro de Intersecção. Os valores da Dimensão Fractal e o parâmetro de Intersecção dos perfis propostos por Barton & Choubey (1977) são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção no M. Caixas dos perfis apresentados por Barton & Choubey (1977).

	<i>JRC</i>	<i>DF<sub>c</sub></i>	<i>A<sub>c</sub></i>
Perfil 01	0 - 2	1,003	2,0136
Perfil 02	2 - 4	1,0239	2,0109
Perfil 03	4 - 6	1,0256	2,0324
Perfil 04	6 - 8	1,0323	2,0262
Perfil 05	8 - 10	1,0344	2,0432
Perfil 06	10 - 12	1,0359	2,056
Perfil 07	12 - 14	1,0475	2,0694
Perfil 08	14 - 16	1,0516	2,0817
Perfil 09	16 - 18	1,0607	2,0897
Perfil 10	18 - 20	1,0756	2,1124

A aplicação deste método nos perfis de rugosidades propostos por Barton & Choubey (1977) permitiu observar a variação dos parâmetros Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção e, por consequência, a maneira adequada de trabalhar com o Método das Caixas.

A seguir, serão analisados os perfis publicados por Grasselli (2001), Bandis et al. (1983), Beer et al. (2002), Makurat et al. (1990) e Papaliangas et al. (1990) para determinar-se a Dimensão Fractal,  $DF_c$  e o parâmetro de Intersecção,  $A_c$ , e, posteriormente, correlacioná-los com o valor de  $JRC$ . Na Figura 36 apresenta-se como é determinado o parâmetro de Intersecção. Apresenta-se como exemplo, o perfil 5 dos perfis de Barton & Choubey (1977), sendo o valor do parâmetro de

Intersecção de 2,0432 e da Dimensão Fractal de 1,0344. No Apêndice B se mostra como determinar a Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção dos perfis típicos de Barton & Choubey (1977), como também os perfis propostos por Grasselli (2001), Bandis et al. (1983), Beer et al. (2002), Makurat et al. (1990) e Papaliangas et al. (1990). Na Tabela 5 estão os valores de *JRC*, da Dimensão Fractal e do parâmetro de Intersecção dos perfis do segundo grupo.

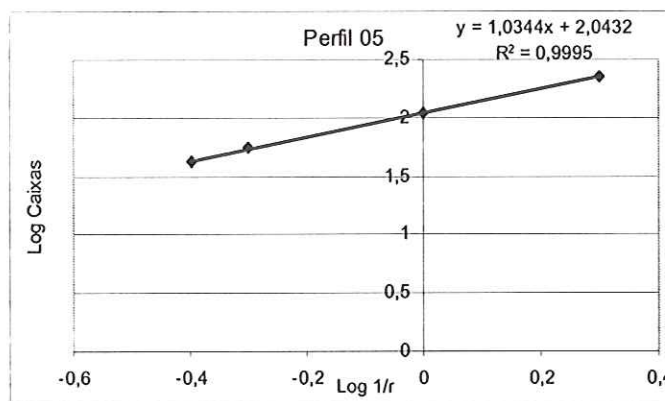


Figura 36. Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção pelo Método das Caixas.

Tabela 5. Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção no M. Caixas.

Perfis	<i>JRC</i>	<i>DF<sub>C</sub></i>	<i>A<sub>C</sub></i>
Bandis 01	5,37	1,0388	2,0376
Bandis 02	6,85	1,0358	2,0541
Beer 01	4	1,0104	2,0212
Beer 02	6	1,0175	2,0346
Makurat 01	2,65	1,0166	2,0381
Makurat 02	4,34	1,0135	2,028
Makurat 03	7,05	1,0384	2,0553
Papaliangas 01	8	1,0431	2,056
Papaliangas 02	10	1,0535	2,0719
Grasselli 01	20	1,0917	2,1532
Grasselli 02	20	1,0902	2,1567
Grasselli 03	20	1,0917	2,1649
Grasselli 10	17	1,0628	2,1194
Grasselli 11	17	1,057	2,1423
Grasselli 12	17	1,058	2,1256

Na Tabela 5 observam-se todos os valores, tanto da Dimensão Fractal como do parâmetro de Intersecção. Dentre os perfis de Grasselli (2001), há os que apresentam valores iguais de *JRC* (valor 20 ou 17), mas os valores da Dimensão Fractal e do parâmetro de Intersecção não são iguais para estes perfis. Isto indica

que não há perfis iguais na natureza, pois, ainda que os perfis representem uma mesma superfície de rugosidade, eles não são iguais.

Depois das análises realizadas, correlacionam-se os parâmetros Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção com o valor do *JRC* de cada perfil. A seguir, apresentam-se as duas correlações realizadas nas Figuras 37 e 38.

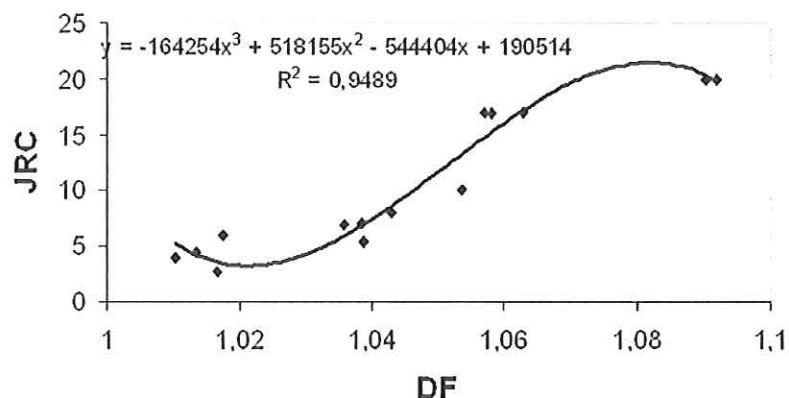


Figura 37. Correlação entre a Dimensão Fractal e o valor de *JRC* dos perfis do segundo grupo.

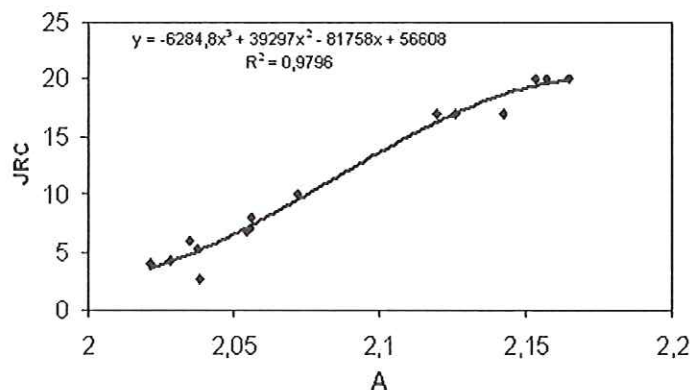


Figura 38. Correlação entre o parâmetro de Intersecção e o valor de *JRC* dos perfis do segundo grupo.

Na Figura 37 apresenta-se a correlação entre os valores da Dimensão Fractal e os valores do *JRC* dos perfis. Desta correlação, obtém-se o valor do coeficiente de determinação, que é de 0,94. A seguir, é apresentada a Equação 29 obtida da correlação:

$$JRC = -164254DF_c^3 + 518155DF_c^2 - 544404DF_c + 190514 \quad (29)$$



Na Figura 38, apresenta-se a correlação entre os valores do parâmetro de Intersecção com os valores do  $JRC$  dos perfis. Nesta correlação, obteve-se um valor do coeficiente de determinação de 0.98. A seguir, apresenta-se a Equação 30 da correlação:

$$JRC = -6284.8A_C^3 + 39297A_C^2 - 81758A_C + 56608 \quad (30)$$

O erro médio é de 14,5%, quando comparados os  $JRC$  da literatura com os determinados pela Equação 29 (Figura 39).

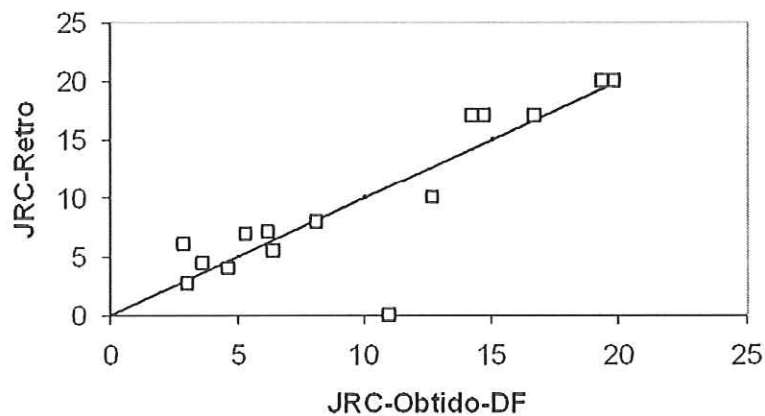


Figura 39. Comparação de  $JRC$  da literatura com  $JRC$  da Equação 29.

Já na comparação dos valores dos  $JRC$  da literatura com os determinados pela Equação 30 de correlação de  $JRC-A$ , o erro médio é de 17,3% (Figura 40).

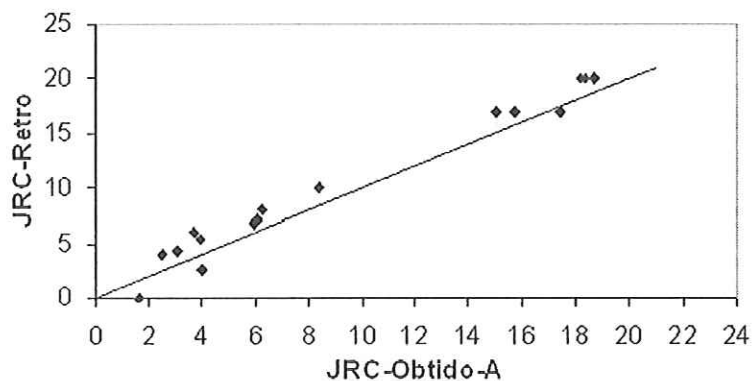


Figura 40. Comparação de  $JRC$  da literatura com  $JRC$  da Equação 30.

#### 4.2.3. MÉTODO DO ÂNGULO

Como nos outros dois métodos mencionados, este método, primeiramente, será aplicado aos perfis apresentados por Barton & Choubey (1977) cujos resultados podem ser vistos na Figura 41.

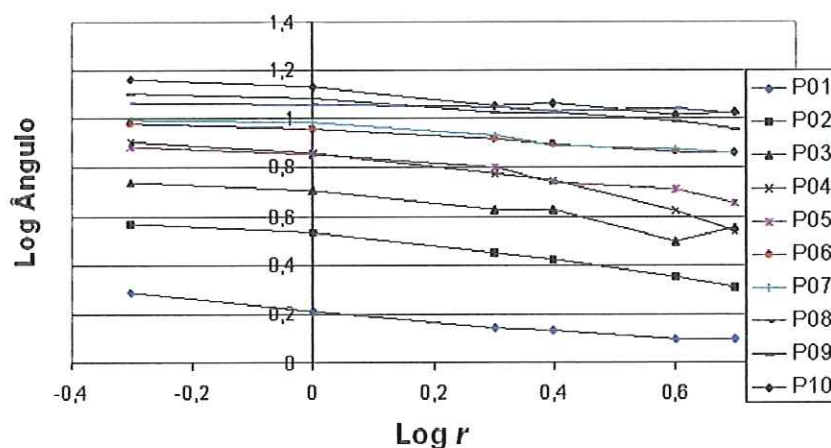


Figura 41. Comportamento dos perfis de Barton & Choubey (1977) com o Método do Ângulo.

Pode-se observar que o comportamento dos perfis padrão é totalmente aleatório e desordenado. Por exemplo, a Dimensão Fractal do perfil 1 é 1,2316, que é maior que a do perfil 8, cujo valor é 1,0376. Estas diferenças, no valor da Dimensão Fractal, podem ser observadas em todos os perfis.

O comportamento anômalo que os perfis apresentaram pode dever-se à pouca resolução vertical com que se digitalizaram os perfis. O método precisa de uma boa resolução vertical para medir os comprimentos das asperezas de uma rugosidade, que têm uma influência muito grande no comportamento das rugosidades do perfil em pequena escala. Contudo o comportamento do parâmetro de Intersecção apresenta-se estável, isto é, o valor do parâmetro aumenta, quanto mais rugoso é o perfil. Este comportamento é similar aos dos outros métodos utilizados. Apresentam-se seis diferentes pontos na Figura 41. Devido ao comportamento irregular dos últimos pontos, serão usados os quatro primeiros, como aconteceu com os métodos Modificado do Divisor e as Caixas. Desta forma, serão obtidos os valores da Dimensão Fractal e do parâmetro de Intersecção dos perfis.

Na Figura 42 é apresentado como determinar o parâmetro de Intersecção e na Tabela 6, apresentam-se os valores da  $DF$  e  $A$  dos perfis propostos por Barton &

Choubey (1977). No Apêndice C se mostra como obter a Dimensão Fractal dos perfis típicos de Barton & Choubey (1977), como também dos perfis dos pesquisadores já mencionados.

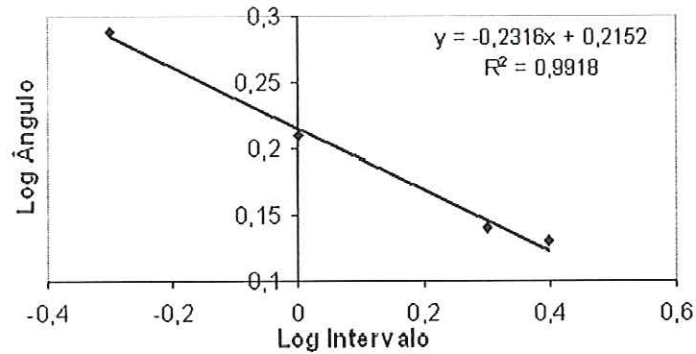


Figura 42. Obtenção da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção pelo M. Ângulo.

Tabela 6. Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção no M. Ângulo dos perfis propostos por Barton & Choubey (1977).

	<i>JRC</i>	<i>DF<sub>A</sub></i>	<i>A<sub>A</sub></i>
Perfil 01	0 - 2	1,2316	0,2152
Perfil 02	2 - 4	1,2139	0,5176
Perfil 03	4 - 6	1,1677	0,6935
Perfil 04	6 - 8	1,2282	0,8448
Perfil 05	8 - 10	1,1947	0,8401
Perfil 06	10 - 12	1,12	0,9507
Perfil 07	12 - 14	1,1413	0,9664
Perfil 08	14 - 16	1,0376	1,0541
Perfil 09	16 - 18	1,1243	1,0743
Perfil 10	18 - 20	1,1629	1,1194

Aplica-se o Método do Ângulo aos perfis de Grasselli (2001), Bandis et al. (1983), Beer et al. (2002), Makurat et al. (1990) e Papaliangas et al. (1990) para determinar a Dimensão Fractal e o parâmetro de Intersecção. Na Tabela 7, apresenta-se o resumo de todos os valores da Dimensão Fractal, o parâmetro de Intersecção e o valor do *JRC* dos perfis.

Tabela 7. Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção aplicando o M. Ângulo.

Perfis	<i>JRC</i>	$DF_A$	$A_A$
Bandis 01	5,37	1,1474	0,7253
Bandis 02	6,85	1,1105	0,7842
Beer 04	4	1,4247	0,4171
Beer 08	6	1,2177	0,6524
Makurat 01	2,65	1,0571	0,6072
Makurat 02	4,34	1,072	0,6448
Makurat 03	7,05	1,0498	0,8765
Papaliangas 01	8	1,1318	0,8288
Papaliangas 02	10	1,2067	0,8901
Grasselli 01	20	1,0605	1,3335
Grasselli 02	20	1,0674	1,3372
Grasselli 03	20	1,0197	1,3794
Grasselli 10	17	1,1092	1,2448
Grasselli 11	17	1,0428	1,2968
Grasselli 12	17	1,0877	1,2518

Observa-se que o comportamento dos valores da Dimensão Fractal com relação a seus valores correspondentes do *JRC* não é coerente e é totalmente desordenado. Analisando o parâmetro de Intersecção, o comportamento concorda com o esperado, pois, se o valor do *JRC* aumenta, também aumenta o valor do parâmetro de Intersecção.

Quando são comparados perfis com valores de *JRC* semelhantes, observa-se que o comportamento dos perfis varia, já que não são semelhantes os valores do parâmetro de Intersecção. Este comportamento pode ser devido à maneira como cada pesquisador realizou os estudos e ensaios para determinar os perfis de rugosidade e os valores do *JRC* de cada perfil.

Os perfis de Grasselli devem ser analisados separadamente, já que, entre eles, há perfis com *JRC* iguais, mas com valores de Dimensão Fractal como parâmetro de Intersecção diferentes. Este comportamento deve-se ao fato de que não há perfis de rugosidade iguais na natureza.

Depois de determinar os valores da Dimensão Fractal e do parâmetro de Intersecção, correlaciona-se cada um destes valores com o valor do *JRC* dos perfis estudados, como apresentado nas Figuras 43 e 44. Nota-se através da Figura 43, que não há uma correlação definida entre o *JRC* e a *DF* utilizando o Método do Ângulo.

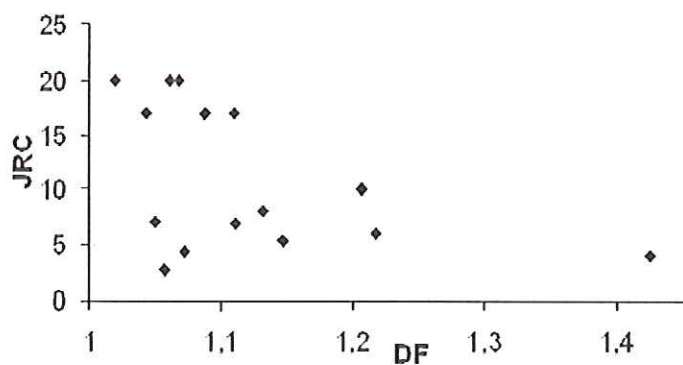


Figura 43. Correlação entre a Dimensão Fractal e o valor de *JRC* dos perfis.

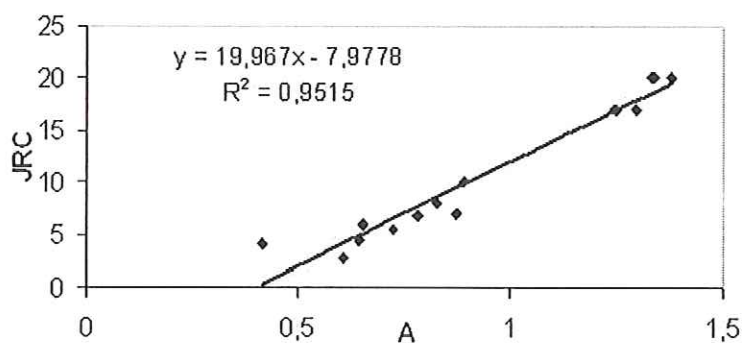


Figura 44. Correlação entre o parâmetro de Intersecção e o valor de *JRC* dos perfis.

Na Figura 44, apresenta-se a correlação entre o *JRC* e *A*, com uma reta, cuja equação é mostrada a seguir:

$$JRC = 19,967A_A - 7,9778 \quad (31)$$

Na Figura 45, compararam-se os valores de *JRC* da literatura com os determinados pela Equação 31 da correlação de *JRC-A*, através da qual encontrou-se um erro médio de 9,8%.

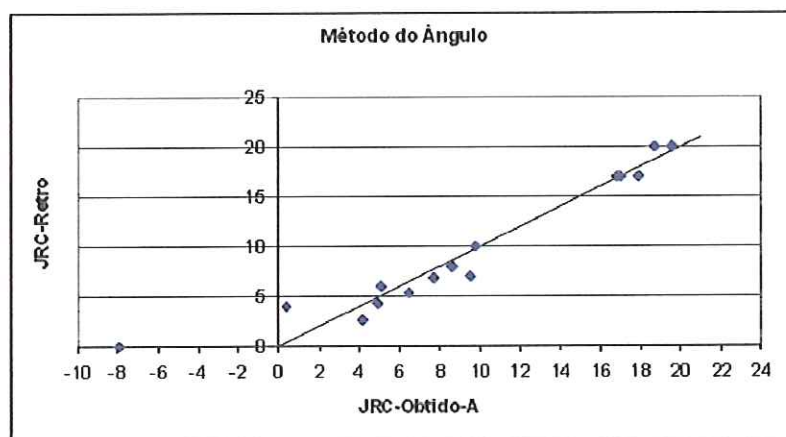


Figura 45. Comparação de *JRC* da literatura com *JRC* da Equação 31.

#### 4.2.4. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS

Divide-se, em duas partes as análises dos resultados obtidos. Na primeira parte, será realizada a comparação entre os métodos utilizados, por meio de correlações *JRC-DF* e *JRC-A*. Na segunda parte, será realizada a comparação entre os valores dos *JRC* da literatura com os valores dos *JRC* obtidos das equações das correlações realizadas.

Parte I. Na Figura 46, apresenta-se o comportamento de *JRC* em função da Dimensão Fractal para os três métodos individualmente representados por M (Met. Modificado do Divisor), C (Met. Caixas) e A (Met. Ângulo), utilizando os perfis do segundo grupo.

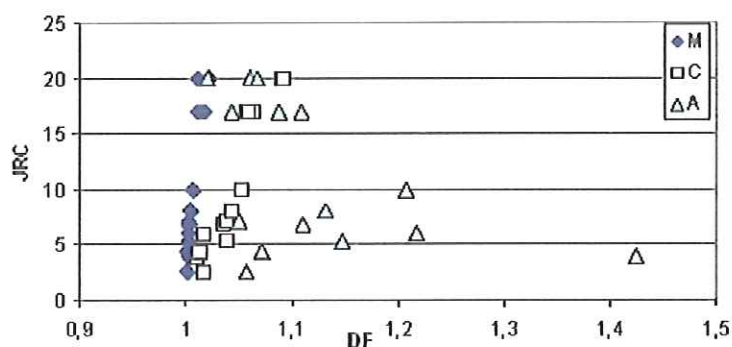


Figura 46. Comparação dos valores da Dimensão Fractal dos 3 métodos apresentados.

O Método do Ângulo tem um comportamento muito desordenado. O comportamento do Método das Caixas é ordenado, mas apresentam-se valores

discordantes da tendência geral apresentada pelo método. Por fim, no Método Modificado apresenta resultado coerente, ou seja, quando aumenta o valor do  $JRC$ , aumenta o valor da Dimensão Fractal. Sendo assim, nesta comparação, o melhor é o Método Modificado do Divisor.

A relação entre o  $JRC$  e  $A$  é apresentada na Figura 47, também para os três métodos, representados com a mesma simbologia da Figura 46.

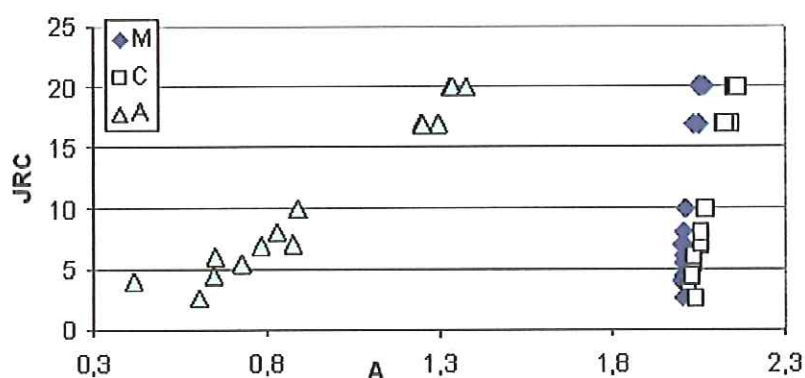


Figura 47. Comparação dos valores de  $A$  dos métodos aplicados.

Observa-se que tanto o Método Modificado quanto Método das Caixas têm um comportamento coerente e esperado, mas o Método do Ângulo apresenta valores inconsistentes do parâmetro de Intersecção com relação aos valores do  $JRC$ . Portanto, os métodos adequados para se obter o parâmetro de Intersecção são o Método Modificado do Divisor e Método das Caixas.

Na segunda parte da análise serão realizadas duas comparações: a primeira, entre os valores do  $JRC$  da literatura e os valores de  $JRC$  obtidos das equações; a segunda, entre os coeficientes de determinação de todas as equações obtidas das correlações.

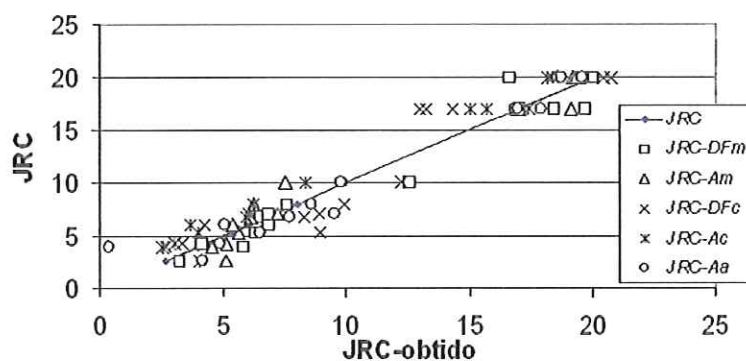


Figura 48. Comparação entre os valores do  $JRC$  usando as Equações 27, 28, 29, 30 e 31.

Tabela 8. Valores de *JRC* usando as Equações 27, 28, 29, 30 e 31.

Perfis	<i>JRC</i>	M. M. Divisor		M. Caixas		M. Ângulo	
		<i>JRC</i> ( <i>DF<sub>M</sub></i> )	<i>JRC</i> ( <i>A<sub>M</sub></i> )	<i>JRC</i> ( <i>DF<sub>C</sub></i> )	<i>JRC</i> ( <i>A<sub>C</sub></i> )	<i>JRC</i> ( <i>DF<sub>A</sub></i> )	<i>JRC</i> ( <i>A<sub>A</sub></i> )
Bandis 01	5,37	6,33	5,63	6,42	3,97	-	6,5
Bandis 02	6,85	6,49	6,12	5,36	5,92	-	7,68
Beer 04	4	5,83	4,57	4,66	2,51	-	0,35
Beer 08	6	6,81	5,38	2,92	3,67	-	5,04
Makurat 01	2,65	3,23	3,13	3,04	4,03	-	4,14
Makurat 02	4,34	4,12	5,13	3,67	3,05	-	4,89
Makurat 03	7,05	6,81	7,21	6,27	6,07	-	9,52
Papaliangas 01	8	7,6	6,22	8,13	6,26	-	8,57
Papaliangas 02	10	12,57	7,54	12,73	8,36	-	9,79
Grasselli 01	20	19,89	19,21	19,34	18,17	-	18,64
Grasselli 02	20	20,04	19,43	19,85	18,35	-	18,72
Grasselli 03	20	16,63	19,34	19,38	18,65	-	19,56
Grasselli 10	17	19,72	16,95	16,71	15,02	-	16,87
Grasselli 11	17	17,03	19,16	14,29	17,41	-	17,91
Grasselli 12	17	18,44	17,03	14,73	15,75	-	17,01

Tabela 9. Coeficientes de Determinação das correlações realizadas.

	M. M. Divisor		M. Caixas		M. Ângulo	
	<i>DF<sub>M</sub></i>	<i>A<sub>M</sub></i>	<i>DF<sub>C</sub></i>	<i>A<sub>C</sub></i>	<i>DF<sub>A</sub></i>	<i>A<sub>A</sub></i>
<i>R</i> <sup>2</sup>	0,9504	0,962	0,9489	0,9798	-	0,9515

Na Tabela 8 como na Figura 48, são apresentados os valores do *JRC* obtidos da aplicação da equação da correlação de *JRC-DF* e *JRC-A* para cada método. Comparando cada valor do *JRC* da literatura com o valor do *JRC* obtido pelos parâmetros *DF* e *A* em cada um dos três métodos, determinou-se que o melhor parâmetro para quantificar o perfil da rugosidade é o parâmetro de Intersecção do Método Modificado do Divisor.

Na Tabela 9 apresenta-se o coeficiente de determinação das correlações realizadas entre o valor do *JRC*, a Dimensão Fractal e o parâmetro de Intersecção. O parâmetro mais alto é o que melhor representa o perfil da rugosidade.

Estas análises são muito importantes para determinar qual é o parâmetro que melhor quantifica o perfil da rugosidade.



#### 4.2.4.1. DETERMINAÇÃO DO PARÂMETRO MAIS ADEQUADO PARA QUANTIFICAR O PERFIL DE UMA RUGOSIDADE

Para determinar o parâmetro que melhor quantifica o perfil de uma rugosidade, consideram-se os seguintes aspectos:

- Comparação dos métodos: as análises realizadas através das Figuras 46 e 47 permitem considerar que o melhor método para determinar a Dimensão Fractal com a melhor correlação com *JRC* é o Método Modificado do Divisor e para determinar o parâmetro de Intersecção com a melhor correlação com *JRC* são: o Método Modificado do Divisor e o Método das Caixas respectivamente.
- Comparação dos valores do *JRC* da literatura com os *JRC* obtidos das equações: determinou-se que o parâmetro de Intersecção do Método Modificado do Divisor representa melhor o perfil da rugosidade.
- Coeficiente de Determinação: Na tabela 9 é apresentado o coeficiente de determinação das correlações dos parâmetros de cada método. Segundo o valor do coeficiente de determinação da tabela, o parâmetro que melhor representa o perfil é o parâmetro de Intersecção do Método das Caixas.
- Erro médio dos resultados: as análises das equações que representam as correlações demonstram que o melhor parâmetro para quantificar o perfil da rugosidade é o parâmetro de Intersecção do Método Modificado do Divisor.

#### 4.2.5. ANÁLISES DO PARÂMETRO DE INTERSECÇÃO DO MÉTODO MODIFICADO DO DIVISOR

Depois que foi demonstrado nas análises anteriores que o parâmetro de Intersecção do Método Modificado do Divisor foi aquele que melhor quantificou o perfil de rugosidade, agora se tentará obter uma interpretação adequada para o mesmo, com a finalidade de usar o parâmetro em pesquisas futuras. Para tentar a interpretação do parâmetro de Intersecção do Método Modificado do Divisor, primeiramente se vai analisar o conceito de rugosidade e de que elementos a rugosidade está composta. Segundo a ISRM (1978) a rugosidade da descontinuidade está caracterizada pela ondulação (a grande escala, decimétricos a métricos) e as irregularidades (rugosidade de pequena escala, milímetros a centímetros). A superfície rugosa é composta pelas irregularidades e ondulação relativa ao plano médio da descontinuidade que estão

ligadas estruturalmente. Usando a ligação estrutural das ondulações e irregularidades, vai-se criar três perfis diferentes estruturalmente, com um elemento estrutural constante, que é a ondulação. A diferença estrutural dos três perfis é basicamente a variação das irregularidades, que vão desde a mais simples à mais complexas, como é mostrado na Figura 49.

A finalidade da criação destes perfis é tentar obter a interpretação do parâmetro de Intersecção. Para isso, determinar-se-ão os valores da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção usando o Método Modificado do Divisor, e posteriormente serão comparados os valores destes e observado o comportamento de cada valor com relação ao perfil que representa.

Como complemento para esta análise, também serão usados os perfis de rugosidade de Grasselli (2001), Beer et al. (2002) com o perfil de *JRC 4*, Papaliangas et al. (1990) com o perfil de *JRC 10* e Makurat et al. (1990) com o perfil de *JRC 7*, apresentados anteriormente nas Figuras 22, 23 e 24 respectivamente. Estes perfis apresentam-se estruturalmente diferentes, com ondulações e irregularidades diferenciadas entre cada perfil.

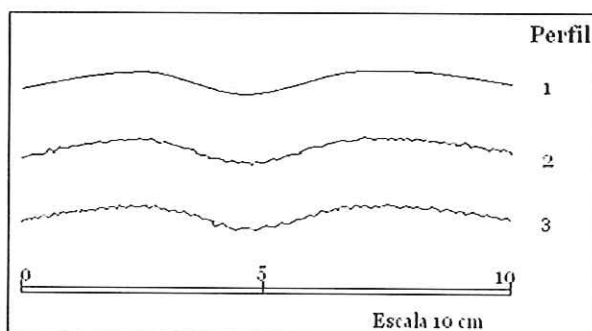


Figura 49. Perfis com igual grau de ondulação e diferentes graus de irregularidades.

Como é observada na Figura 49, a escala de trabalho dos perfis é de 10 cm. E como aconteceu nas análises anteriores na determinação da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção, usar-se-ão os pontos correspondentes a comprimentos de 0,5 mm, 1 mm, 2 mm e 2,5 mm.

Na Figura 50, apresenta-se o comportamento individual de cada perfil. Primeiro se analisarão os perfis da Figura 49, representados como *Perfil1*, *Perfil2* e *Perfil3* na Figura 50.a. Como aconteceu nas análises anteriores, serão analisados os

comportamentos de cada ponto usados na Figura 50.a. Os pontos correspondentes aos comprimentos 0,5 e 1 mm apresentam um comportamento já conhecido, o mesmo acontece com o ponto de comprimento de 2 mm. Na mesma figura, o último ponto apresenta um comportamento diferente, pois o valor correspondente a este ponto é quase o mesmo para os três perfis estudados. Tentando interpretar os diferentes comportamentos dos pontos, observou-se que os três primeiros pontos estão influenciados pelas irregularidades e a ondulação, e o último ponto está influenciado pela ondulação do perfil, porque os valores neste ponto são quase os mesmos. Na Figura 50.b se apresentam o comportamento dos perfis de Grasselli (2001) representados por *G1*, ... *G6*, perfil de Beer et al. (2002) representado por *B4*, perfil de Makurat et al. (1990) representado por *M7* e o perfil de Papaliangas et al. (1990) representado por *P10*. Analisando a ligação estrutural de cada perfil, observou-se que os perfis de Grasselli (2001) apresentam um alto grau de irregularidades e o elemento estrutural ondulação variável. Nos outros perfis, a ligação estrutural varia de perfil a perfil. Como realizado anteriormente, vai-se analisar o comportamento dos perfis na Figura 50.b. Como se mostra nesta figura, o parâmetro de Intersecção aumenta desde o perfil com menor grau de complexidade ao maior grau de complexidade. Considerar-se-á a análise feita para os perfis da Figura 49, onde observou-se que o quarto ponto ( $\log r = 0,4$ ) está influenciado pela ondulação do perfil de rugosidade. Considerando esta observação se analisará o comportamento do quarto ponto de cada perfil. Nesta análise notou-se o aumento do valor do quarto ponto desde o perfil quase plano (*B4*) ao perfil que apresenta uma ondulação maior (*G3*). O mesmo comportamento pode-se observar nos perfis típicos de Barton & Choubey (1977) na Figura 28. Esta interpretação nos dá ferramentas para relacionar a complexidade das irregularidades e ondulação da rugosidade com uma possível interpretação do parâmetro de Intersecção.

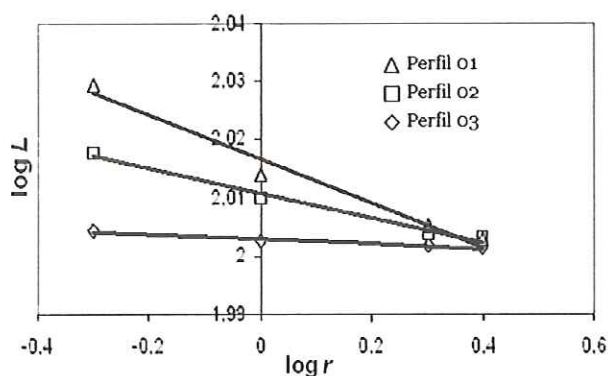


Figura 50.a

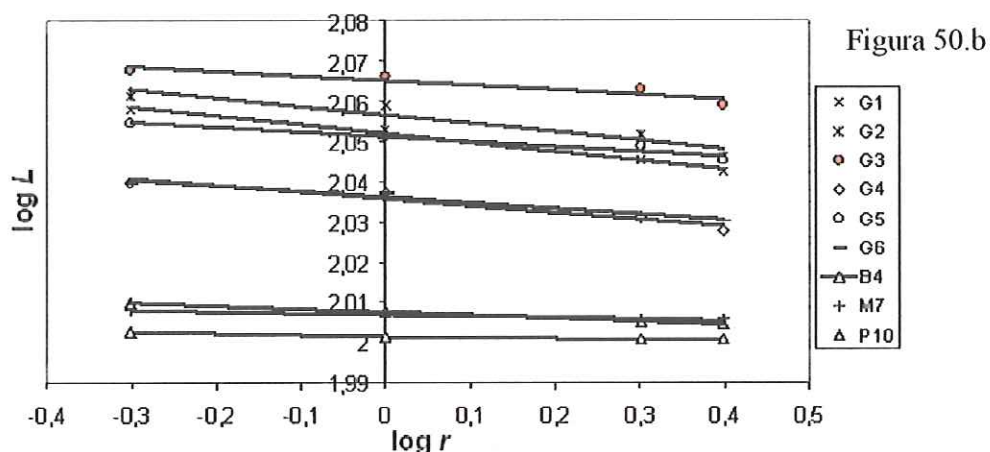


Figura 50.b

Figura 50 a. Apresentação do comportamento dos perfis da Figura 49.

b. Comportamento da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção dos perfis.

Os valores da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção usando o Método Modificado do Divisor são apresentados na Tabela 10, onde se mostra o comportamento já mencionado dos parâmetros com respeito aos perfis.

Tabela 10. Valores da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção dos perfis de rugosidade.

Perfis	$DF_M$	$A_M$
Perfil 01	1,0042	2,0029
Perfil 02	1,0216	2,0108
Perfil 03	1,038	2,0166
Grasselli 1	1,0221	2,0519
Grasselli 2	1,0212	2,0567
Grasselli 3	1,0114	2,0651
Grasselli 4	1,017	2,0357
Grasselli 5	1,0119	2,0512
Grasselli 6	1,014	2,0361
Beer 4	1,0027	2,0015
Makurat 7	1,0033	2,0069
Papaliangas 10	1,0074	2,0076

Retomando as análises feitas anteriormente sobre a dependência da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção das irregularidades e ondulação da rugosidade, pode-se afirmar que o comportamento do valor da Dimensão Fractal está de acordo com o esperado. No comportamento do parâmetro de Intersecção, pode-se observar a dependência do parâmetro com a complexidade das irregularidades e ondulação da rugosidade e que o valor do parâmetro de Intersecção conserva esta complexidade em seus valores, como é observado na Tabela 10. Quanto menor complexidade das irregularidades e ondulação da rugosidade, menor o valor do parâmetro de Intersecção e quanto maior complexidade das irregularidades e ondulação da rugosidade, maior valor do parâmetro de Intersecção, como também maior valor da Dimensão Fractal. Finalmente se pode expor, que o parâmetro de Intersecção representa a complexidade das irregularidades e ondulação de um perfil de rugosidade.

Para usar o valor do parâmetro de Intersecção em pesquisas futuras sobre a quantificação da rugosidade da descontinuidade e também pela possibilidade de usar este parâmetro em engenharia, é indispensável adimensionalizar este parâmetro. Para isto, será usado o comprimento da amostra, que é uma propriedade que tem uma influência direta nos valores da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção.

Tanto o parâmetro de Intersecção como o comprimento da amostra são propriedades que representam o perfil da rugosidade, cada uma a seu modo. O parâmetro de Intersecção representa a complexidade da rugosidade do perfil e o comprimento da amostra representa a escala de trabalho do perfil. A finalidade é juntar estas propriedades do perfil para obter um novo parâmetro que poderia quantificar melhor juntamente com a Dimensão Fractal o perfil de rugosidade.

A maneira de determinar o novo parâmetro é dividir o parâmetro de Intersecção ( $A_M$ ) pelo logaritmo do comprimento da amostra em milímetros ( $L_e$ ), como é mostrado na Equação 32. O novo parâmetro é denominado *Peso Fractal (H)*.

$$H = \frac{A_M}{\log L_e} \quad (32)$$

Este parâmetro será determinado para os perfis do segundo grupo. Estes valores são apresentados na Tabela 11, onde também são mostrados os valores do *JRC* dos

perfis, os valores da Dimensão Fractal e o parâmetro de Intersecção, determinados através do Método Modificado do Divisor.

Tabela 11. Valores de  $JRC$ ,  $DF$ ,  $A$  e  $H$  dos perfis do segundo grupo.

Perfis	$JRC$	$DF_M$	$A_M$	$H$
Grasselli	20	1,0221	2,0519	1,0259
	20	1,0212	2,0567	1,0283
	20	1,0114	2,0651	1,0325
	17	1,017	2,0357	1,0178
	17	1,0119	2,0512	1,0256
	17	1,014	2,0361	1,018
Bandis	5,37	1,003	2,0036	1,0018
	6,85	1,0031	2,0046	1,0023
Beer	4	1,0027	2,0015	1,0007
	6	1,0033	2,0031	1,0015
Makurat	2,65	1,0012	2,0026	1,0013
	4,34	1,0017	2,0026	1,0013
	7,05	1,0033	2,0069	1,0034
Papaliangas	8	1,0038	2,0048	1,0024
	10	1,0074	2,0076	1,0038

Para demonstrar que o Peso Fractal poderia quantificar o perfil da rugosidade, realizou-se a correlação entre os valores do  $JRC$  com os valores do Peso Fractal ( $H$ ) dos perfis do segundo grupo, como mostrado na Figura 51.

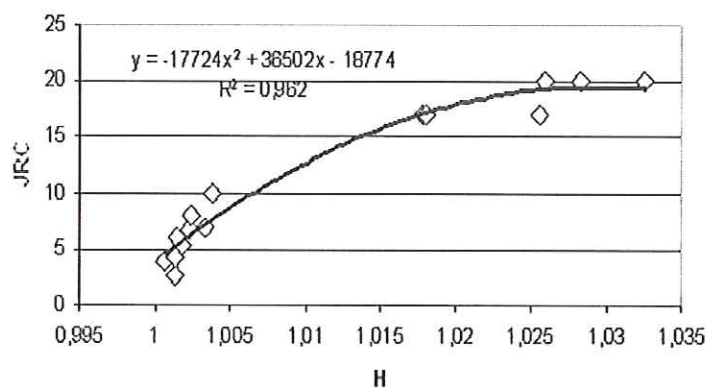


Figura 51. Correlação dos valores de  $JRC$  com o Peso Fractal  $H$

A Equação 33 apresenta a relação entre o  $JRC$  e o Peso Fractal ( $H$ ):

$$JRC = -17724H^2 + 36502H - 18774 \quad (33)$$

Na Figura 52 é observada a comparação dos valores da literatura do  $JRC$  com os valores do  $JRC$  obtidos da Equação 33.

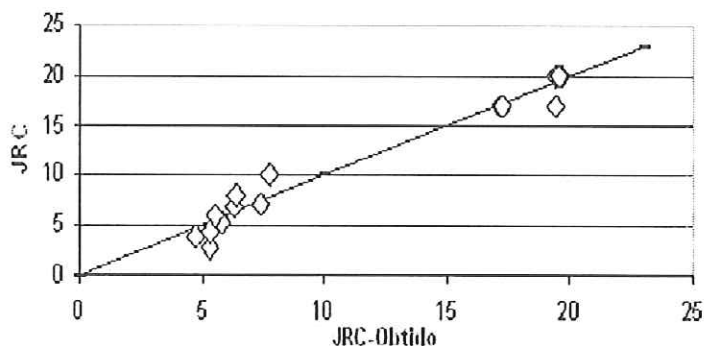


Figura 52. Comparação entre  $JRC$  da literatura com  $JRC$  obtido da Equação 33.

Como é observado na Figura 52, o erro médio obtido foi de 9,6%. O Peso Fractal ( $H$ ) apresenta um valor de erro médio igual ao apresentado pelo parâmetro de Intersecção do Método Modificado do Divisor.

Além do Peso Fractal, a Dimensão Fractal também poderia ser empregada para quantificar a rugosidade de uma descontinuidade, porque representa uma característica própria do perfil da rugosidade. Segundo Kwasniewski e Wang (1997) a dimensão fractal não é suficiente para quantificar a rugosidade. Pode-se usar esta afirmação para expressar que um parâmetro só não pode quantificar o perfil de rugosidade. Por isso, a combinação efetiva da Dimensão Fractal e Peso Fractal pode auxiliar na quantificação da rugosidade. Por este motivo é que se tentará correlacionar o valor de  $JRC$  com o valor da Dimensão Fractal e o valor do Peso Fractal dos perfis de rugosidade do segundo grupo.

Para tal fim, colocou-se o valor de  $JRC$ , Dimensão Fractal e Peso Fractal da Tabela 11 em uma figura tridimensional, como é mostrado na Figura 53.

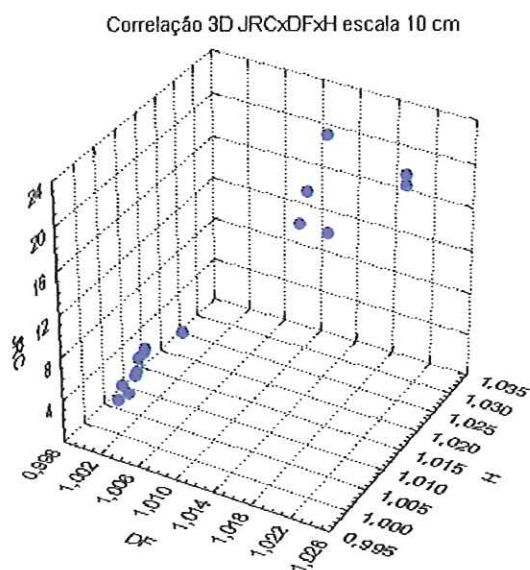


Figura 53. Valores de  $JRC$ ,  $DF_M$  e  $H$  no gráfico 3D.

Utilizou-se o programa Statistica®5.5. Primeiramente, usou-se a correlação bilinear como é mostrado na Figura 54.

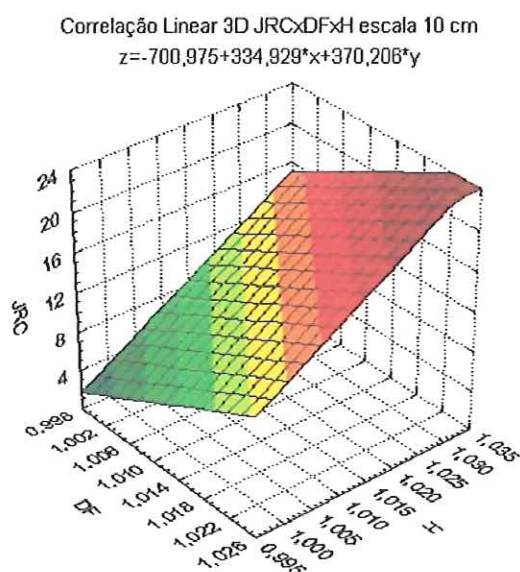


Figura 54. Correlação bilinear de  $JRC$  com  $DF$  e  $H$ .

A correlação bilinear é representada por

$$JRC = -700,975 + 334,929H + 370,206DF_M \quad (34)$$



Utilizando a equação da correlação bilinear, determinaram-se valores do *JRC* e posteriormente se compararam com os valores do *JRC* da literatura, como mostra-se na Figura 55. O erro médio desta análise foi de 16,27 %.

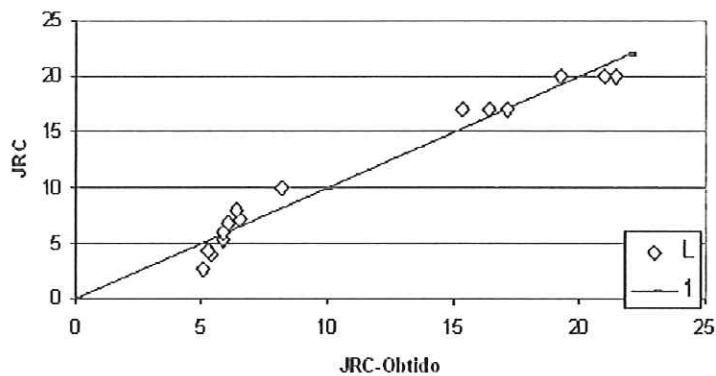


Figura 55. Comparação dos valores de *JRC* da literatura com os valores da Equação 34.

Usando o programa Statistica®5.5, tentou-se um ajuste quadrático dos mesmos dados. Esta correlação é apresentada na Figura 56.

Correlação Polinomial 3D  $JRC \times DF \times H$  escala 10 cm  
 $z = -29668,3 + 1727,846 \cdot x + 56217,2 \cdot y + 5323,004 \cdot x^2 - 12206,44 \cdot x \cdot y - 21391,35 \cdot y^2$

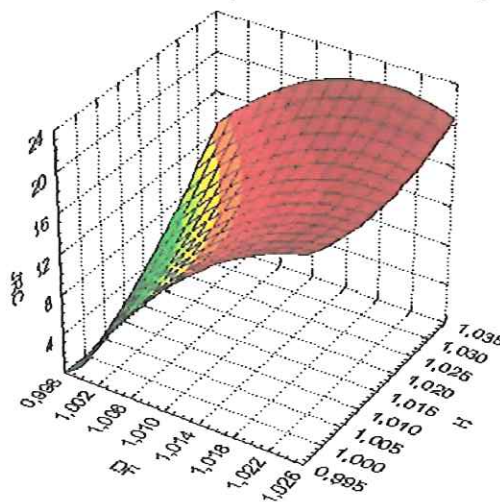


Figura 56. Correlação Quadrática dos parâmetros *JRC*,  $DF_M$  e *H*.

Na Figura 56, apresenta-se a correlação entre os valores do Peso Fractal e Dimensão Fractal com os valores do *JRC* dos perfis. A seguir, apresenta-se a Equação 35 que representa a correlação quadrática:

$$JRC = -29668,3 + 1727,846H + 56217,2DF_M + 5323,004H^2 - 12206,44HDF_M - 21391,35DF_M^2 \quad (35)$$

Utilizando a Equação 35, obtém-se os valores de  $JRC$  que serão comparados com os valores de  $JRC$  da literatura, onde o erro médio é de 9 % (Figura 57).

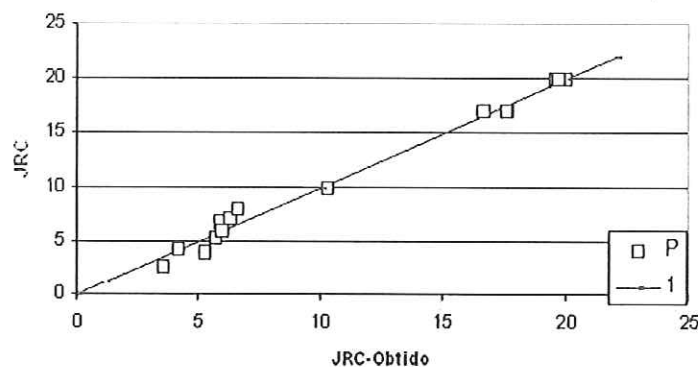


Figura 57. Comparação de  $JRC$  da literatura com  $JRC$  obtido da Equação 35.

A análise mostra que a Dimensão Fractal ( $DF_M$ ), parâmetro de Intersecção ( $A_M$ ) e Peso Fractal ( $H$ ), não quantificam bem isoladamente a rugosidade de uma descontinuidade, mas a combinação dos parâmetros da Dimensão Fractal com do Peso Fractal mostra uma pequena melhoria, observa-se isto na Figura 57, como também nas análises feitas nesta seção.

#### 4.2.6. UTILIZAÇÃO DA EQUAÇÃO 35 NA DETERMINAÇÃO DOS VALORES DE $JRC$ DOS PERFIS TÍPICOS

Este tópico trata dos perfis típicos propostos por Barton & Choubey (1977) em que se determina o valor do  $JRC$  para cada perfil usando a Equação 35.

Usou-se a Equação 35 já que os perfis usados para obter esta equação têm escala de 10 cm. Para observar ou perceber suas limitações, a equação foi aplicada aos perfis típicos.

#### 4.2.6.1. PERFIS DE BARTON, DETERMINAÇÃO DO VALOR DO *JRC* DE CADA PERFIL

Barton & Choubey (1977) apresentam seus perfis como perfil 1, perfil 2, até o perfil 10 como seus valores do *JRC* que vão de 0 – 2, 2 – 4, 4 – 6 até 18 – 20. Mas não apresentam o verdadeiro valor de *JRC* para cada perfil. Será usada a Equação 35 para determinar os valores do *JRC* para cada perfil. Além da determinação dos valores do *JRC*, compararam-se os valores obtidos da Equação 35 com a faixa de valores do *JRC* dos perfis típicos. Para isso é necessário determinar primeiramente a Dimensão Fractal de cada perfil, posteriormente o parâmetro de Intersecção e o Peso Fractal. Estes parâmetros com os valores do *JRC* para cada perfil são apresentados na Tabela 12.

Tabela 12. Valores de *JRC* obtidos da Equação 35 para os perfis típicos propostos por Barton & Choubey (1977).

	<i>JRC</i>	$DF_M$	$A_M$	$H$	<i>JRC</i>
Perfil 1	0 - 2	1,0007	2,0005	1,0002	2,8
Perfil 2	2 - 4	1,0014	2,0014	1,0007	3,7
Perfil 3	4 - 6	1,0027	2,0027	1,0013	5,3
Perfil 4	6 - 8	1,0044	2,0063	1,0031	7,4
Perfil 5	8 - 10	1,0046	2,0056	1,0028	7,5
Perfil 6	10 - 12	1,0048	2,0088	1,0044	7,9
Perfil 7	12 - 14	1,007	2,0098	1,0049	10
Perfil 8	14 - 16	1,0075	2,0139	1,0069	10,7
Perfil 9	16 - 18	1,0102	2,0153	1,0076	12,9
Perfil 10	18 - 20	1,0173	2,0232	1,0116	17

Depois de determinar os valores do *JRC* usando a Equação 35 se analisará e comparará cada valor obtido com sua faixa de valores respectivas. Esta comparação é mostrada na Figura 58 onde são observados os valores do *JRC* de Barton & Choubey (1977) da faixa dos valores superiores 0, 2, 4, ....., como a faixa dos valores inferiores e o valor do *JRC* obtido mediante a Equação 35.

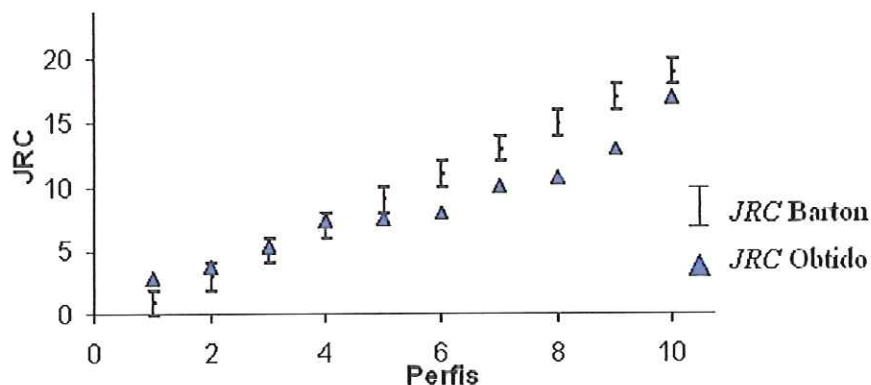


Figura 58. Comparação dos valores de  $JRC$  dos perfis propostos por Barton & Choubey (1977).

Analisando a Figura 58, verifica-se que os valores do  $JRC$  dos primeiros 4 perfis se encontram dentro da faixa de valores de Barton & Choubey (1977). Este comportamento é observado também com o perfil 10. Mas os outros perfis não apresentam um comportamento semelhante, o que poderia indicar uma falta de base de dados nessa porção de valores do  $JRC$ . Pode-se observar também que a equação aplicada para determinar os valores do  $JRC$  de cada perfil de Barton & Choubey (1977) representa melhor os perfis com valores do  $JRC$  menores que 10, e que apresenta uma grande erro em perfis com valores maiores.

#### 4.3. COMPORTAMENTO DOS PARÂMETROS FRACTAIS NO EFEITO ESCALA DA RUGOSIDADE DA DESCONTINUIDADE

A rugosidade da descontinuidade é uma fonte de fenômenos ligados ao efeito escala principalmente na resistência a cisalhamento, pois quanto maior o comprimento da amostra da descontinuidade, menor a resistência a cisalhamento.

Conhecer o valor da rugosidade da descontinuidade em diferentes escalas ajuda a prever a influência desta, em diferentes condições geomecânicas como, por exemplo, a resistência a cisalhamento.

Neste tópico do capítulo se utilizará o conceito de fractal para observar e compreender o comportamento da Dimensão Fractal, parâmetro de Intersecção e do Peso Fractal no efeito escala da rugosidade. Estes parâmetros serão obtidos usando o Método Modificado do Divisor, como mostram as análises feitas anteriormente no tópico 4.2.

#### 4.3.1. ANÁLISES E RESULTADOS DO COMPORTAMENTO DOS PARÂMETROS FRACTAIS NO EFEITO ESCALA

Antes de começar a desenvolver estas análises, apresentar-se-ão os perfis de rugosidade que serão utilizadas nas futuras interpretações e resultados. Serão usados os seguintes perfis obtidos da literatura, apresentados por Papaliangas et al. (1990), Grasselli (2001) e Makurat et al. (1990), apresentados na Figura 59, e também é mostrada a escala do perfil, que é maior que 10 cm em quase todos eles.

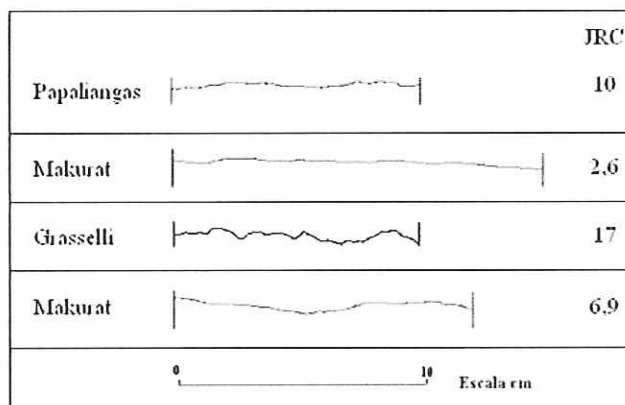


Figura 59. Perfis de rugosidades para o efeito escala.

O efeito escala será determinado usando diferentes comprimentos de perfil de 10, 7,5, 5 e 2,5 cm, obtidos a partir dos perfis mostrados na Figura 59. Cada um destes perfis será obtido da esquerda para a direita de cada perfil original. Uma limitação desta análise foi a não utilização de perfis próprios. Para interpretar o comportamento tanto da Dimensão Fractal, parâmetro de Intersecção e Peso Fractal, foi necessário interpretar a dependência de cada parâmetro com o valor do comprimento do perfil.

Determinado cada novo perfil com comprimento diferente serão obtidos os valores da Dimensão Fractal ( $DF_M$ ) e parâmetro de Intersecção ( $A_M$ ) de cada um deles, como é mostrado na Tabela 13. Também determinou-se o valor do Peso Fractal ( $H$ ). No Apêndice D, mostra-se como foi determinado o valor da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção para os perfis utilizados nesta análise.

Tabela 13. Valores do  $DF_M$ ,  $A$  e  $H$  dos perfis no efeito escala.

Perfis	Comprimento mm	$DF_M$	$A_M$	$H$
Grasselli 17	100	1,014	2,0361	1,018
	75	1,0089	1,9092	1,0182
	50	1,0074	1,7343	1,0208
		1,0083	1,7378	1,0228
	25	1,0044	1,4283	1,0217
		1,0058	1,4386	1,029
		1,005	1,434	1,0258
	1,0055	1,435	1,0265	
Makurat 2,6	150	1,0014	2,1783	1,001
	100	1,0012	2,0026	1,0013
	75	1,001	1,8771	1,0011
		1,0015	1,8768	1,0009
	50	1,0009	1,7015	1,0015
		1,0006	1,7009	1,0011
	25	1,0008	1,7012	1,0013
		1,0008	1,402	1,0029
		1,0007	1,4016	1,0026
		1,0006	1,4011	1,0023
		1,0006	1,4013	1,0024
		1,0007	1,4017	1,0027
	1,0007	1,4019	1,0028	
Papaliangas 10	100	1,0074	2,0076	1,0038
	75	1,0073	1,882	1,0037
	50	1,007	1,7061	1,0042
		1,0075	1,7070	1,0047
	25	1,0062	1,4076	1,0069
		1,0050	1,4070	1,0065
		1,0065	1,4077	1,0070
	1,0058	1,4071	1,0066	
Makurat 6,9	117,2	1,0038	2,0767	1,0037
	100	1,0033	2,0069	1,0034
	75	1,0031	1,8827	1,0041
	50	1,0024	1,7046	1,0033
		1,0020	1,7050	1,0035
	25	1,0021	1,4035	1,004
		1,0029	1,4040	1,0043
		1,0037	1,4052	1,0052
1,0032	1,4043	1,0045		

Determinados todos os parâmetros, estes foram analisados e interpretados. Para isto foram utilizadas as tendências para os parâmetros mostrados na Tabela 13. Para analisar o comportamento de cada parâmetro, serão usadas as correlações como ferramenta auxiliar e como apoio nas análises. Na Figura 60 é observada a correlação da Dimensão Fractal com o comprimento de cada perfil determinado. Em uma rápida

análise é observado como a Dimensão Fractal diminui quando também diminui o comprimento do perfil. Isto indica que a Dimensão Fractal ( $DF$ ) é dependente da escala do perfil de rugosidade.

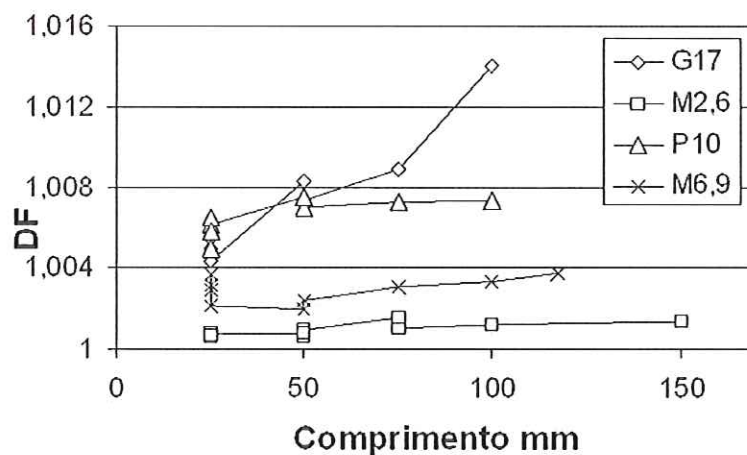


Figura 60. Comportamento da Dimensão Fractal com relação ao comprimento do perfil.

Para entender o comportamento do parâmetro de Intersecção ( $A$ ) será necessário realizar a correlação entre este parâmetro e o comprimento como é mostrada na Figura 61. Observa-se claramente que o parâmetro de Intersecção depende da escala do perfil. Para interpretar o comportamento do parâmetro, foi usado como exemplo o perfil de Grasselli (2001) da Figura 61. Observa-se que o perfil de Grasselli (2001) é representativo do grupo de perfis apresentados. O comportamento do parâmetro de Intersecção está diretamente ligado ao comprimento do perfil: quanto menor o comprimento do perfil menor também o valor do parâmetro de Intersecção.

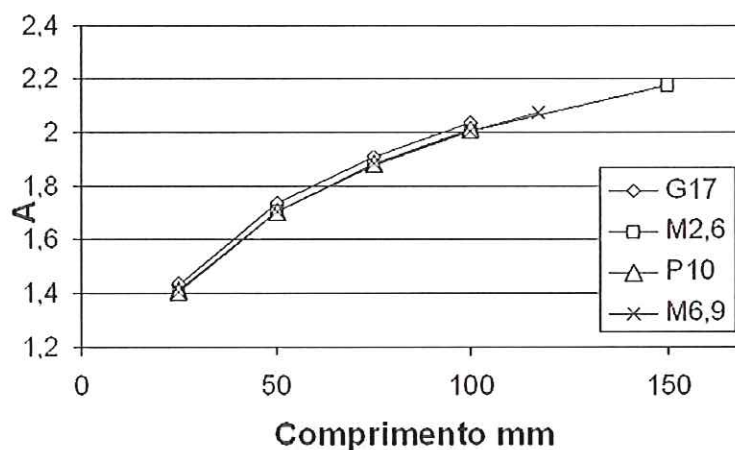


Figura 61. Comparação entre parâmetro de Intersecção e comprimento do perfil.

A seguir, na Figura 62 se analisa o comportamento do parâmetro de Intersecção em relação ao logaritmo do comprimento do perfil. Observa-se uma tendência linear constante, o que poderia indicar um comportamento constante a diferentes comprimentos dos perfis. Este comportamento é observado nos diferentes perfis apresentados na figura. Esta análise adicional ajuda a entender melhor o parâmetro de Intersecção.

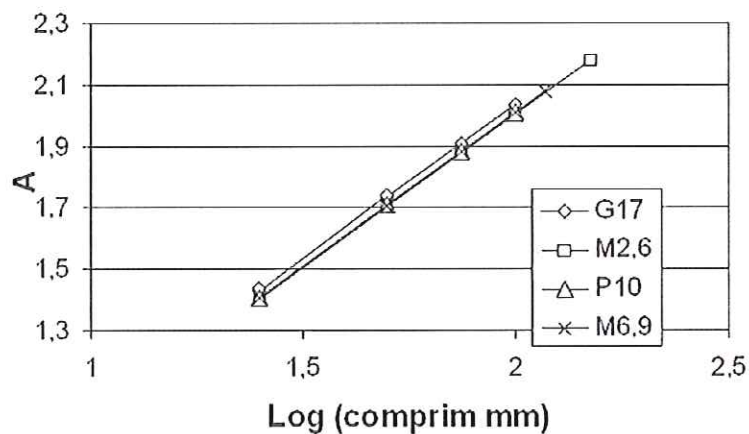


Figura 62. Comparação entre parâmetro de Intersecção e logaritmo do comprimento do perfil.

O comportamento do parâmetro de Intersecção com relação ao comprimento da amostra indica que ele é um parâmetro dependente da escala do perfil de rugosidade.



Para aplicar efetivamente o parâmetro de Intersecção é preciso adimensionalizá-lo. Será utilizada a Equação 32 para determinar o Peso Fractal.

Determinado o valor do Peso Fractal, interpretou-se o comportamento do  $H$  em relação ao comprimento do perfil no qual foi determinado. Esta comparação é mostrada na Figura 63. Observa-se que a variação de  $H$  para cada perfil surge apenas no quarto algarismo significativo, o que indica que  $H$  pode efetivamente ser uma constante independente da escala. Esta afirmação se confirmaria analisando o comportamento da Figura 62. Dentro da precisão com que os perfis em questão foram digitalizados, a variabilidade de  $H$  é insignificante. Para esclarecer totalmente esta questão, perfis próprios deverão ser digitalizados com melhor resolução do que a que foi obtida das reproduções gráficas de figuras da literatura. A mesma metodologia para determinação de  $JRC$  também deverá ser adotada com o intuito de diminuir discrepâncias da literatura.

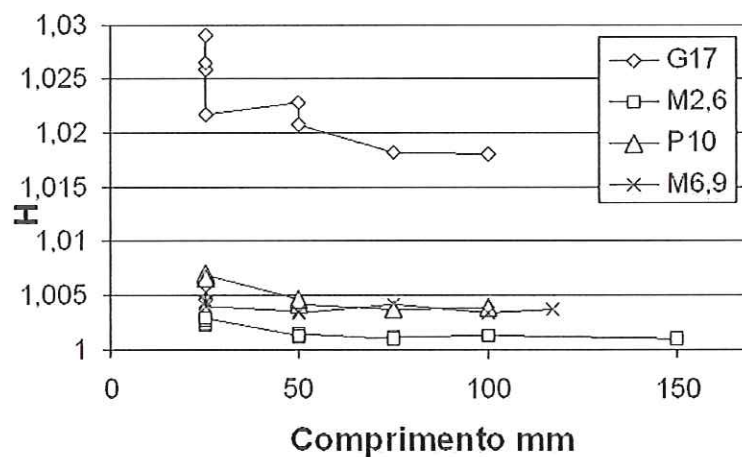


Figura 63. Comportamento de  $H$  com relação ao comprimento do perfil.

Como foi observado a Dimensão Fractal e o parâmetro de Intersecção têm uma dependência do comprimento do perfil de rugosidade. Estes parâmetros não solucionam o problema do efeito de escala da rugosidade, que se apresenta quando se quer usar dados laboratoriais em obra. Há indícios de que o Peso Fractal seja independente de escala, o que só poderá ser comprovado com dados próprios.

#### 4.3.2. CORRELAÇÃO DOS PARÂMETROS FRACTAIS NO EFEITO ESCALA

Como foi observado no tópico 4.3.1, os parâmetros fractais dependem do comprimento do perfil de rugosidade, e para ter uma alternativa de solução ao problema do efeito escala neste tópico se realizará a correlação tridimensional entre o valor do  $JRC$ ,  $DF_M$  e  $H$ . O objetivo é determinar o valor de  $JRC$  de um perfil de rugosidade com comprimento de perfil diferentes a 10 cm.

Para tal fim, serão usados os perfis de Makurat et al. (1990) com valores de  $JRC$  de 2,6; 6,9 e 4,3; perfis de Bandis et al. (1983) com valores de  $JRC$  de 5,3 e 6,8, mostrados na Figura 24. Os valores do  $JRC$  dos perfis mencionados foram obtidos mediante ensaios laboratoriais. Além destes perfis, também foram utilizados os perfis de Bandis et al. (1981), mostrados na Figura 27, identificados como perfil 1 com 36 cm de comprimento e um valor de  $JRC$  de 12. Deste perfil os autores obtiveram perfis de comprimentos de 18, 12 e 6 cm com valores de  $JRC$  de 14,4; 17 e 18 respectivamente. Os valores do  $JRC$  mencionados foram obtidos de ensaios de laboratório. Também foi utilizado o perfil 4 com 40 cm de comprimento e um valor de  $JRC$  de 8, dividido em perfis de 18, 12 e 6 cm de comprimento com seus valores de  $JRC$  de 11; 13 e 14,5. Perfil 7 com um comprimento inicial de 40 cm e um  $JRC$  de 7,5 e também foram obtidos perfis de 20, 10 e 5 cm de comprimento com valores de 11; 15,5 e 18,5 de  $JRC$  respectivamente. Finalmente o perfil 11 com um comprimento inicial de 36 cm e um valor de 4 de  $JRC$ , e perfis de 18, 12 e 6 cm de comprimento com seus valores de  $JRC$  de 3,5; 4,5 e 5 respectivamente.

Também foram usados os perfis da Figura 26, onde se mostram perfis de comprimento de 50 cm com seus respectivos valores de  $JRC$  (obtidos do relato da ISRM 1978).

Depois de mostrar os perfis usados, determinaram-se os valores de  $DF_M$ ,  $A_M$  e  $H$  de cada perfil mencionado. Na Tabela 14 se mostram todos os valores determinados. No Apêndice E é mostrado como foram determinados os valores da Dimensão Fractal parâmetro de Intersecção e Peso Fractal, para os perfis mencionados neste tópico utilizando o Método Modificado do Divisor.

Tabela 14. Valores de  $DF_M$ ,  $A_M$  e  $H$ .

Perfis	Comprimento mm	JRC	$DF_M$	$A_M$	$H$		
Makurat	150	2,6	1,0014	2,1783	1,001		
	117,2	6,9	1,0038	2,0767	1,0037		
	112,3	4,3	1,0022	2,0548	1,0021		
Bandis	113,8	5,3	1,0038	2,0596	1,0017		
	105,4	6,8	1,0038	2,0272	1,0021		
ISRM	500	20	1,0229	2,7342	1,013		
	500	10	1,004	2,7084	1,0035		
	500	5	1,0018	2,7035	1,0017		
Bandis et al.	Perfil 1	360	12	1,0083	2,5698	1,0053	
		180	14,4	1,0093	2,2683	1,0058	
		180	14,4	1,0120	2,2698	1,0064	
	120	17	1,009	2,0908	1,0056		
		17	1,0104	2,0916	1,0060		
		17	1,0098	2,0912	1,0058		
		60	18	1,0064	1,7879	1,0055	
		18	1,0070	1,7887	1,0059		
		18	1,0072	1,7884	1,0058		
	60	18	1,0080	1,7896	1,0064		
		18	1,0074	1,7888	1,0060		
		18	1,0069	1,7882	1,0056		
		Perfil 4	360	8	1,0052	2,5637	1,0029
			180	11	1,0067	2,2677	1,0055
			180	11	1,0080	2,2693	1,0062
	120	13	1,0071	2,0907	1,0055		
		13	1,0078	2,0918	1,0061		
		13	1,0084	2,0928	1,0065		
	60	14,5	1,0058	1,7852	1,0039		
		14,5	1,0041	1,7832	1,0028		
		14,5	1,0065	1,7856	1,0042		
		14,5	1,0078	1,7867	1,0048		
		14,5	1,0069	1,7876	1,0053		
		14,5	1,0080	1,7860	1,0044		
	Perfil 7	400	7,5	1,008	2,6117	1,0037	
		200	11	1,012	2,3132	1,0053	
			11	1,0105	2,3121	1,0048	
100			15,5	1,0112	2,0113	1,0056	
100		15,5	1,01	2,0102	1,0051		
		15,5	1,008	2,0087	1,0043		
		15,5	1,0118	2,011	1,0055		
		50	18,5	1,0087	1,7132	1,0084	
			18,5	1,0094	1,7150	1,0094	
18,5			1,0075	1,7130	1,0082		
18,5			1,0062	1,7120	1,0077		
18,5			1,0050	1,7118	1,0075		
18,5	1,0058	1,7123	1,0078				

Continuação da Tabela 14.

Perfil 11	360	18,5	1,0078	1,7135	1,0085
		18,5	1,0083	1,7147	1,0092
	180	4	1,001	2,5577	1,0005
		3,5	1,0025	2,2576	1,001
	120	3,5	1,0020	2,2569	1,0007
		4,5	1,004	2,0818	1,0013
		4,5	1,0049	2,0820	1,0013
	60	4,5	1,0032	2,0810	1,0009
		5	1,0057	1,7811	1,0016
		5	1,0060	1,7820	1,0022
		5	1,0065	1,7825	1,0024
		5	1,0051	1,7808	1,0015
		5	1,0046	1,780	1,0010
		5	1,0055	1,7812	1,0017

Determinados a Dimensão Fractal, parâmetro de intersecção e Peso Fractal dos perfis mencionados, pode-se analisar o comportamento destes com o comprimento do perfil e depois compará-los com as análises realizadas no tópico anterior. Para realizar estas análises se utilizaram os perfis de Bandis et al. (1981) mostrados na Figura 27, por apresentar porções de perfis com diferentes comprimentos com valores do *JRC* obtidos de ensaios laboratoriais.

Na Figura 64 se apresenta o comportamento da Dimensão Fractal em relação ao comprimento dos perfis de Bandis et al. (1981). O perfil 11 apresenta uma tendência muito clara que quanto menor o comprimento do perfil maior o valor da Dimensão Fractal. Os perfis 1, 4 e 7 apresentam tendência com inversão de comportamento, ou seja, a dimensão fractal cresce com o comprimento do perfil até certo ponto, e decresce em seguida. Entretanto, esta variação somente ocorre no quarto algoritmo significativo. Mais uma vez, a resolução gráfica dos perfis utilizados para digitalização não é suficiente para garantir que tal variação realmente aconteça, ou que ela seja resultado da imprecisão.

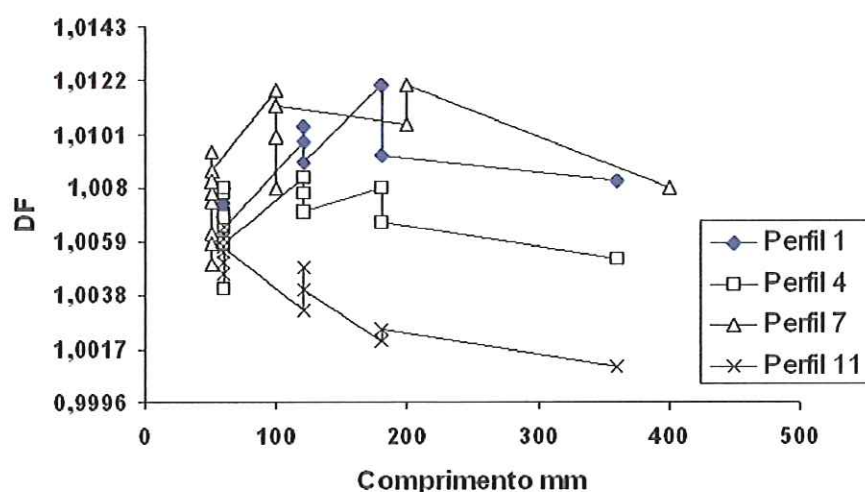


Figura 64. Comportamento da Dimensão Fractal em relação ao comprimento do perfil.

Na Figura 65 é observado o comportamento do parâmetro de Intersecção em relação ao comprimento dos perfis de Bandis et al. (1981). Como se observa, apresenta uma tendência clara que quanto menor o comprimento da porção do perfil menor o valor do parâmetro de Intersecção. Esta conclusão confirma as análises e conclusões obtidas da Figura 61.

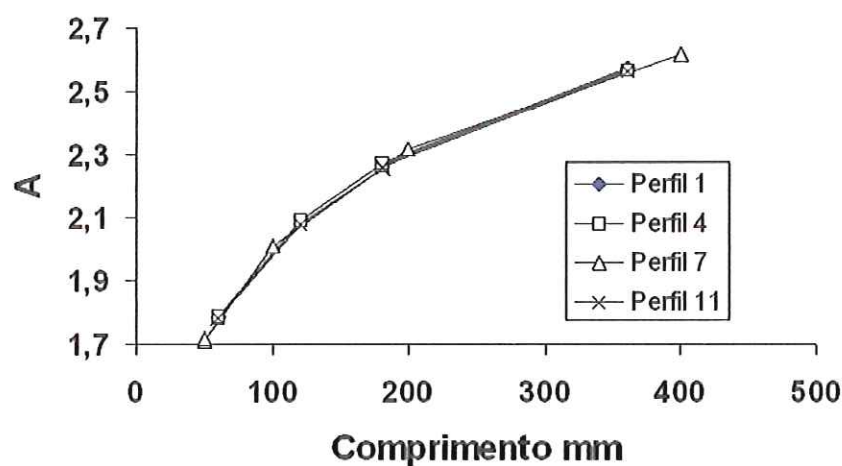


Figura 65. Comparação entre parâmetro de Intersecção e comprimento do perfil.

Os comportamentos observados na Figura 66 indicam uma tendência linear, o que mostra um comportamento constante a diferentes comprimentos do perfil. Esta análise confirma a análise feita na Figura 66.

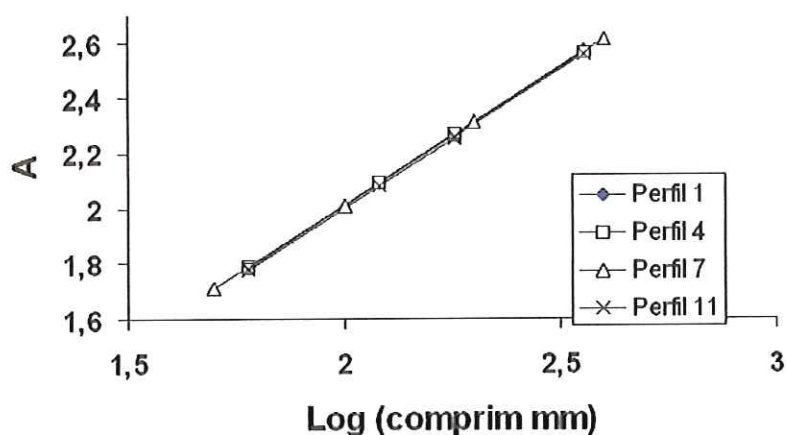


Figura 66. Relação entre o parâmetro de Intersecção e logaritmo do comprimento do perfil.

Na Figura 67 é mostrado o comportamento do Peso Fractal com relação ao comprimento das diferentes porções de perfis trabalhados de Bandis et al. (1981). As variações de  $H$  ocorreram apenas no quinto algoritmo significativo, indicando que  $H$  é constante com a escala (o mais provável) ou que o processo de digitalização não foi preciso o suficiente.

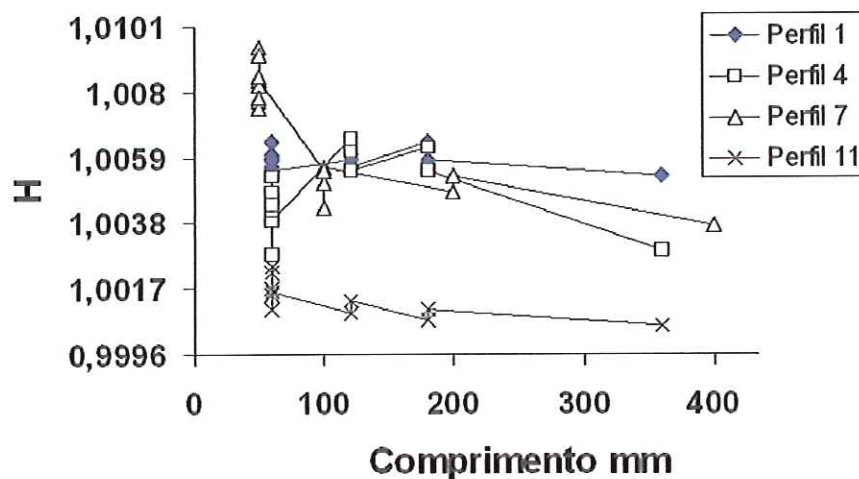


Figura 67. Comportamento de  $H$  com relação ao comprimento do perfil.

Na Figura 68 se mostra o comportamento de  $JRC$  em relação à Dimensão Fractal, no perfil 11 se observa a maior  $JRC$  maior valor da Dimensão Fractal. A menos do perfil 11, que apresenta comportamento monotônico, os demais apresentam inversão de tendência. No caso dos perfis com comprimentos de fração de perfis maiores, existe uma nuvem de valores de  $JRC$  e  $DF$  para o mesmo comprimento. Esta variação não

pôde ser determinada com dados da literatura. A Figura 68 tem então que ser encarada com reserva.

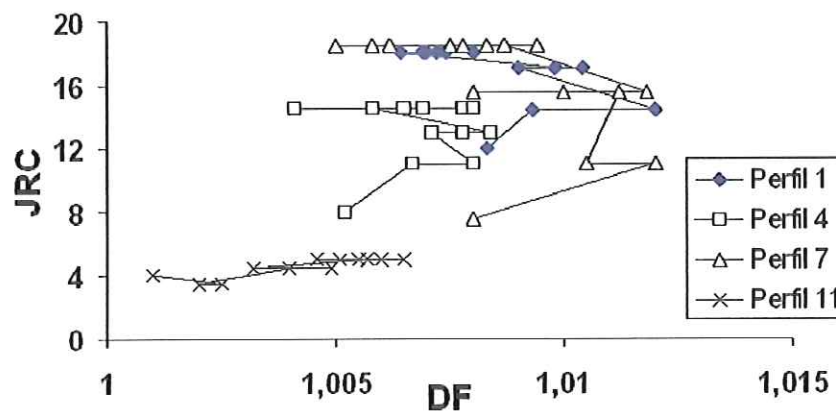


Figura 68. Comparação entre *JRC* e Dimensão Fractal dos perfis de Bandis et al. (1981).

O comportamento do *JRC* com relação ao parâmetro de Intersecção se observa na Figura 69. O maior valor de *JRC* corresponde ao menor valor do parâmetro de Intersecção. Este comportamento é mostrado por todos os perfis de rugosidade.

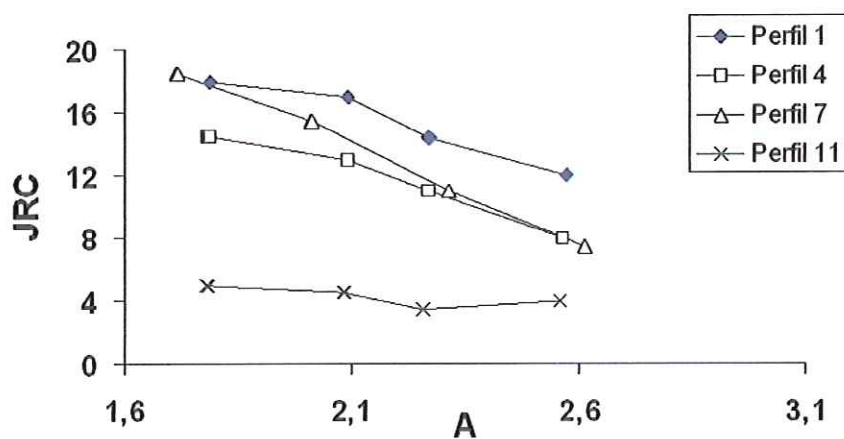


Figura 69. Comportamento do *JRC* com relação ao parâmetro de Intersecção dos perfis de Bandis et al. (1981).

Finalmente na Figura 70 se apresenta o comportamento do *JRC* com relação ao Peso Fractal. Mais uma vez, a pequena variação de *H* confirma os comentários anteriores a respeito daquele parâmetro.

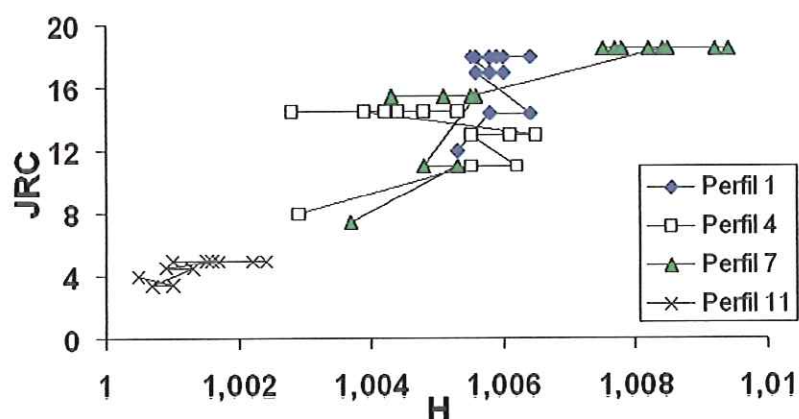


Figura 70. Comportamento do *JRC* com relação ao Peso Fractal dos perfis de Bandis et al. (1981).

Depois de analisar o comportamento dos parâmetros fractais em relação ao comprimento do perfil e o comportamento do *JRC* com relação os parâmetros fractais, continua-se com a correlação tridimensional da Dimensão Fractal e Peso Fractal com o valor do *JRC* dos perfis mencionados anteriormente utilizando o programa Statistica®5.5 para realizar as correlações. Na Figura 71 se apresenta a distribuição tridimensional dos parâmetros mencionados.

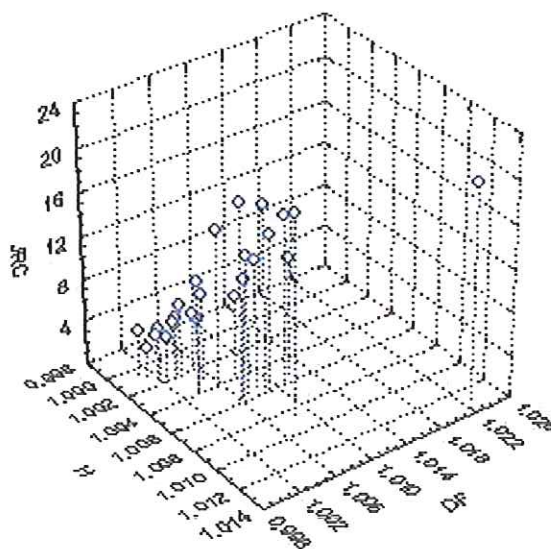


Figura 71. Valores da Dimensão Fractal, Peso Fractal com relação ao valor do *JRC* dos perfis do efeito escala.

Na Figura 72 se mostra a correlação bilinear da Dimensão Fractal, Peso Fractal e o valor do *JRC* realizado no programa Statistica®5.5.



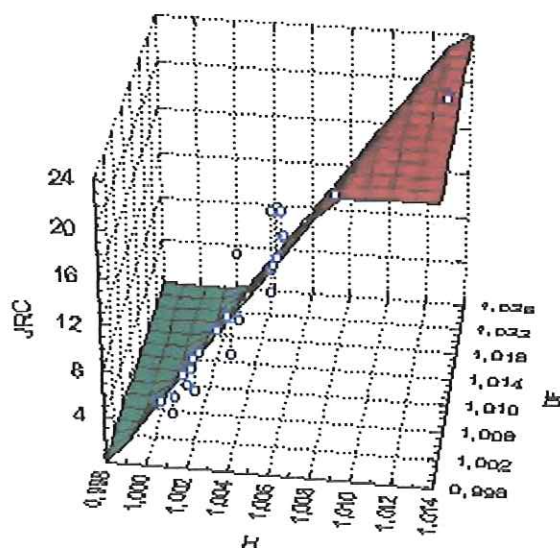


Figura 72. Correlação bilinear entre os três parâmetros no efeito escala.

Desta correlação bilinear obtém-se a seguinte equação:

$$JRC = -1866,987 + 2031,39H - 160,681DF_M \quad (36)$$

Utilizando a Equação 36 que representa a correlação bilinear, determinaram-se os valores do *JRC* e posteriormente se compararam com os valores do *JRC* da literatura, como se mostra na Figura 73. O erro médio desta análise foi de 21,8 %.

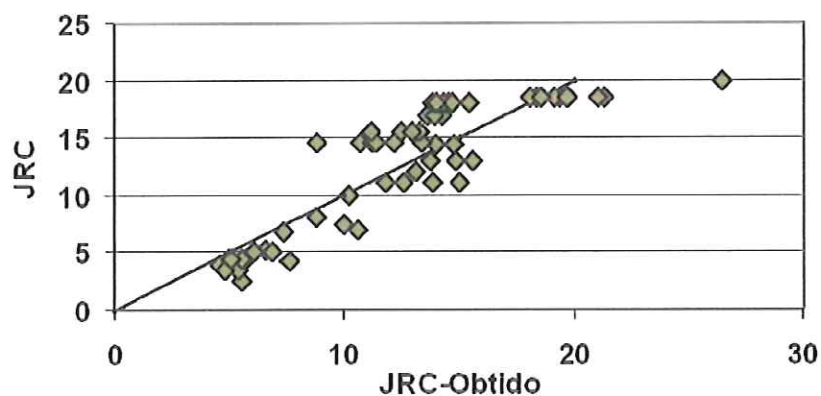


Figura 73. Comparação dos valores de *JRC* da literatura com os valores da Equação 36 onde o erro médio foi de 21,8 %.

Usando o mesmo programa, tentou-se um ajuste polinomial dos mesmos dados, mas os resultados obtidos aplicando a equação que representa este ajuste não foram adequados. Esta é apresentada na Figura 74.

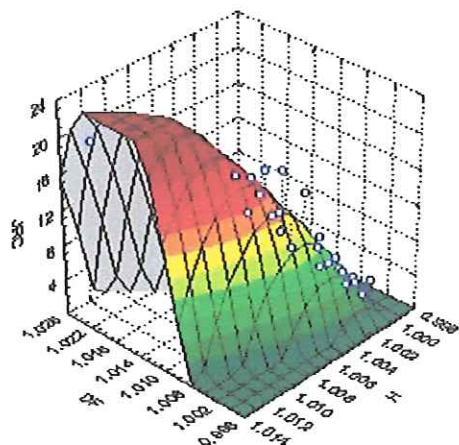


Figura 74. Correlação Polinomial para o efeito escala.

Devido ao grande erro encontrado aplicando o programa Statistica@5.5, trabalhou-se com o programa REGRESION7\_10\_3p, com este programa se realizou um ajuste quadrático obtendo a seguinte equação:

$$JRC = -150218,787 - 36186,996 * DF + 333246,722 * H - 40318,063 * DF^2 - 223251,931 * H^2 + 116729,821 * DF * H \quad (37)$$

Usando a Equação 37 se determinaram os valores do *JRC* e depois estes foram comparados com os valores do *JRC* da literatura. Desta comparação se obteve um erro médio de 17,3 %. Esta comparação é mostrada na Figura 75.

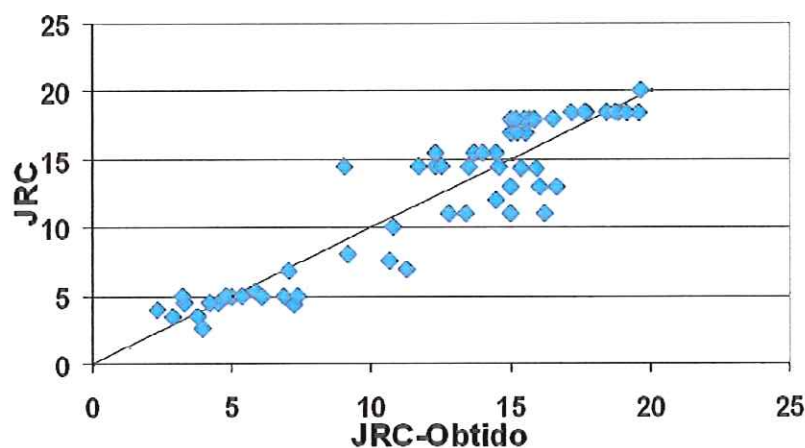


Figura 75. Comparação dos valores do  $JRC$  utilizando a Equação 37 onde o erro médio foi de 17,3 %.

Concluiu-se que a Equação 37 pode ser utilizada para determinar o valor do  $JRC$  do perfil de rugosidade no efeito de escala. Esta equação foi escolhida devido ao seu menor valor de erro médio. A equação poderia ser usada para perfis que têm um comprimento menor a 50 cm e perfis com comprimentos maiores a 5 cm preferencialmente.

Para avaliar a Equação 37 se determinou a Dimensão Fractal e Peso Fractal dos perfis de Yang & Chen (1999) com um  $JRC$  de 13,46 e com um comprimento de 20 cm, e o perfil 5 de Bandis et al. (1981) com um valor de  $JRC$  de 9 e um comprimento de 36 cm. Na Tabela 15, apresenta-se os valores obtidos aplicando a Equação 37 e também se mostra o erro obtido.

Tabela 15. Valores dos parâmetros fractais,  $JRC$  e erro obtido.

Perfis	Comprimento cm	$JRC_o$	$DF_M$	$A_M$	$H$	$JRC_C$	erro
Bandis perfil 5	36	9	1,0028	2,5619	1,0022	7,5	17 %
Yang & Chen	20	13,46	1,0062	2,3119	1,0047	13,4	0,23 %

Nesta tabela se apresentam os perfis usados na avaliação da equação, como também o comprimento do perfil, o valor do  $JRC_o$  da literatura, Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção obtidos aplicando o Método Modificado do Divisor, o Peso Fractal, o valor do  $JRC_C$  obtido aplicando a Equação 37 e finalmente o erro entre os valores da literatura e o valor achado do  $JRC_C$ .

Como se observa na tabela, o perfil de Yang & Chen (1999) tem um erro menor que o perfil de Bandis et al. (1981). Esta análise indica que a Equação 37 poderia ser usada para a determinação de  $JRC$  de um perfil em diferentes escalas.

#### 4.3.3. COMPARAÇÃO ENTRE A EQUAÇÃO DO EFEITO ESCALA COM A EQUAÇÃO 37.

Este tópico trata sobre a comparação entre a Equação do Efeito Escala da Rugosidade (Equação 19) proposta por Barton & Bandis (1982) e a Equação 37.

A finalidade é observar o comportamento da Equação 37 em relação à equação do efeito escala, para avaliar a equação obtida neste estudo.

Para realizar esta comparação serão usados os perfis dos pesquisadores Makurat et al. (1990) e Papaliangas et al. (1990). Porém, estes perfis serão divididos em perfis de 25, 50 e 75 mm, obtendo-se os valores dos  $JRC$  de cada porção do perfil aplicando a equação do efeito escala ( $JRC_n$ ). Além destes, também serão obtidos os valores de  $JRC$  aplicando a Equação 37 ( $JRC_C$ ). Para isso se usarão os valores da Dimensão Fractal e Peso Fractal de cada porção de perfil para aplicar a equação.

Na Tabela 16 são mostrados os valores dos  $JRC$  obtidos aplicando as equações antes mencionadas, como também os valores dos comprimentos dos perfis, Dimensão Fractal e Peso Fractal de cada porção de perfil.

Tabela 16. Valores dos  $JRC$  obtidos pelas equações do efeito escala (Barton & Bandis, 1982) e a Equação 37.

Perfis	Comprimento mm	$DF_M$	$H$	$JRC_n$	$JRC_C$
Makurat 2,6	150	1,0014	1,001	2,6	4,0
	100	1,0012	1,0013	2,7	4,9
	75	1,001	1,0011	2,7	4,3
	75	1,0015	1,0009	2,7	3,6
	50	1,0009	1,0015	2,8	5,5
	50	1,0006	1,0011	2,8	4,3
	50	1,0008	1,0013	2,8	4,9
	25	1,0008	1,0029	2,9	9,1
	25	1,0007	1,0026	2,9	8,4
	25	1,0006	1,0023	2,9	7,7
	25	1,0006	1,0024	2,9	7,9
	25	1,0007	1,0027	2,9	8,7
	25	1,0007	1,0028	2,9	8,9
Papaliangas 10	100	1,0074	1,0038	10	11,1

Continuação da Tabela 16.

	75	1,0073	1,0037	10,6	10,9
	50	1,007	1,0042	11,5	12,2
	50	1,0075	1,0047	11,5	13,3
	25	1,0062	1,0069	13,2	17,0
	25	1,005	1,0065	13,2	16,2
	25	1,0065	1,007	13,2	17,1
	25	1,0058	1,0066	13,2	16,5
<b>Makurat 6,9</b>	117,2	1,0038	1,0037	6,9	11,3
	100	1,0033	1,0034	7,1	10,6
	75	1,0031	1,0041	7,3	12,1
	50	1,0024	1,0033	7,8	10,3
	50	1,002	1,0035	7,8	10,7
	25	1,0021	1,004	8,5	11,7
	25	1,0029	1,0043	8,5	12,4
	25	1,0037	1,0052	8,5	14,1
	25	1,0032	1,0045	8,5	12,8

Analisa-se o comportamento entre os valores de  $JRC$  obtidos das equações do efeito escala e Equação 37 em relação ao comprimento de cada porção de perfil. Para isso, primeiramente se usarão os valores dos  $JRC$  das porções de perfis de Makurat et al. (1990) com um valor de  $JRC$  inicial de 2,6.

Como observado na Figura 76, tanto os valores do  $JRC$  obtidos da equação do efeito escala como os valores do  $JRC$  da Equação 37, aumentam quanto o comprimento do perfil diminui. Mas observando os diferentes perfis, por exemplo, o perfil de comprimento de 25 mm, percebe-se que não apresenta valores iguais, como quando se aplica a equação do efeito escala nestes perfis, pois os valores achados aplicando a Equação 37 são diferentes e em alguns casos maiores.

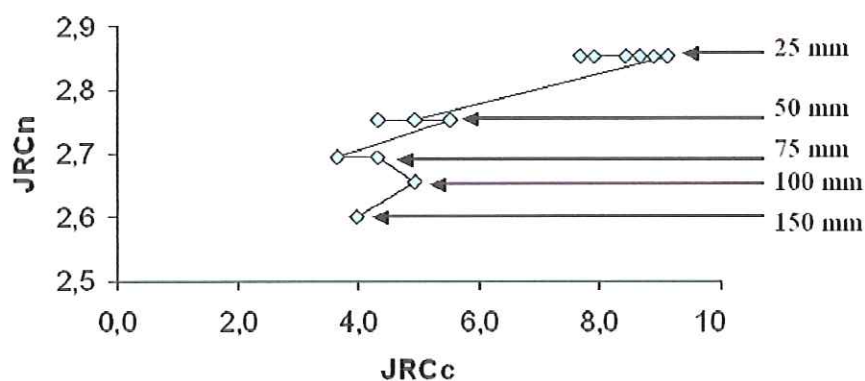


Figura 76. Comparação dos valores dos  $JRC$  usando a equação do efeito escala e Equação 37 dos perfis de Makurat et al. (1990) com  $JRC$  2,6.

Em geral, o comportamento dos valores de  $JRC$  dos perfis de Papaliangas et al. (1990), obtidos a partir das equações do efeito escala e Equação 37, é semelhante ao dos perfis mostrados na Figura 76. Ou seja, quanto menor o comprimento do perfil, maior o valor de  $JRC$ . Também foi observado que os valores de  $JRC$  de um perfil com um mesmo comprimento são diferentes e maiores que os obtidos aplicando a equação do efeito escala, como é observado na Figura 77.

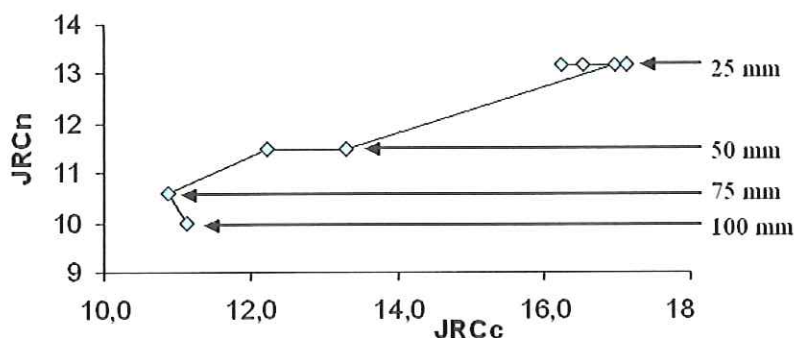


Figura 77. Comparação dos valores dos  $JRC$  da equação do efeito escala e Equação 37 dos perfis de Papaliangas et al. (1990) com  $JRC$  10.

Na Figura 78 são mostrados os valores do  $JRC$  dos perfis de Makurat et al. (1990) com valor inicial de  $JRC$  6,9. O comportamento é diferente das figuras anteriores. Aplicando a equação do efeito escala, o valor de  $JRC$  aumenta quando diminui o comprimento do perfil, mas aplicando a Equação 37 os valores do  $JRC$  são aleatórios em relação ao comprimento do perfil. Quando se comparam os valores de  $JRC$  obtidos a partir da aplicação das duas equações, percebe-se que os valores do  $JRC$  da Equação 37 são maiores que os valores do  $JRC$  da equação do efeito escala. Como exemplo, observam-se os perfis de comprimento de 25 mm.

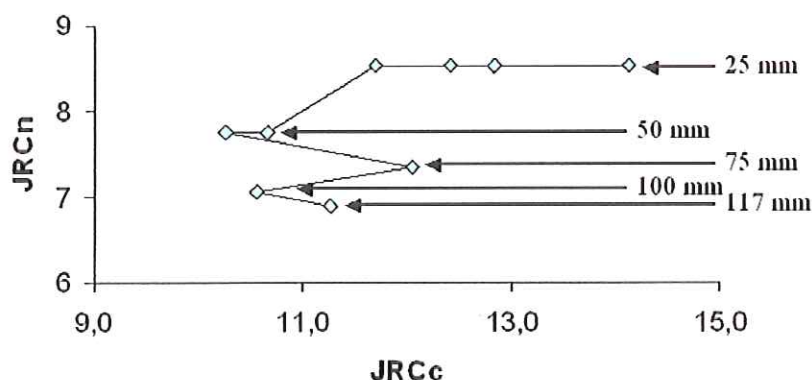


Figura 78. Valores de  $JRC$  da equação do efeito escala e Equação 37 dos perfis de Makurat et al. (1990) com  $JRC$  6,9.

Das análises realizadas anteriormente, observou-se que os valores de  $JRC$  aumentam quando diminui o comprimento do perfil, aplicando a Equação 37, em concordância com Barton & Bandis (1982) em relação à equação do efeito escala.

Outra observação foi em relação aos valores dos  $JRC$  dos perfis de um mesmo comprimento. Quando aplicada a equação do efeito escala obtêm-se valores iguais, mas quando aplicada a Equação 37 obtêm-se valores do  $JRC$  diferentes e maiores que os obtidos da equação do efeito escala, pois os perfis apresentaram valores da Dimensão Fractal e do Peso Fractal, diferentes entre cada perfil de um mesmo comprimento. Esta observação indicaria que a aplicação da equação do efeito escala teria que se realizar criteriosamente.

Estas análises indicam que a da Equação 37 dá valores diferentes, comparados com os valores da equação do efeito escala. Estas observações só podem ser feitas com a utilização de perfis próprios.

## 5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

---

De acordo com o levantamento Bibliográfico realizado, foi possível determinar três tipos de métodos para a determinação da Dimensão Fractal: métodos para determinar a Dimensão Fractal de fractais auto-semelhantes, de fractais auto-afins e os métodos adotados. Este último é baseado em métodos estatísticos para a caracterização da superfície da rugosidade, que têm uma dependência do intervalo trabalhado. Para cada grupo de métodos escolheu-se o Método das Caixas para representar os métodos da determinação da Dimensão Fractal dos fractais auto-semelhantes, o Método Modificado do Divisor para os métodos de fractais auto-afins e para representar os métodos adotados o Método do Ângulo.

Na aplicação dos métodos para determinar a Dimensão Fractal nos perfis de rugosidade escolhidos na escala de 10 cm, determinou-se que entre estes três métodos o Método Modificado do Divisor é o melhor método para determinar a Dimensão Fractal. Além da Dimensão Fractal também se analisou o parâmetro de Intersecção, cuja determinação pelo Método Modificado do Divisor também se mostrou mais apropriada.

O perfil de rugosidade pode ser quantificado tanto pela Dimensão Fractal como pelo parâmetro de Intersecção. Realizada a comparação entre ambos parâmetros, foi determinado que o parâmetro de Intersecção, obtido a partir do Método Modificado do Divisor, foi aquele que melhor quantificou o perfil de rugosidade. Nesta dissertação tentou-se interpretar o valor do parâmetro de Intersecção, e observou-se que este representa a complexidade do perfil de rugosidade. Este parâmetro foi adimensionalizado visando sua utilização na engenharia, e o resultado foi denominado de Peso Fractal ( $H$ ). As análises realizadas demonstram que o Peso Fractal também pode quantificar o perfil de uma descontinuidade. A tentativa final foi de correlacionar a Dimensão Fractal e o Peso Fractal, para poder quantificar o valor da rugosidade. O resultado obtido desta correlação foi positivo e em estudos futuros devem ser considerados na quantificação da rugosidade.



Outra conclusão importante foi com relação ao efeito escala na rugosidade que é um fator importante na mecânica das rochas. Aqui se observou o comportamento da Dimensão Fractal, parâmetro de Intersecção e Peso Fractal com relação ao efeito escala da rugosidade. Nesta análise determinou-se que os dois primeiros parâmetros dependem do comprimento do perfil de rugosidade. A Dimensão Fractal diminui quando também diminui o comprimento do perfil o mesmo acontece com o parâmetro de Intersecção. O Peso Fractal apresentou pouca ou nenhuma variação com a escala. Isto deverá ser confirmado em análises com perfis digitalizados com melhor resolução. A não dependência da escala poderá mostrar grande utilidade deste parâmetro na caracterização de rugosidades de juntas.

A correlação realizada entre a Dimensão Fractal com o Peso Fractal para quantificar o valor do *JRC* no efeito escala foi positiva e favorável, mas estudos e análises adicionais devem ser realizados para aprimorar e melhorar este estudo.

A determinação dos valores de *JRC* dos perfis típicos permitiu encontrar e observar as limitações desta pesquisa, que posteriormente podem ser superadas e melhoradas para uma adequada representação e quantificação dos perfis da rugosidade.

Da comparação entre as equações do efeito escala e a Equação 37, observou-se que as duas apresentam um mesmo comportamento em relação ao aumento do comprimento do perfil. Mas, a Equação 37 apresenta valores diferentes em perfis de um mesmo comprimento. Estas análises têm que se aprimorar e melhorar com a utilização de perfis próprios.

Finalizado este estudo pode-se recomendar que a Teoria Fractal é uma ferramenta muito importante e útil nos estudos de quantificação de rugosidade, porém seu uso é meritório em futuras pesquisas, tanto da área da Mecânica de Rochas como também em áreas afins.

Outra recomendação é criar um banco de dados de perfis de rugosidade digitalizados ou/e medidos com resolução adequada a partir de rugosímetros, com a finalidade de aprimorar este estudo.

## 6. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

---

ALMQUIST, N. et al. (1995). Roughness determination of plasma-modified surface layers with atomic force microscopy. *Thin Solid Films*, Lousanne, n.270, n.1/2, p.426–430, Dec.

AUTODESK COPYRIGHT©1997, AutoCAD®Release 14.0, Autodesk, Inc.

BANDIS, S.; LUMSDEN, A.C.; BARTON, N.R. (1981). Experimental studies of scale effects on the shear behavior of rock joints. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, Oxford, v.18, n.1, p.1–21, Feb.

\_\_\_\_\_. (1983). Fundamentals of rock joint deformation. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, Oxford, v.20, n.6, p.249–268, Dec.

BARTON, N.; BANDIS, S. (1982). Effects of Block Size on the Shear Behavior of Jointed Rock. *23° USSYMP on Rock Mechanics*. Berkeley.

BARABÁSI, A.; STANLEY, H. (1995). *Fractal concepts in surface growth*. Cambridge: University Press.

BARNESLEY, M.F. et al. (1988). *The science of fractal images*. New York: Springer-Verlag.

BARTON, N. (1976). The shear strength of rock and rock joint. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, Oxford, v.13, n.9, p.255–279, Sept.

BARTON, N.; BANDIS, S.; BAKHTAR, K. (1985). Strength, deformation and conductivity coupling of rock joints. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, Oxford, v.22, n.3, p.121–140, June.

BARTON, N.; CHOUBEY, V. (1977). The shear strength of rock joint in theory and practice. *Rock Mechanics*, Vienna, v.10, p.1–54.

BARTON, N.; DE QUADROS, E.F. (1997). Joint aperture and roughness in the prediction of flow and groutability of rock masses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Oxford, v.34, n.3/4, p.700, Apr./June.

BEER, A.J.; STEAD, D.; COGGAN, J.S. (2002). Estimation of the joint roughness coefficient (JRC) by visual comparison. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Wien, v.35, n.1, p.65–74, Feb.

BELEM, T.; HOMAND-ETIENNE, F.; SOULEY, M. (1997). Fractal analysis of shear joint roughness. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Oxford, v.34, n.3/4, p.395, Apr./June.

- \_\_\_\_\_. (2000). Quantitative parameters for rock joint surface roughness. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, Wien, v.33, n.4, p.217-242, Oct.
- BOULON, M.J. et al. (1993). Influence of rock joint degradation on hydraulic conductivity. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, Oxford, v.30, n.7, p.1311-1317, Dec.
- BROWN, S.R. (1987a). Fluid flow through rock joint: the effect of surface roughness. **Journal of Geophysical Research**, Washington, v.92, n.B2, p.1337-1347.
- \_\_\_\_\_. (1987b). A note on the description of surface roughness using fractal dimension. **Geophysical Research Letters**, Vol. 14, No 11, pp. 1095 – 1098.
- \_\_\_\_\_. (1988). Correction to “a note on the description of surface roughness using fractal dimension”. **Geophysical Research Letters**, Washington, v.15, n.3, p.286.
- BUNDE, A.; HAVLIN, S. (1995). **Fractals in science**. Berlin: Springer-Verlag.
- BYRON, M.H. (1996). **Shear strength and fractal analysis of rock discontinuities**. Thesis (Ms) – The University of Tennessee, Knoxville.
- CARR, J.R. (1989). Fractal characterization of joint surface roughness in welded tuff at Yucca Mountain, Nevada. In: U.S.SYMPOSIUM ON ROCK MECHANICS, 30, 1989, Morgantown. **Rock mechanics as a guide for efficient utilization of natural resources: proceedings...**Rotterdam: A.A.Balkema. p.193–200.
- \_\_\_\_\_. (1997). Statistical self-affinity, fractal dimension and geologic interpretation. **Engineering Geology**, Amsterdam, v.48, n.3/4, p.269-282, Dec.
- CARR, J.R.; WARRINER, J.B. (1987). Rock mass classification using fractal dimension. In: U.S.SYMPOSIUM ON ROCK MECHANICS, 28., 1987, Tucson. **Proceedings...** Rotterdam: A.A.Balkema. p.73–80.
- CASTAING, C. et al. (1997). Scale effects in natural fracture networks. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, Oxford, v.34, n.3/4, p.389, Apr./June.
- CHARKALUK, E.; BIGERELLE, M.; IOST, A. (1998). Fractals and fracture. **Engineering Fracture Mechanics**, New York, v.61, n.1, p.119-139, Aug.
- CHEN, Z. et al. (2000). An experimental investigation of hydraulic behavior of fractures and joints in granitic rock. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, Oxford, v.37, n.7, p.1061-1071, Oct.
- CHESTERS, S.; WANG, H.; KASPER, G. (1991). A fractal-based method for describing surface texture. **Solid State Technology**, New York, v.34, n.1, p.73-77, Jan.
- CHRISTOFOLETTI, A.L.H.; CRISTOLETTI, A. (1995). A abordagem fractal em geociências. v.14, n.1, p.227-264.

- CLERICI, A.; GRIFFINI, L.; POZZI, R. (1990). Procedure for the execution of detailed geomechanical structural surveys on rock masses with a rigid behavior. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MECHANICS OF JOINTED AND FAULTED ROCK, 1990, Vienna. **Mechanics of jointed and faulted rock: proceedings...** Rotterdam: A.A.Balkema. p.87-94.
- COCHRAN, W.; LEWIS, R.; HART, J. (2001). The normal of a fractal surface. **The Visual Computer**, New York, v.17, n.4, p.209-218, June.
- COPPENS, M. (2001). Characterization of fractal surface roughness and its influence on diffusion and reaction. **Colloids and Surfaces A: physicochemical and engineering aspects**, Amsterdam, v.187/188, p.257-265, Aug.
- DAVIES, S.; HALL, P. (1999). Fractal analysis of surfaces roughness by using spatial data. **Journal of the Royal Statistical Society: series B**, London, v.61, n.1, p3-37.
- DEN OUTER, A.; KAASHOEK, J.F.; HACK, H.R. (1995). Difficulties with using continuous fractal theory for discontinuity surface. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, Oxford, v.32, n.1, p.3-9, Jan.
- DIGHT, P.M.; CHIU, H.K. (1981). Prediction of shear behavior of joints using profiles. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, Oxford, v.18, n.5, p.369-386, Oct.
- DROLON, H. et al. (1999). Wavelet analysis of sand grain roughness. **Earth & Sciences**, v.328, p.457-461.
- ELSWORTH, D.; GOODMAN, R.E. (1986). Characterization of rock fissure hydraulic conductivity using idealized wall roughness profiles. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, Oxford, v.23, n.3, p.233-243.
- ESAKI, T. et al. (1999). Development of a shear-flow test apparatus and determination of coupled properties for a single rock joint. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, Oxford, v.36, n.5, p.641-650, July.
- EZZEDINE, S.; DE MARSILY, G. (1993). Study of transient flow in hard fractured rocks with a discrete fracture network model. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, Oxford, v.30, n.7, p.1605-1609, Dec.
- FARDIN, N.; STEPHANSSON, O.; JING, L. (2001). The scale dependence of rock joint surface roughness. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, Oxford, v.38, n.5, p.659-669, July.
- FECKER, E.; RENGERS, N. (1971). Measurement of large scale roughness of rock planes by means of profilograph and geological compass. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ROCK FRACTURE.

- FEDER, J. (1989). *Fractals*. New York: Plenum.
- GHOSH, A.; DAEMEN, J.K. (1992). Fractal characteristics of rock discontinuities. *Engineering Geology*, Amsterdam, v.34, n.1/2, p.1-9, May.
- GOODMAN, R.E. (1989). *Introduction to rock mechanics*. 2<sup>nd</sup>ed. New York: John Wiley.
- GOPALAKRISHNAN, S. (1994). *Development of a prototype system for on-line monitoring of surface roughness using fractal geometry*. Thesis (Ms) - Institute for Systems Research.
- GOPALAKRISHNAN, S.; ZHANG, G. (1994). *On-line assessment of surface roughness through fractal geometry*. Institute for Systems Research.
- GRASSELLI, G. (2001). *Shear strength of rock joints based on quantified surface description*. Thesis (Docteur es Sciences) - Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, Univeristá di Parma, Italia.
- GRASSELLI, G.; LAUSANNE, S.; EGGER, P. (2000). 3D Surface characterization for the prediction of the shear strength of rough joints. In: ISRM REGIONAL SYMPOSIUM EUROCK2000, 2000, Aachen. *Proceedings....* p.281–286.
- HALL, P.; KIRK, D. (1996). Effects of smoothing on multivariate statistical properties of the normal to a rough curve of surface. *Journal of Multivariate Analysis*, New York, v.59, n.2, p.217-229, Nov.
- HOEK, E.; BRAY, J.W. (1996). *Rock slope engineering*. 3<sup>rd</sup>ed. London: Institution of Mining and Metallurgy.
- HOPKINS, D.L. (1995). The effect of joint geometry and composite surface roughness on shear strength and failure. In: CONFERENCE ON FRACTURED AND JOINTED ROCK MASSES, 1992, Lake Tahoe. *Fractured and jointed rock masses: proceedings...* Rotterdam: A.A.Balkema. p.399-406.
- HSIUNG, S.M. et al. (1993). Assessment of conventional methodologies for joint roughness coefficient determination. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, Oxford, v.30, n.7, p.825-829, Dec.
- HUANG, T.H.; DOONG, Y.S.; SHENG, J. (1990). Measurement of rock joint roughness and its directional shear strength. INTERNATIONAL CONFERENCE ON MECHANICS OF JOINTED AND FAULTED ROCK, 1990, Vienna. *Mechanics of joint and faulted rock: proceedings...* Rotterdam: A.A.Balkema. p.337-343.
- HUANG, S.L.; OELFKE, S.M.; SPECK, R.C. (1992). Applicability of fractal characterization and modelling to rock joint profiles. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, Oxford, v.29, n.2, p.89-98, Mar.

HUBSON, J.A. (1993). **Comprehensive rock engineering: principles, practice & projects**. Oxford: Pergamon.

HYSLIP, J.P.; VALLEJO, L.E. (1997). Fractal analysis of the roughness and size distribution of granular materials. **Engineering Geology**, Amsterdam, v.48, n.314, p.231-244, Dec.

INDRARATNA, B.; HERATH, A.; AZIZ, N. (1995). Characterization of surface roughness and its implications on the shear behavior of joints. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MECHANICS OF JOINTED AND FAULTED ROCK, **Mechanics of jointed and faulted rock: proceedings...** Rotterdam: A.A.Balkema. p.515-520.

INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS (1978). Commission on standardization of laboratory and field tested: suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, Oxford, v.15, n.6, p.319-368, Dec.

JERMY, C.A. (1995). A laser scanning device to measure joint surface roughness. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MECHANICS OF JOINTED AND FAULTED ROCK. **Mechanics of jointed and faulted rock: proceedings...** Rotterdam: A.A.Balkema. p.169-174.

JIUNN-JONG, W. (2000). Characterization of fractal surface. **Wear**, Amsterdam, v.239, n.1, p.36-47, Apr.

KABEYA, K.K.; LEGGE, T.F.H. (1997). Relationship between grain size and some surface roughness parameters of rock joints. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, Oxford, v.34, n.3/4, p.528, Apr./June.

KRAHN, J.; MORGENSTERN, N.R. (1979). The ultimate frictional resistance of rock discontinuities. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, Oxford, v.16, n.2, p.127-133, Apr.

KRIM, J. et al. (1993). Scanning tunneling microscopy observation of self-affine fractal roughness in ion-bombarded film surfaces. **Physical Review Letters**, Woodbury, v.70, n.1, p.57-61.

KULATILAKE, P.H.S.W.; FIEDLER, R.; PANDA, B. (1997). Box fractal dimension as a measure of statistical homogeneity of jointed rock masses. **Engineering Geology**, Amsterdam, v.48, n.3/4, p.217-229, Dec.

KULATILAKE, P.H.S.W.; UM, J. (1997). Requirements for accurate quantification of self-affine roughness using the roughness-length method. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, Oxford, v.34, n.3/4, p.392-393, Apr./June.

\_\_\_\_\_. (1999). Requirements for accurate quantification of self-affine roughness using the method. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, Oxford, v.36, n.1, p.5-18, Jan.

KULATILAKE, P.H.S.W.; UM, J.; PAN, G. (1997). Requirements for accurate estimation of fractal parameters for self-affine roughness profiles using the line scaling method. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, Wien, v.30, n.4, p.181-206.

KWASNIEWSKI, M.A.; WANG, J.A. (1997). Surface roughness evolution and mechanical behavior of rock joints under shear. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, Oxford, v.34, n.3/4, p.709, Apr./June.

LA POINTE, P.R. (1997). Flow compartmentalization and effective permeability in 3D fractal fracture networks. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, Oxford, v.34, n.3/4, p.390, Apr./June.

LANARO, F. (2000). A random field model for surface roughness and aperture of rock fractures. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, Oxford, v.37, n.8, p.1195-1210, Dec.

LARSSON, J.; BIWA, S.; STORAKERS, B. (1999). Inelastic flattening of rough surfaces. **Mechanics of Materials**, Amsterdam, v.31, n.1, p.29-41, Jan.

LEE, Y.H. et al. (1990). The fractal dimension as a measure of the roughness of rock discontinuity profiles. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, Oxford, v.27, n.6, p.453-463, Dec.

LEE, H.S.; CHO, T.F. (2002). Hydraulic characteristics of rough fractures in linear flow under normal and shear load. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, Wien, v.35, n.4, p.299-318, Oct.

MAERZ, N.H.; FRANKLIN, J.A. (1990). Roughness scale effects and fractal dimension. In: **INTERNATIONAL WORKSHOP SCALE EFFECTS IN ROCK MASSES. Scale effects in rock masses: proceedings...** Rotterdam: A.A.Balkema. p.121-126.

MAERZ, N.H.; FRANKLIN, J.A.; BENNETT, C.P. (1990). Joint roughness measurement using shadow profilometry. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, Oxford, v.27, n.5, p.329-343, Oct.

MAJUMDAR, A.; TIEN, C.L. (1990). Fractal characterization and simulation of rough surfaces. **Wear**, Amsterdam, v.136, n.2, p.313-327, Mar.

MAKURAT, A. et al. (1990). Jointed rock mass modelling. In: **INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ROCK JOINTS, 1990, Loen. Rock joints: proceedings...** Rotterdam: A.A.Balkema. p.647-656.

\_\_\_\_\_. (1995). The decovalox test – case one. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences Geomechanics Abstracts**, Oxford, v.32, n.5, p.399-408, July.

MANDELBROT, B. (1983). **The fractal geometry of nature**. New York: W.H.Freeman.

\_\_\_\_\_. (1990). What is it, and what does it do?. In: FLEISCHMANN, M. (Ed.). **Fractals in the natural sciences : a discussion**. New Jersey : Princeton University Press.

\_\_\_\_\_. (1991). **Objectos fractais: forma, acaso e dimensão seguida de panorama da linguagem fractal**. Tradução de Carlos Fiolhais e José Luis Malaquias. Lisboa: Gradiva.

MATSUKI, K. et al. (2001). Time-dependent closure of a fracture with rough surfaces under constant normal stress. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, Oxford, v.38, n.5, p.607-619, July.

MCWILLIAMS, P.C.; KERKERING, J.C.; MILLER, S.M. (1990). Fractal characterization of rock fracture roughness for estimating shear strength. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MECHANICS OF JOINTED AND FAULTED ROCK, 1990, Vienna. **Mechanics of jointed and faulted rock: proceedings...** Rotterdam: A.A.Balkema. p.331-336.

MESQUITA, A. (2003). **Geometria fractal**. Disponível em: <<http://www.albertomesquita.net/am/fractais/fractais2.htm>>. Acesso em: 15 out.

MICROSOFT CORPORATION COPYRIGHT©1985-1999, Microsoft®Excel 2000.

MILLER, S.M.; MCWILLIAMS, P.C.; KERKERING, J.C. (1989). Evaluation of stereo digitizing for measuring rock fracture roughness. In: U.S. SYMPOSIUM ON ROCK MECHANICS, 30., 1989, Morgantown. **Rock mechanics as a guide for efficient utilization of natural resources: proceedings...** Rotterdam: A.A.Balkema. p.201-208.

MURALHA, J. (1991). Aplicações da teoria fractal à geotecnia. **Geotecnia**, Lisboa, n.63, p.43-74.

\_\_\_\_\_. (1995). Fractal dimension of joint roughness surfaces. In: CONFERENCE ON FRACTURED AND JOINTED ROCK MASSES, 1992, Lake Tahoe. **Fractured and joint rock masses: proceedings...** Rotterdam: A.A.Balkema. p.205-212.

MURALHA, J.; CHARRUA-GRAÇA, J.G. (1990). An experience on the application of fractal theory to basic shear strength studies. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ROCK JOINTS, 1990, Loen. **Rock joints: proceedings...** Rotterdam: A.A.Balkema. p.667-671.

ODLING, N.E. (1994). Natural fracture profiles, fractal dimension and joint roughness coefficients. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, Wien, v.27, n.3, p.135-153.

OLSSON, R.; BARTON, N. (2001). An improved model for hydromechanical coupling during shearing of rock joints. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, Oxford, v.38, n.3, p.317-329, Apr.



- OSUNA, J.A. (2003). Disponível em:<<http://www.mecd.es/mem2000/matefoto/libro/intro/intro.htm>>. Acesso em: 20 jul.
- PAL, S.K.; CHAKRAVARTY, D. (2003). Rock-mass characterization using fractals. In: NATIONAL CONFERENCE ON NONLINEAR SYSTEMS & DYNAMICS, p.217-220.
- PALASANTZAS, G.; DE HOSSON, J.Th. (2000). Roughness effect on the measurement of interface stress. *Acta Materialia*, Oxford, v.48, n.14, p.3641-3645, Sept.
- PAPALIANGAS, T. et al. (1990). Shear strength of modelled filled rock joints. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ROCK JOINTS, 1990, Loen. **Rock joints: proceedings...** Rotterdam: A.A.Balkema. p.275-282.
- PIGGOTT, A.R.; ELSWORTH, D. (1995). A comparison of methods of characterizing fracture surface roughness. In: CONFERENCE ON FRACTURED AND JOINTED ROCK MASSES, 1992, Lake Tahoe. **Fractured and joint rock masses: proceedings...** Rotterdam: A.A.Balkema.
- PYRAK-NOLTE, L.J.; MORRIS, J.P. (2000). Single fractures under normal stress: the relation between fracture specific stiffness and fluid flow. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, Oxford, v.37, n.1/2, p.245-262, Jan.
- REEVES, M.J. (1985). Rock surface roughness and frictional strength. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, Oxford, v.22, n.6, p.429-442, Dec.
- REGRESION7\_10\_3p (2003), Software didáctico para Matemática e Engenharia, Docente Principal Angel Sangiacomo Carazas, Departamento de Matemática, Facultad de Ciencias Naturales y Formales, Universidad Nacional de San Agustín.
- RODRIGUES, M.H. (1997). **Análise fractal de redes de canais de bacias hidrográficas na escala 1:50.000**. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1997.
- ROKO, R.O.; DAEMEN, J.J.K.; MYERS, D.E. (1997). Variogram characterization of joint surface morphology and asperity deformation during shearing. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, Oxford, v.34, n.1, p.71-84, Jan./Mar.
- RUSS, J.C. (1998). Fractal dimension measurement of engineering surfaces. **International Journal of Machine Tools Manufacture**, New York, v.38, n.5/6, p.5567-571, May.
- RUTQVIST, J. (1995). Determination of hydraulic normal stiffness of fractures in hard rock from well testing. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, Oxford, v.32, n.5, p.513-523, July.

- SABBADINI, S.; HOMAND-ETIENNE, F.; BELEM, T. (1995). Fractal and geostatistical analysis of rock joint roughness before and after shear tests. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MECHANICS OF JOINTED AND FAULTED ROCK. **Mechanics of jointed and faulted rock: proceedings...** Rotterdam: A.A.Balkema. p.535-541.
- SAEB, S.; AMADEI, B. (1989). Effect of boundary conditions on the shear behavior of a dilatant rock joint. In: U.S. SYMPOSIUM ON ROCK MECHANICS, 30., 1989, Morgantown. **Rock mechanics as a guide for efficient utilization of natural resources: proceedings...** Rotterdam: A.A.Balkema. p.107-114.
- SAKELLARIOU, M.; NAKOS; B.; MITSAKAKI, C. (1991). On the fractal character of rock surfaces. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, Oxford, v.28, n.6, p.527-533, Nov.
- SEIDEL, J.P.; HABERFIELD, C.M. (1995). The use of fractal geometry in a joint shear model. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MECHANICS OF JOINTED AND FAULTED ROCK. **Mechanics of jointed and faulted rock: proceedings...** Rotterdam: A.A.Balkema. p.529-534.
- \_\_\_\_\_. (1995). Towards an understanding of joint roughness. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, Wien, v.28, n.2, p.69-72.
- SHI, W.M.; LIM, S.P.; LEE, K.S. (1995). A fractal surface and its measurement by computer simulation. **Optics & Laser Technology**, Guildford, v.27, n.5, p.331-333, Oct.
- SHIRONO, T.; KULATIKE, P.H.S.W. (1997). Accuracy of the spectral method in estimating fractal/spectral parameters for self-affine roughness profiles. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, Oxford, v.34, n.5, p.789-804, July.
- SILBERSCHMIDT, V.V.; SILBERSCHMIDT, V.Y. (1990). Fractal approaches in mechanics of jointed rocks. INTERNATIONAL CONFERENCE ON MECHANICS OF JOINTED AND FAULTED ROCK, 1990, Vienna. **Mechanics of joint and faulted rock: proceedings...** Rotterdam: A.A.Balkema. p.83-86.
- SILVA, J.M.; AYRES DA SILVA, L.A. (1998). Determination of secondary roughness of rock discontinuities surfaces by scanning devices. In: SOUTH AMERICAN CONFERENCE IN ROCK MECHANICS, 5./BRAZILIAN CONFERENCE IN ROCK MECHANICS, 2., 1998, Santos. **Design and construction in mining, petroleum and civil engineering: proceedings...** São Paulo: EPUSP. p.29-34.
- SILVA, J.M.; AYRES DA SILVA, L.A.; BRANDÃO, R. (1998). Program to JRC determination. In: SOUTH AMERICAN CONFERENCE IN ROCK MECHANICS, 5./BRAZILIAN CONFERENCE IN ROCK MECHANICS, 2., 1998, Santos. **Design and construction in mining, petroleum and civil engineering: proceedings...** São Paulo: EPUSP. p.35-38.



StatSoft, Inc. (1996). STATISTICA for Windows (Computer program manual). Tulsa, Ok: StatSoft, Inc., 2300 East 14<sup>th</sup> Street, Tulsa, Ok 74104, phone: (918) 749-1119, fax: (918) 749-2217, email: [info@statsoftinc.com](mailto:info@statsoftinc.com), WEB: <http://www.statsoftinc.com>

SWAN, G. (1983). Determination of stiffness and other joint properties from roughness measurements. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Wien, v.16, , p.19-38.

TAO, Q.; LEE, H.P.; LIM, S.P. (2001). Contact mechanics of surfaces with various models of roughness descriptions. *Wear*, Amsterdam, v.249, n.7, p.539-545, July.

THOMAS, T.R.; ROSÉN, B.G.; AMINI, N. (1999). Fractal characterisation of the anisotropy of rough surfaces. *Wear*, Amsterdam, v.232, n.1, p.41-50, Sept.

TSE, R.; CRUDEN, D.M. (1979). Estimating joint roughness coefficients. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, Oxford, v.16, n.5, p.303-307, Oct.

TURK, N. et al. (1987). Characterization of rock joint surfaces by fractal dimension. In: U.S. SYMPOSIUM ON ROCK MECHANICS, 28., 1987, Tucson. *Proceedings...* Rotterdam: A.A.Balkema. p.1223-1236.

WAKABAYASHI, N.; FUKUSHIGE, I. (1995). Experimental study on the relation between fractal dimension and shear strength. In: CONFERENCE ON FRACTURED AND JOINTED ROCK MASSES, 1992, Lake Tahoe. *Fractured and joint rock masses: proceedings...* Rotterdam: A.A.Balkema. p.119-124.

WANG, H.; XU, Z. (2001). A class of rough surfaces and their fractal dimensions. *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, New York, v.259, n.2, p.537-553, July.

WARREN, T.L.; KRAJCINOVIC, D. (1996). Random cantor set models for the elastic-perfectly plastic contact of rough surfaces. *Wear*, Amsterdam, v.196, n.1/2, p.1-15, Aug.

WEISSBACH, G. (1978). A new method for the determination of the roughness of rock joints in the laboratory. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, Oxford, v.15, n.3, p.131-133, June.

WITHERSPOON, P.A. et al. (1979). Validity of cubic law for fluid flow in a deformable rock fracture. Technical Information Report No 23.

WU, H.; ALI, M. (1978). Statistical representation of joint roughness. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences Geomechanics Abstracts*, Oxford, v.15, n.5, p.259-262, Oct.

XIE, H. (1993). *Fractals in rock mechanics*. Rotterdam: A.A.Balkema.

XIE, H.; PARISEAU, W. (1995). Fractal estimation of joint roughness coefficients. In: CONFERENCE ON FRACTURED AND JOINTED ROCK MASSES, 1992, Lake

Tahoe. **Fractured and joint rock masses: proceedings...** Rotterdam: A.A.Balkema. p.125-131.

XIE, H.; WANG, J.; XIE, W. (1997). Fractal effects of surface roughness on the mechanical behavior of rock joints. **Chaos, Solutions & Fractals**, Tarrytown, v.8, n.2, p.221-252, Feb.

XIE, H.; WANG, J. (1999). Direct fractal measurement of fracture surface. **International Journal of Solids and Structures**, New York, v.36, n.20, p.3073-3084, July.

XIE, H.; WANG, J.; KWASNIEWSKI, M.A. (1999). Multifractal characterization of rock fracture surfaces. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, Oxford, v.36, n.1, p.19-27, Jan.

YANG, Z.Y.; CHEN, G.L. (1999). Application of the self-affinity concept to the scale effect of joint roughness. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, Wien, v.32, n.5, p.221-229, July.

YANG, Z.Y.; DI, C.C. (2001). A directional method for directly calculating the fractal parameters of joint surface roughness. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, Oxford, v.38, n.8, p.1201-1210, Dec.

YANG, Z.Y.; DI, C.C.; YEN, K.C. (2001). The effect of asperity order on the roughness of rock joints. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, Oxford, v.38, n.5, p.745-752, July.

YEO, I.W.; FREITAS, M.H.; ZIMMERMAN, R.W. (1998). Effect of shear displacement on the aperture and permeability of a rock fracture. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, Oxford, v.35, n.8, p.1051-1070, Dec.

YOSHINAKA, R. et al. (1993). Scale effects on shear strength and deformability of rock joints. In: **INTERNATIONAL WORKSHOP ON SCALE EFFECTS IN ROCK MASSES**, 2., 1993, Portugal. **Scale effects in rock masses: proceedings...** Rotterdam: A.A.Balkema. p.143-149.

YORDANOV, O.I.; IVANOVA, K. (1995). Description of surface roughness as an approximate self-affine random structure. **Surface Science**, Amsterdam, v.331/333, parte 2, p.1043-1049, July.

YU, X.; VAYSSADE, B. (1990). Joint profiles and their roughness parameters. In: **INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ROCK JOINTS**, 1990, Loen. **Rock joints: proceedings...** Rotterdam: A.A.Balkema. p.781-785.

ZHANG, X.; SANDERSON, D.J. (1996). Numerical modeling of the effects of fault slip on fluid flow around extensional faults. **Journal of Structural Geology**, Oxford, v.18, n.1, p.109-119, Jan.

ZRIBI, M.; CIARLETTI, V.; TACONET, O. (2000). Validation of a rough surface model based on fractional brownian geometry with SIRC and erasme radar data over orgeval. **Remote Sensing of Environment**, New York, v.73, n. 1, p.65-72, July.

APÊNDICE A – Determinação da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção dos perfis de Barton & Choubey (1977) e de Grasselli (2001), Bandis et al. (1983), Beer et al. (2002), Makurat et al. (1990) e Papaçiangas et al. (1990) utilizando o Método Modificado do Divisor.

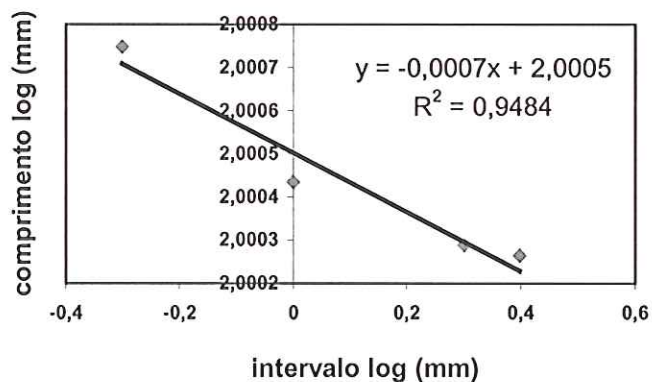


Figura A1. Determinação da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção do perfil 1 dos perfis de Barton & Choubey (1977).

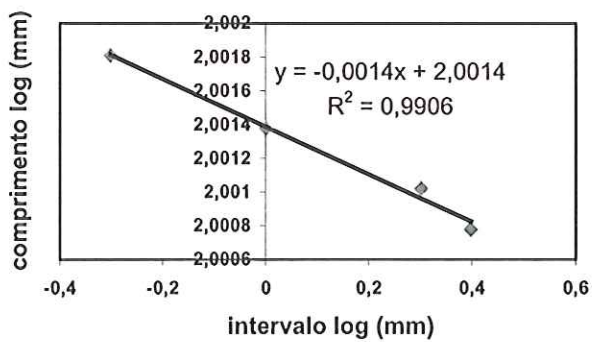


Figura A2. Obtenção da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção do perfil 2 dos perfis de Barton & Choubey (1977).

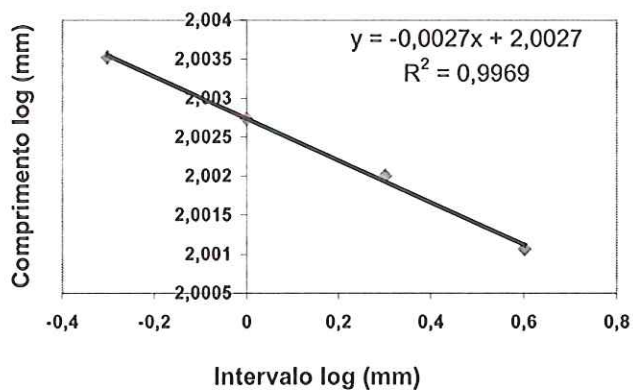


Figura A3. Definição da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção do perfil 3 dos perfis de Barton & Choubey (1977).

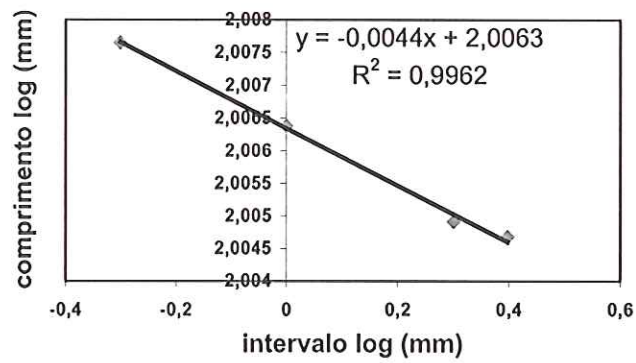


Figura A4. Obtenção da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção do perfil 4 dos perfis de Barton & Choubey (1977).

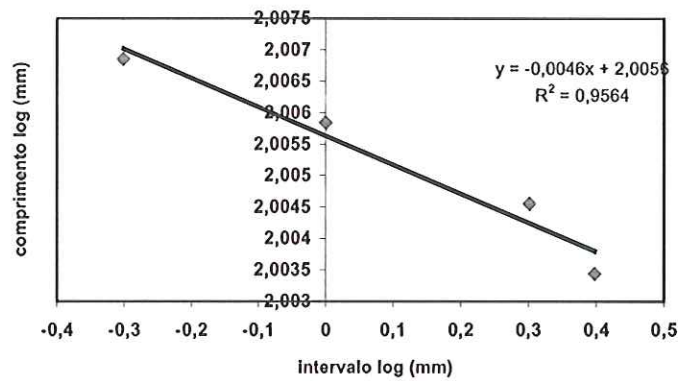


Figura A5. Obtenção da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção do perfil 5 dos perfis de Barton & Choubey (1977).

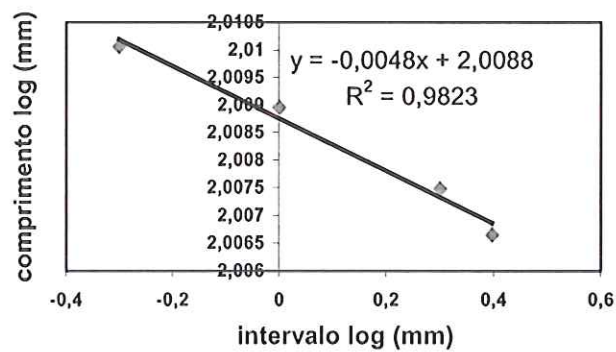


Figura A6. Obtenção da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção do perfil 6 dos perfis de Barton & Choubey (1977).



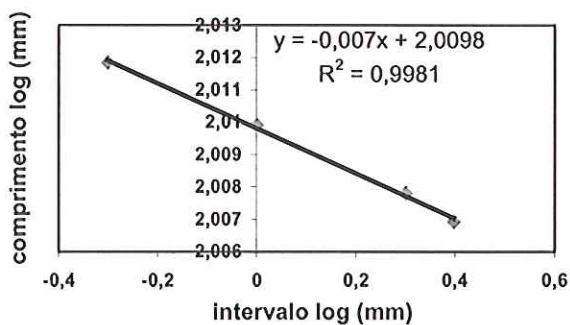


Figura A7. Obtenção da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção do perfil 7 dos perfis de Barton & Choubey (1977).

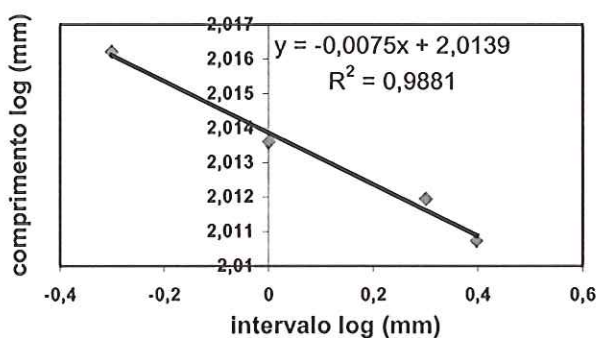


Figura A8. Obtenção da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção do perfil 8 dos perfis de Barton & Choubey (1977).

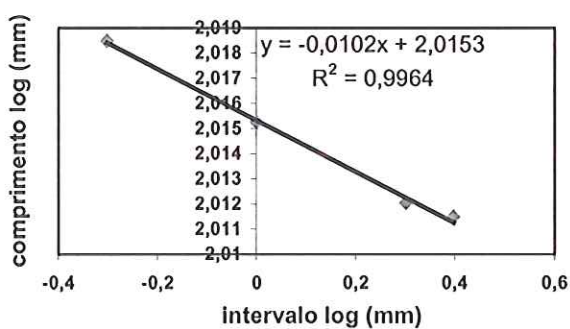


Figura A9. Obtenção da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção do perfil 9 dos perfis de Barton & Choubey (1977).

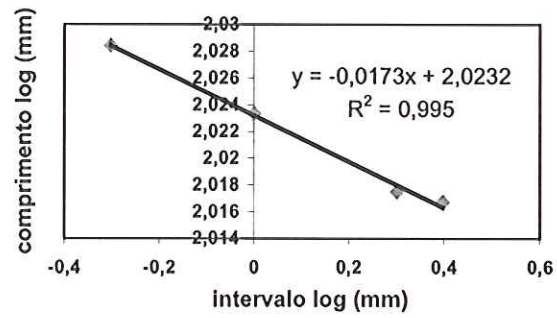


Figura A10. Obtenção da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção do perfil 10 dos perfis de Barton & Choubey (1977).

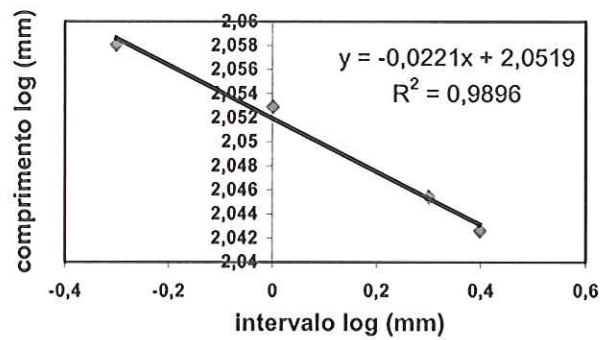


Figura A11. Determinação da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção do perfil de Grasselli (2001) com valor do *JRC* de 20.

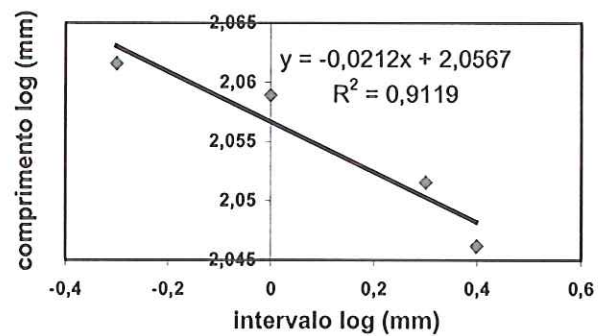


Figura A12. Determinação da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção do perfil de Grasselli (2001) com valor do *JRC* de 20.

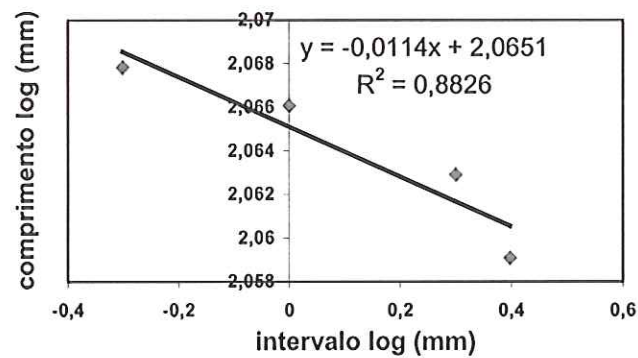


Figura A13. Determinação da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção do perfil de Grasselli (2001) com valor do *JRC* de 20.

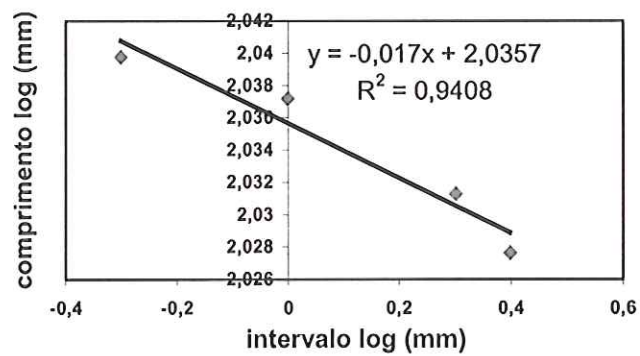


Figura A14. Determinação da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção do perfil de Grasselli (2001) com valor do *JRC* de 17.

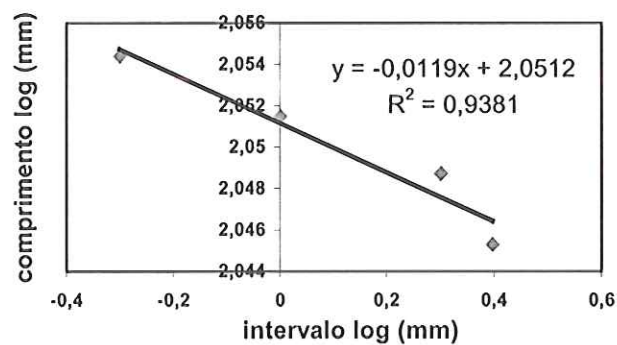


Figura A15. Determinação da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção do perfil de Grasselli (2001) com valor do *JRC* de 17.

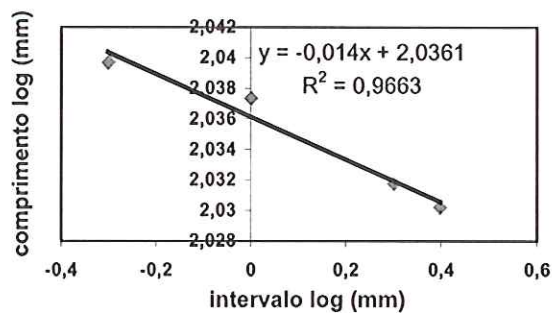


Figura A16. Determinação da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção do perfil de Grasselli (2001) com valor do  $JRC$  de 17.

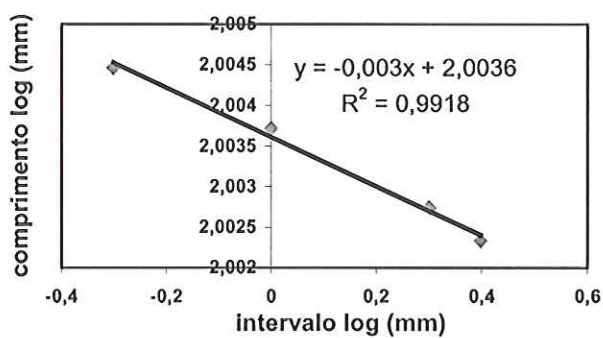


Figura A17. Obtenção da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção do perfil de Bandis et al. (1983) com valor de  $JRC$  de 5,37.

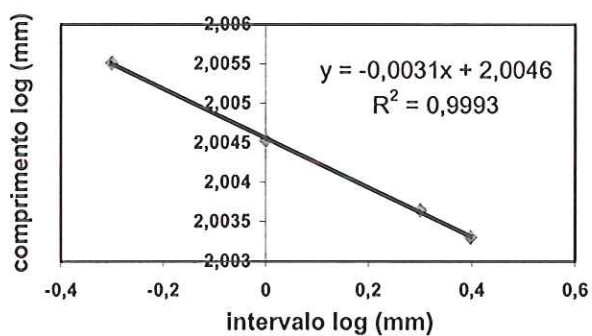


Figura A18. Obtenção da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção do perfil de Bandis et al. (1983) com valor de  $JRC$  de 6,85.

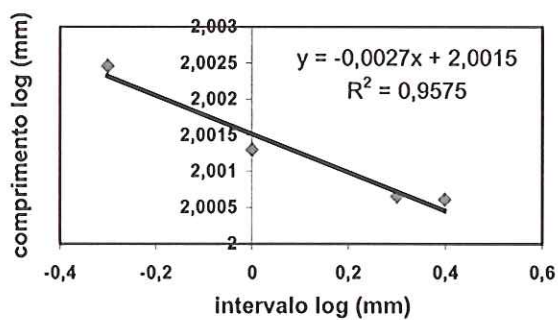


Figura A19. Determinação da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção do perfil de Beer et al. (2002) com valor de  $JRC$  de 4.

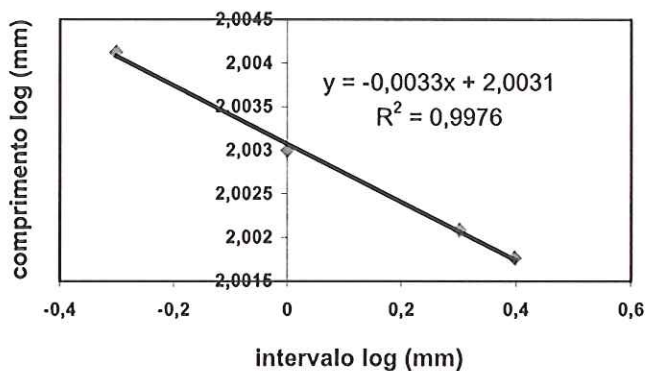


Figura A20. Determinação da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção do perfil de Beer et al. (2002) com valor de  $JRC$  de 6.

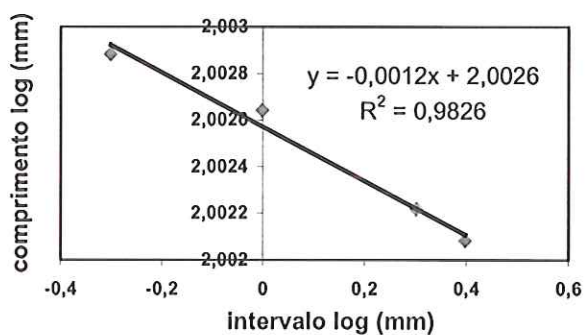


Figura A21. Obtenção da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção do perfil de Makurat et al. (1990) com valor de  $JRC$  de 2,65.

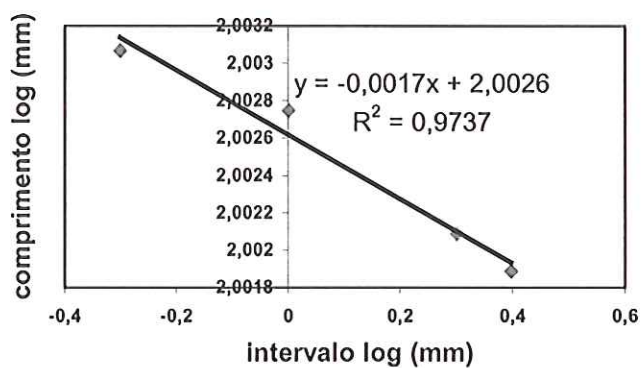


Figura A22. Obtenção da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção do perfil de Makurat et al. (1990) com valor de  $JRC$  de 4,34.

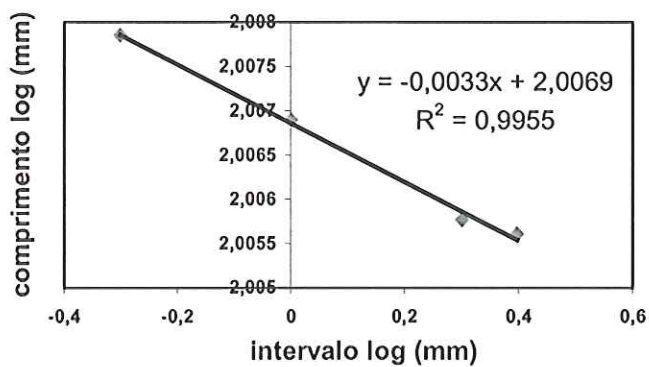


Figura A23. Obtenção da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção do perfil de Makurat et al. (1990) com valor de  $JRC$  de 7,05.

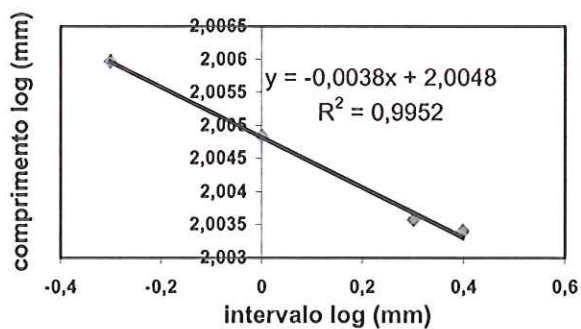


Figura A24. Determinação da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção do perfil de Papaliangas et al. (1990) com valor de  $JRC$  de 8.

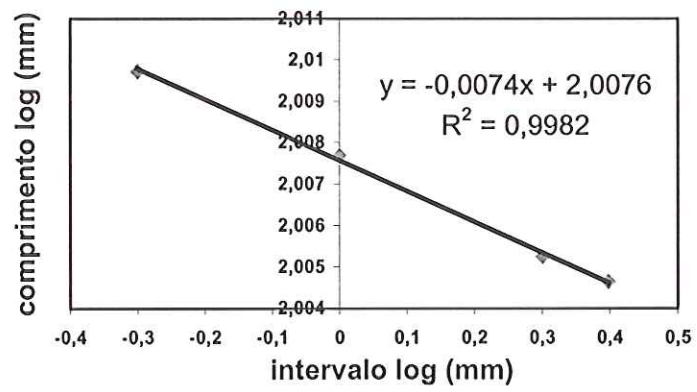


Figura A25. Determinação da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção do perfil de Papaliangas et al. (1990) com valor de *JRC* de 10.

APÊNDICE B – Determinação da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção dos perfis de Barton & Choubey (1977) e de Grasselli (2001), Bandis et al. (1983), Beer et al. (2002), Makurat et al. (1990) e Papaliangas et al. (1990) utilizando o Método das Caixas.



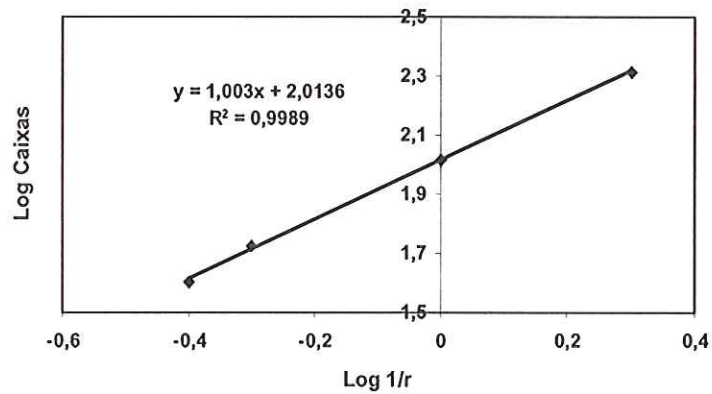


Figura B1. Determinação da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção do perfil 1 dos perfis de Barton & Choubey (1977).

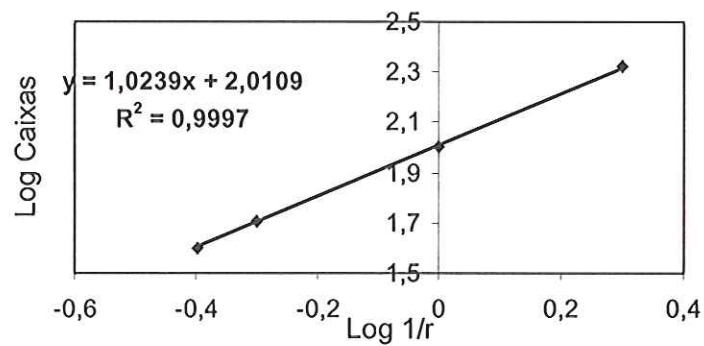


Figura B2. Determinação da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção do perfil 2 dos perfis de Barton & Choubey (1977).

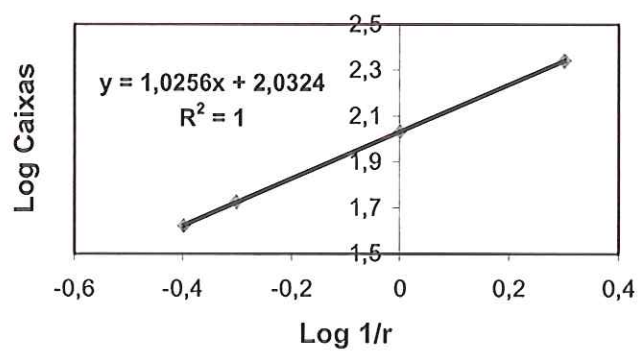


Figura B3. Determinação da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção do perfil 3 dos perfis de Barton & Choubey (1977).

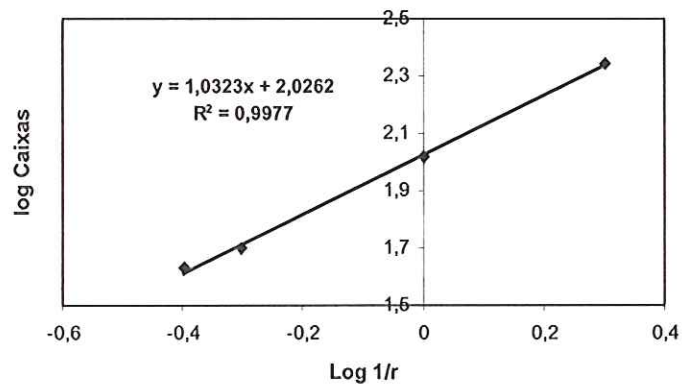


Figura B4. Determinação da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção do perfil 4 dos perfis de Barton & Choubey (1977).

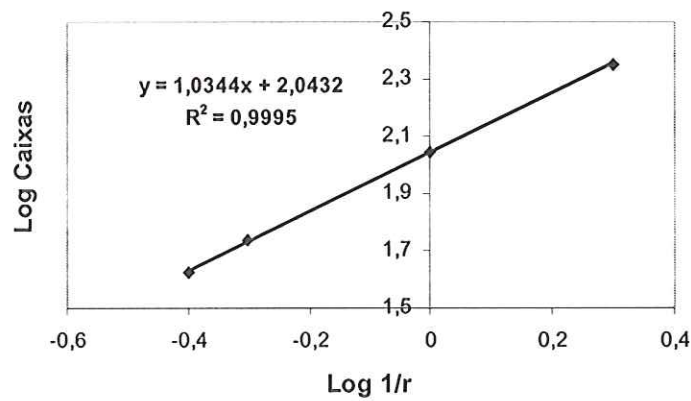


Figura B5. Determinação da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção do perfil 5 dos perfis de Barton & Choubey (1977).

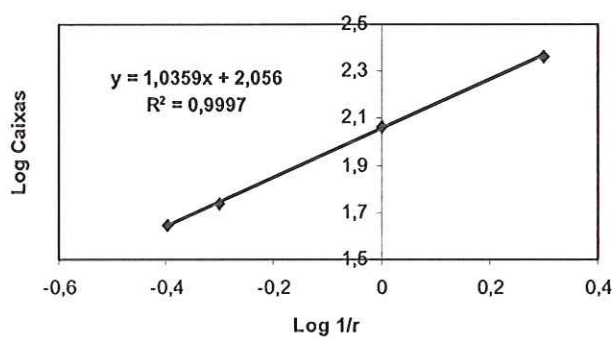


Figura B6. Determinação da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção do perfil 6 dos perfis de Barton & Choubey (1977).

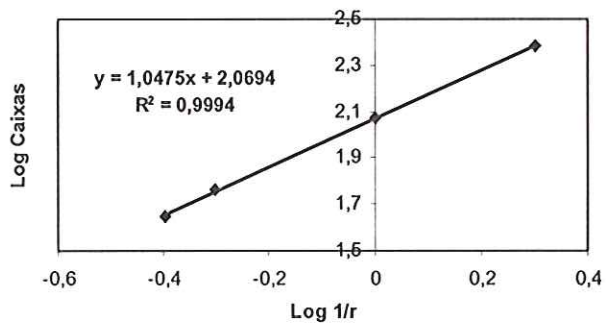


Figura B7. Determinação da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção do perfil 7 dos perfis de Barton & Choubey (1977).

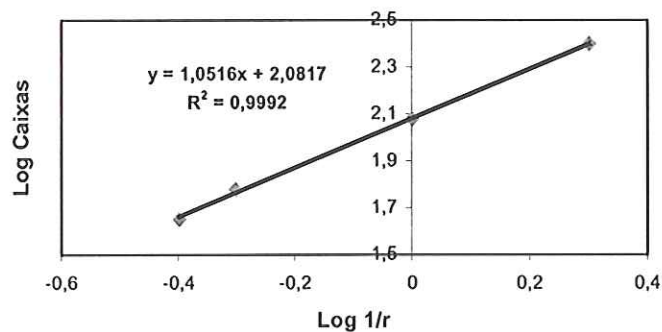


Figura B8. Determinação da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção do perfil 8 dos perfis de Barton & Choubey (1977).

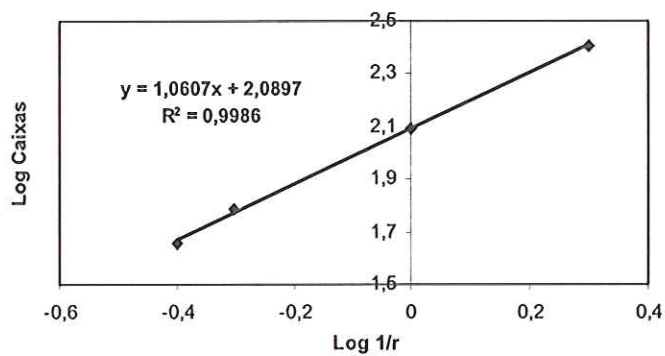


Figura B9. Determinação da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção do perfil 9 dos perfis de Barton & Choubey (1977).

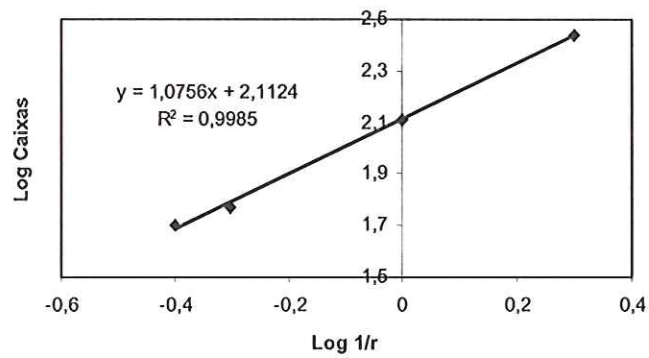


Figura B10. Determinação da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção do perfil 10 dos perfis de Barton & Choubey (1977).

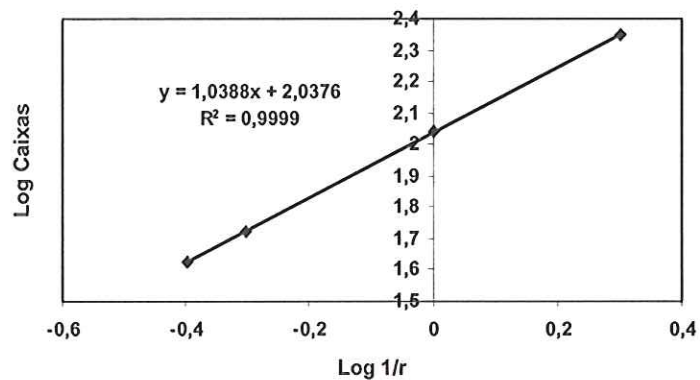


Figura B11. Determinação da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção do perfil de Bandis et al. (1983) com valor de  $JRC$  de 5,37.

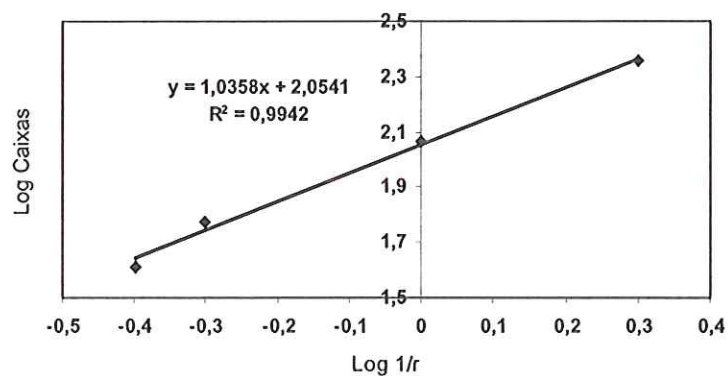


Figura B12. Determinação da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção do perfil de Bandis et al. (1983) com valor de  $JRC$  de 6,85.

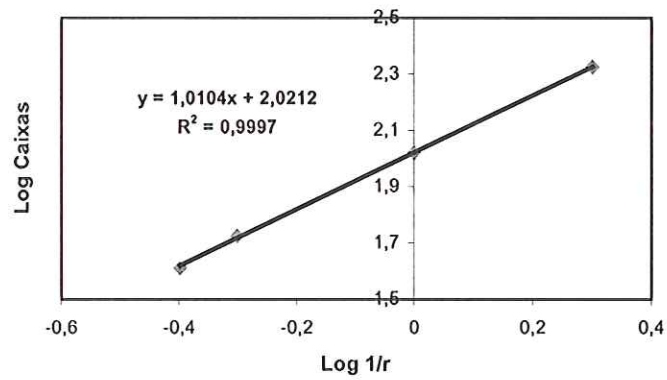


Figura B13. Obtenção da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção do perfil de Beer et al. (2002) com valor de 4 para *JRC*.

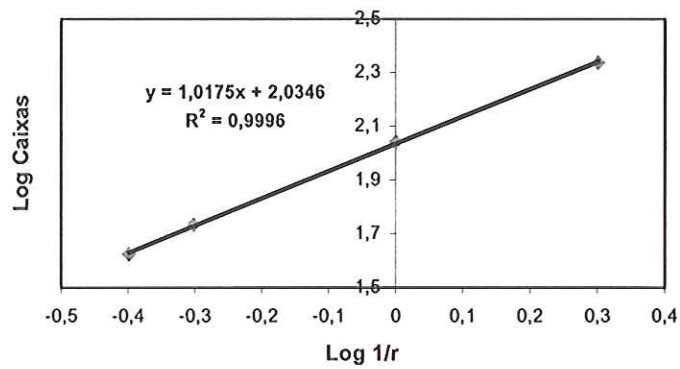


Figura B14. Obtenção da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção do perfil de Beer et al. (2002) com valor de 6 para *JRC*.

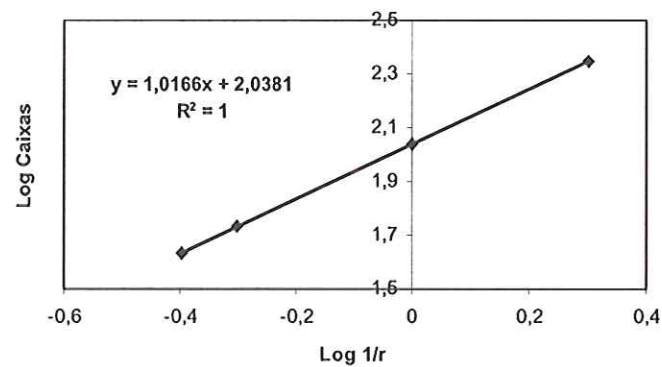


Figura B15. Determinação da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção do perfil de Makurat et al. (1990) com *JRC* de 2,65.

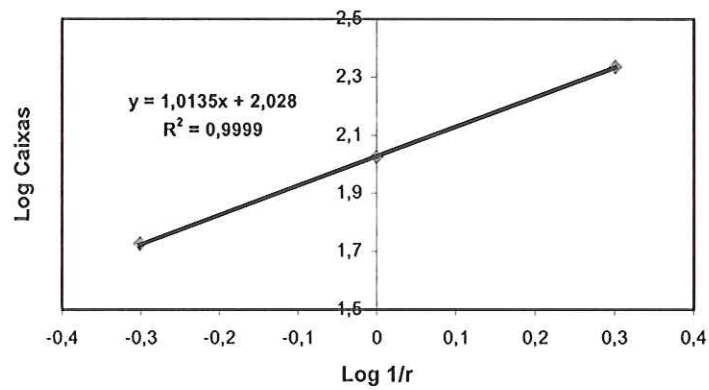


Figura B16. Determinação da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção do perfil de Makurat et al. (1990) com *JRC* de 4,34.

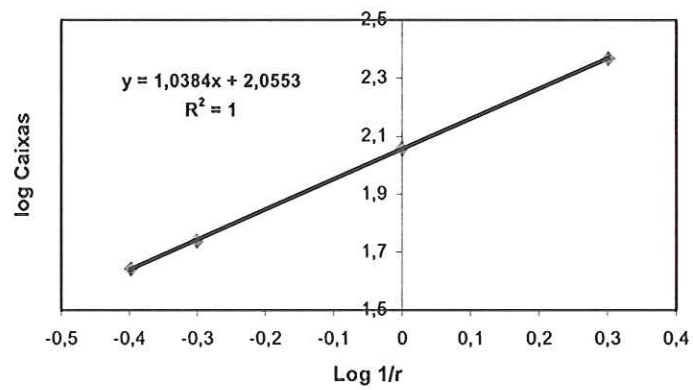


Figura B17. Determinação da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção do perfil de Makurat et al. (1990) com *JRC* de 7,05.

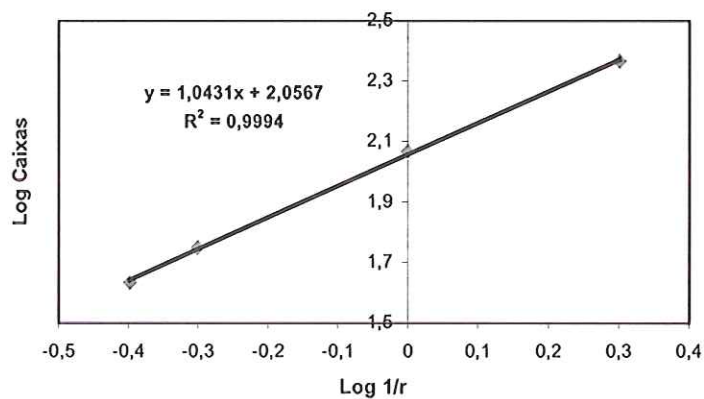


Figura B18. Obtenção da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção do perfil de Papaliangas et al. (1990) com *JRC* de 8.

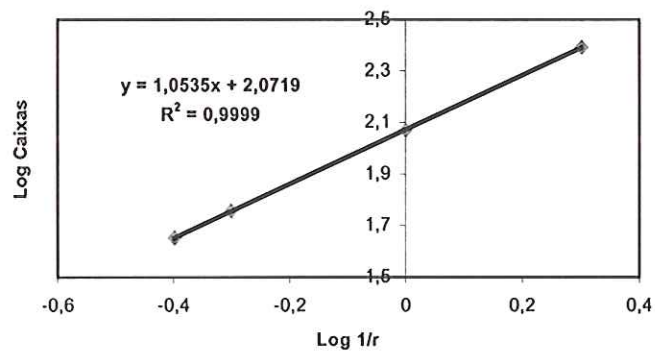


Figura B19. Obtenção da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção do perfil de Papaliangas et al. (1990) com *JRC* de 10.

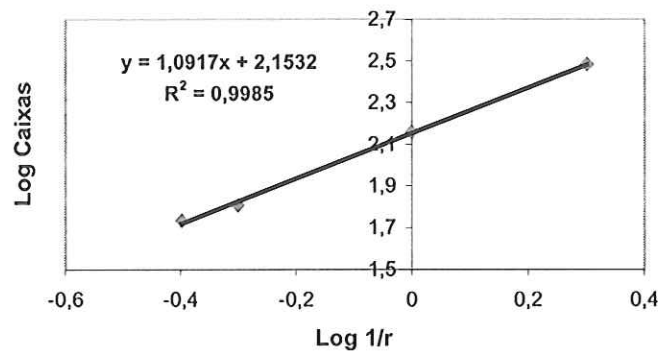


Figura B20. Determinação da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção do perfil de Grasselli (2001) com 20 de *JRC*.

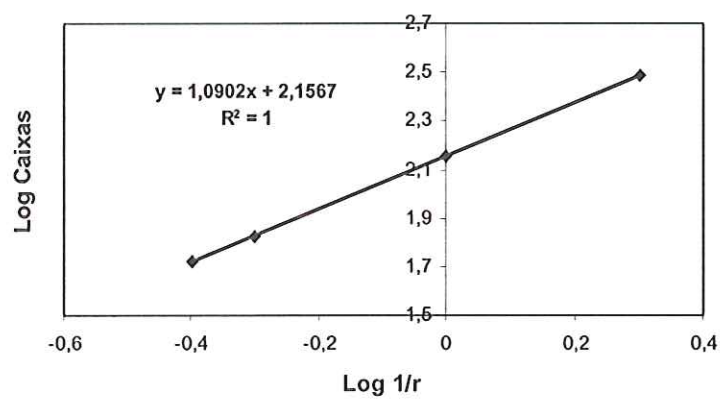


Figura B21. Determinação da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção do perfil de Grasselli (2001) com 20 de *JRC*.

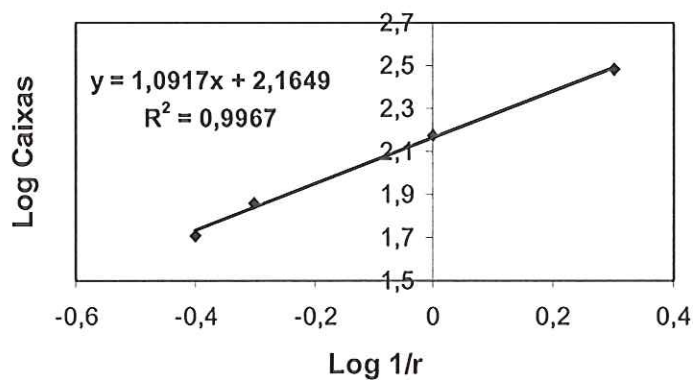


Figura B22. Determinação da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção do perfil de Grasselli (2001) com 20 de *JRC*.

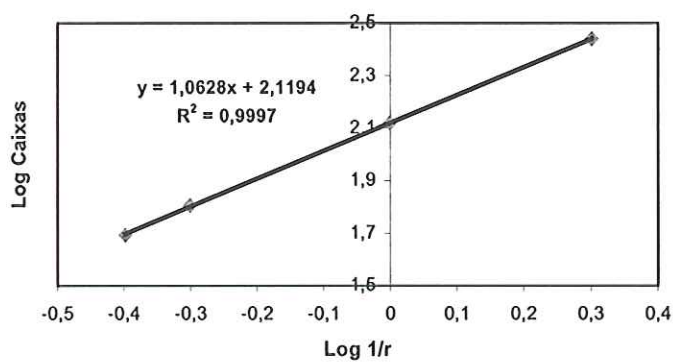


Figura B23. Determinação da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção do perfil de Grasselli (2001) com 17 de *JRC*.

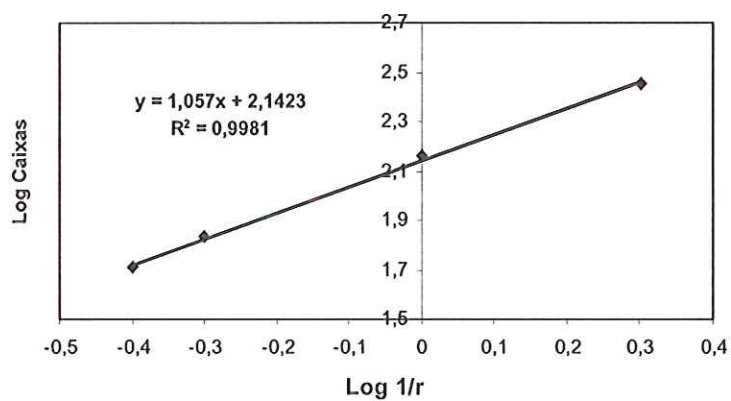


Figura B24. Determinação da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção do perfil de Grasselli (2001) com 17 de *JRC*.



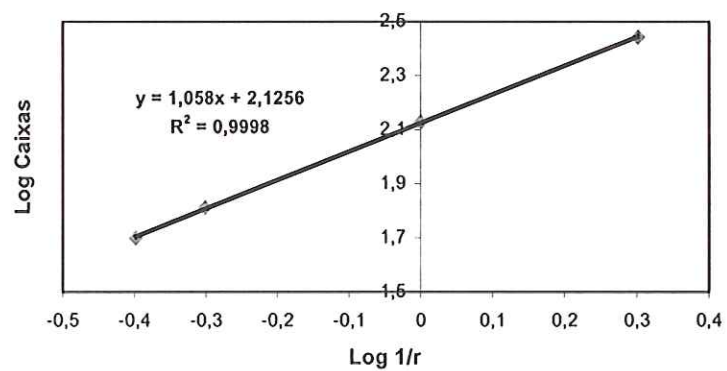


Figura B25. Determinação da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção do perfil de Grasselli (2001) com 17 de *JRC*.

APÊNDICE C – Determinação da Dimensão Fractal dos perfis de Barton & Choubey (1977) e de Grasselli (2001), Bandis et al. (1983), Beer et al. (2002), Makurat et al. (1990) e Papaliangas et al. (1990) usando o Método do Ângulo.

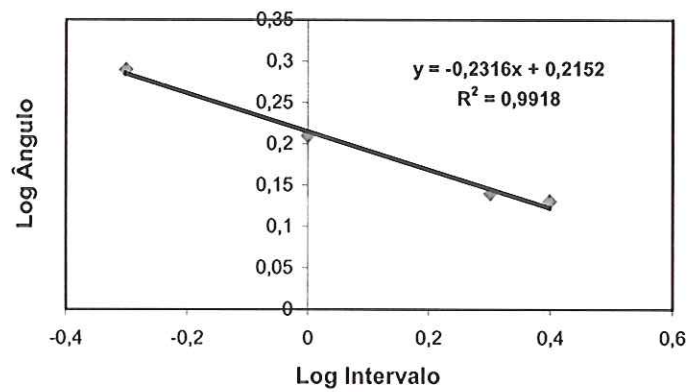


Figura C1. Determinação da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção do perfil 1 de Barton & Choubey (1977).

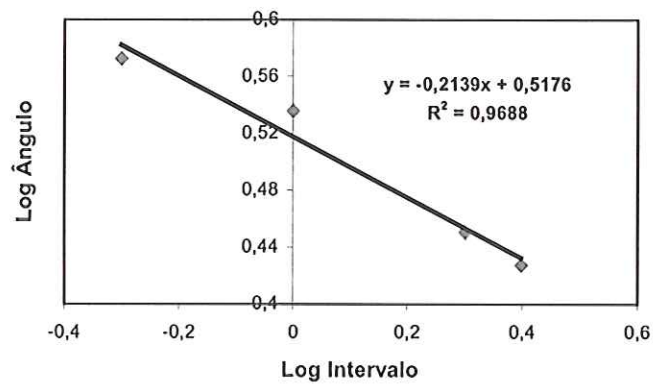


Figura C2. Determinação da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção do perfil 2 de Barton & Choubey (1977).

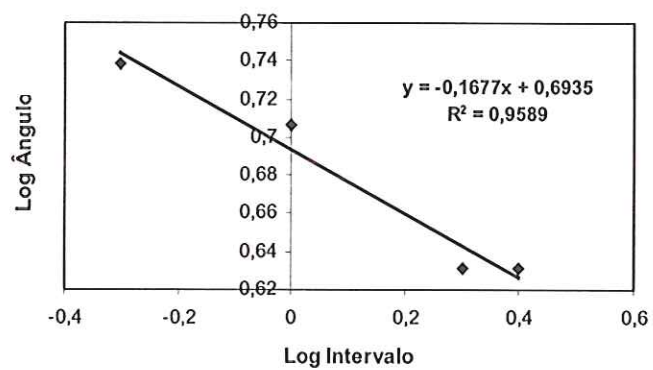


Figura C3. Determinação da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção do perfil 3 de Barton & Choubey (1977).

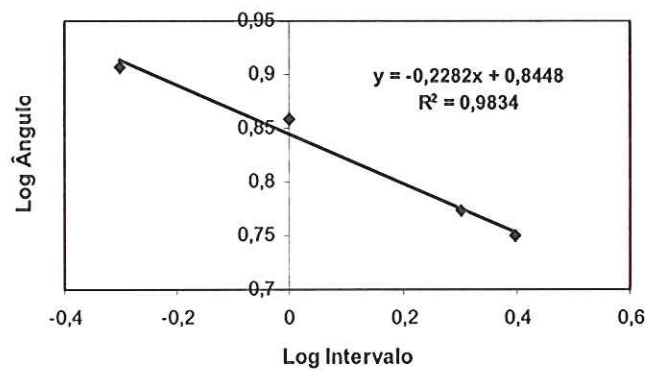


Figura C4. Determinação da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção do perfil 4 de Barton & Choubey (1977).

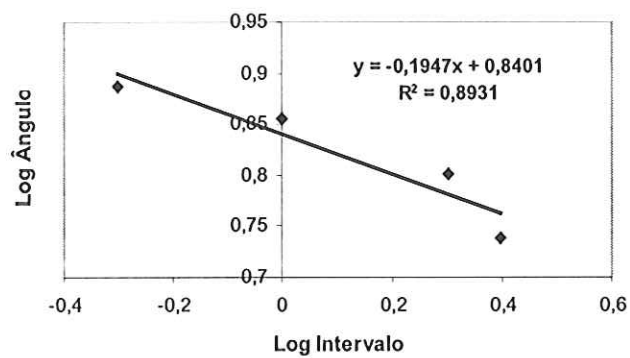


Figura C5. Determinação da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção do perfil 5 de Barton & Choubey (1977).

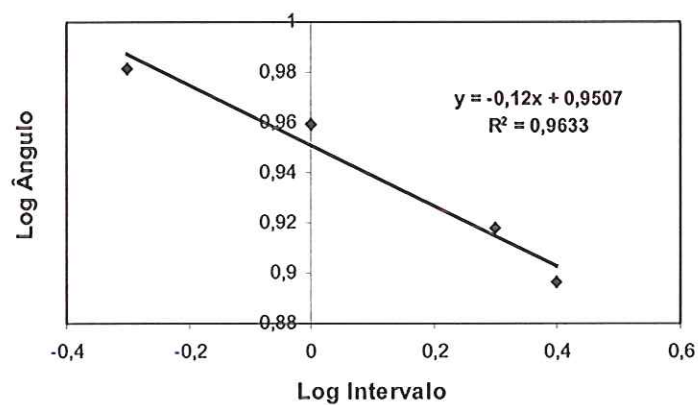


Figura C6. Determinação da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção do perfil 6 de Barton & Choubey (1977).

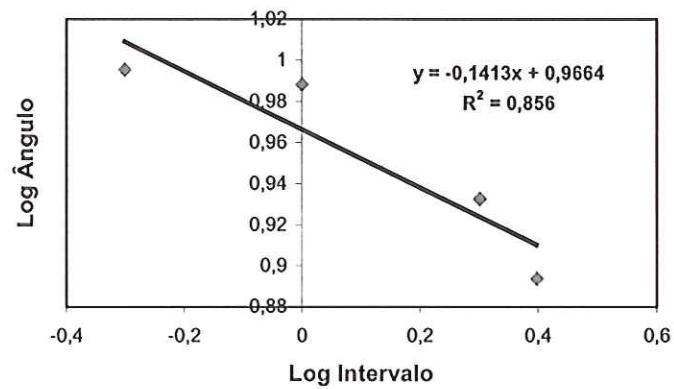


Figura C7. Determinação da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção do perfil 7 de Barton & Choubey (1977).

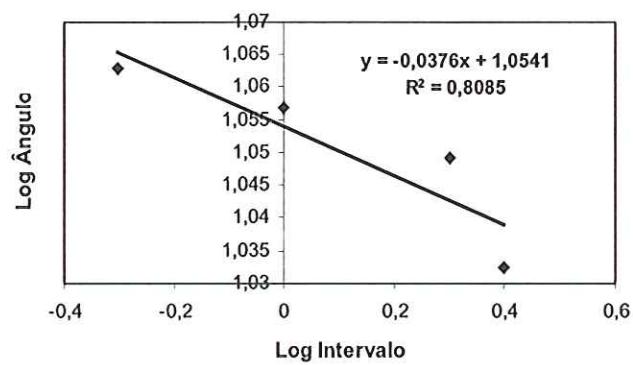


Figura C8. Determinação da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção do perfil 8 de Barton & Choubey (1977).

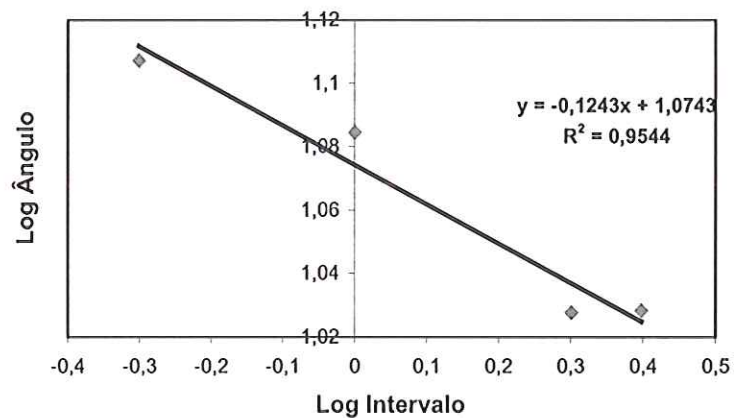


Figura C9. Determinação da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção do perfil 9 de Barton & Choubey (1977).

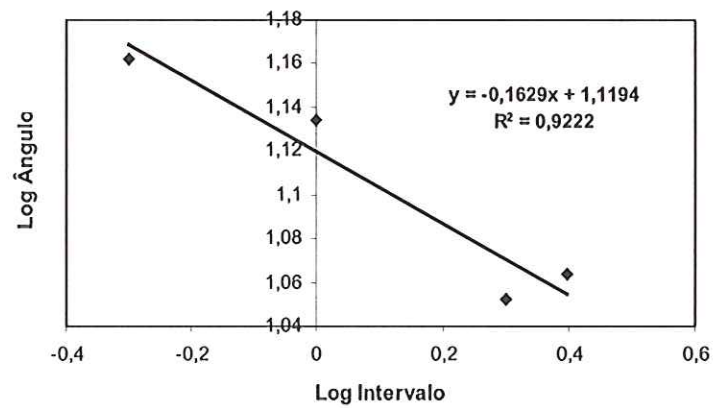


Figura C10. Determinação da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção do perfil 10 de Barton & Choubey (1977).

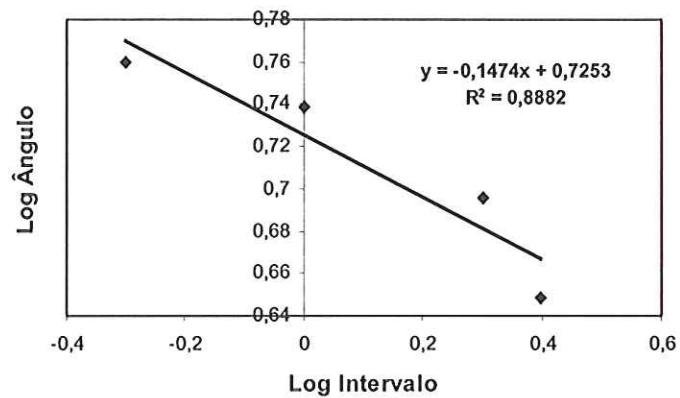


Figura C11. Obtenção da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção do perfil de Bandis et al. (1983) com 5,37 de JRC.

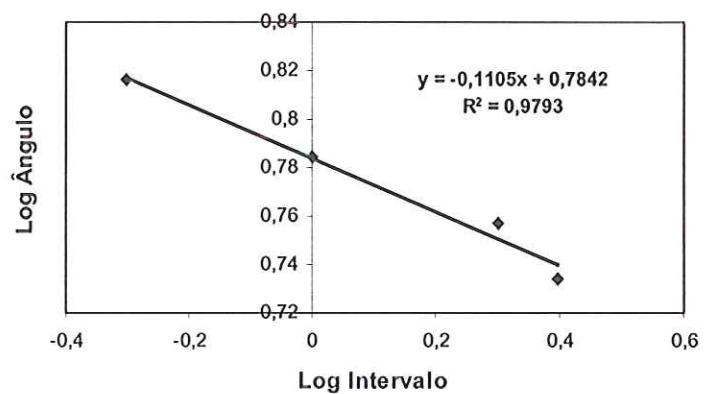


Figura C12. Obtenção da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção do perfil de Bandis et al. (1983) com 6,85 de JRC.

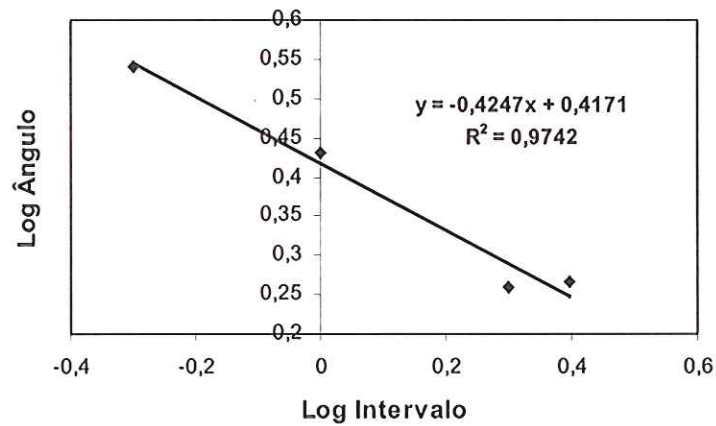


Figura C13. Obtenção da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção do perfil de Beer et al. (2002) com 4 de *JRC*.

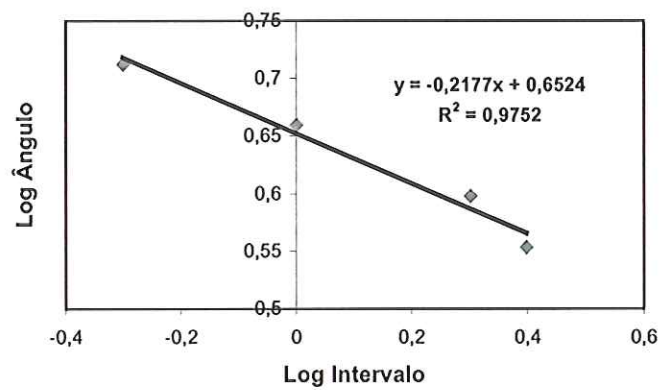


Figura C14. Obtenção da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção do perfil de Beer et al. (2002) com 6 de *JRC*.

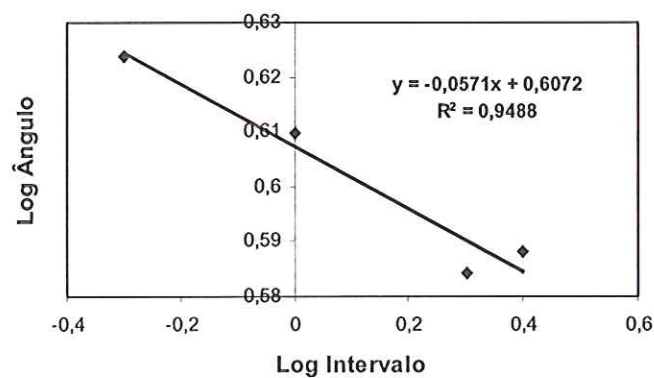


Figura C15. Determinação da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção do perfil de Makurat et al. (1990) com 2,65 de *JRC*.

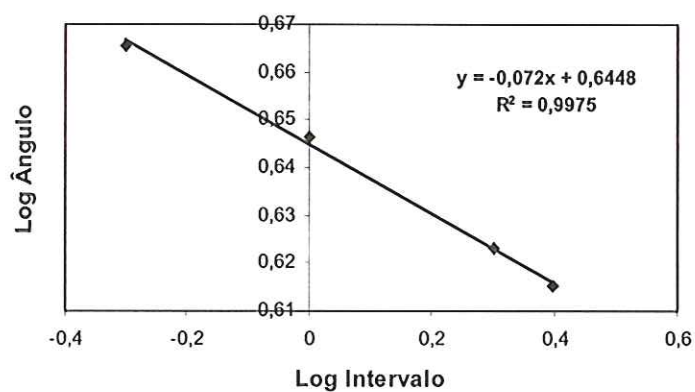


Figura C16. Determinação da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção do perfil de Makurat et al. (1990) com 4,34 de *JRC*.

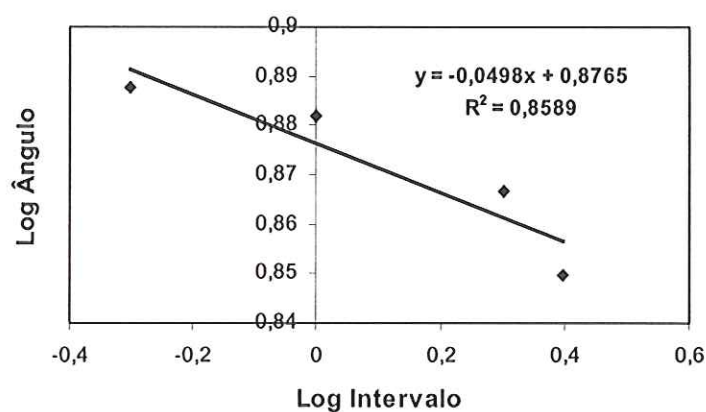


Figura C17. Determinação da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção do perfil de Makurat et al. (1990) com 7,05 de *JRC*.

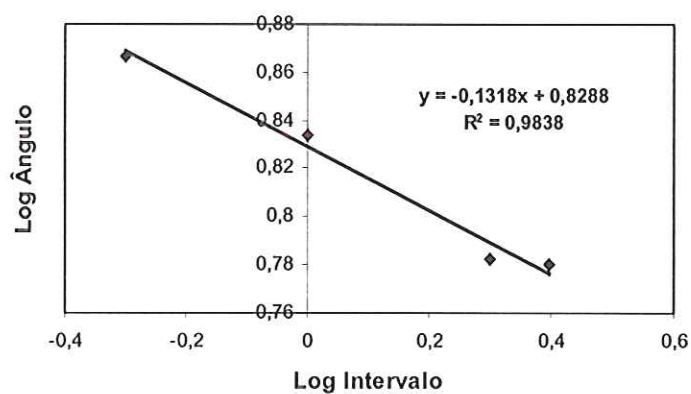


Figura C18. Obtenção da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção do perfil de Papaliangas et al. (1990) com valor de 8 de *JRC*.



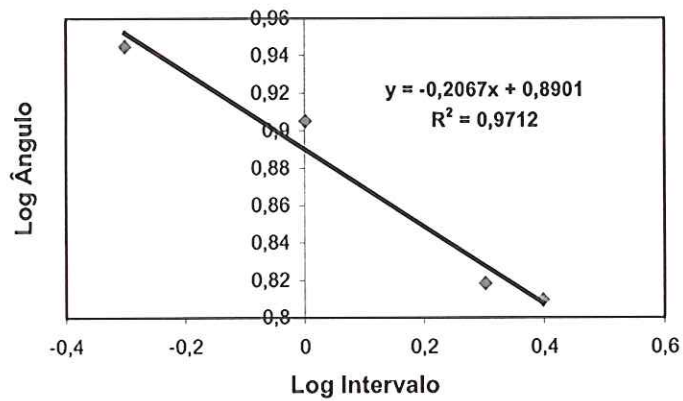


Figura C19. Obtenção da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção do perfil de Papaliangas et al. (1990) com valor de 10 de *JRC*.

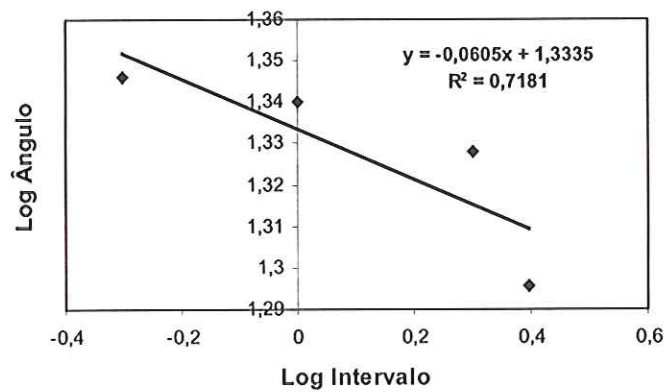


Figura C20. Determinação da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção do perfil de Grasselli (2001) com *JRC* de 20.

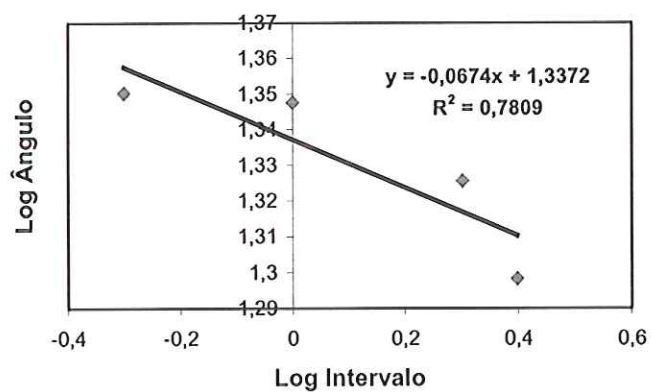


Figura C21. Determinação da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção do perfil de Grasselli (2001) com *JRC* de 20.

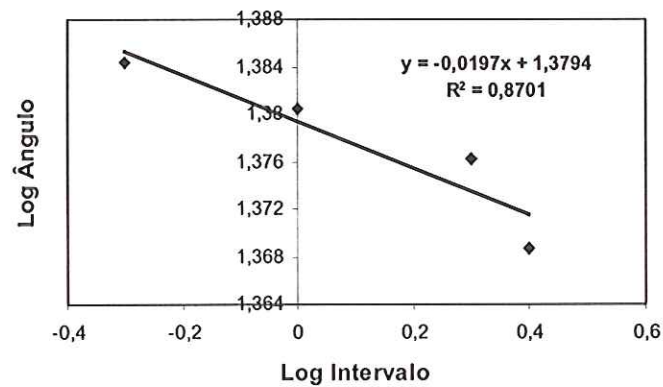


Figura C22. Determinação da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção do perfil de Grasselli (2001) com *JRC* de 20.

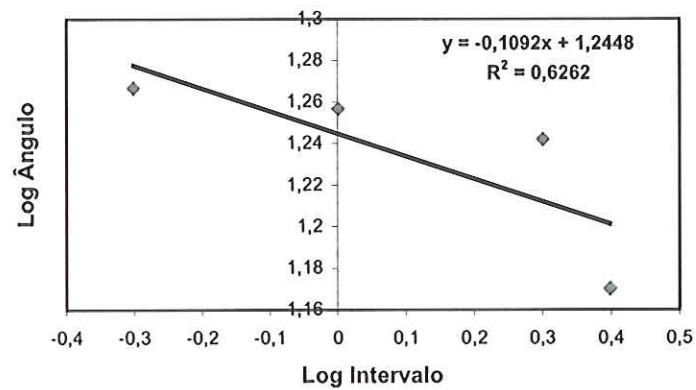


Figura C23. Determinação da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção do perfil de Grasselli (2001) com *JRC* de 17.

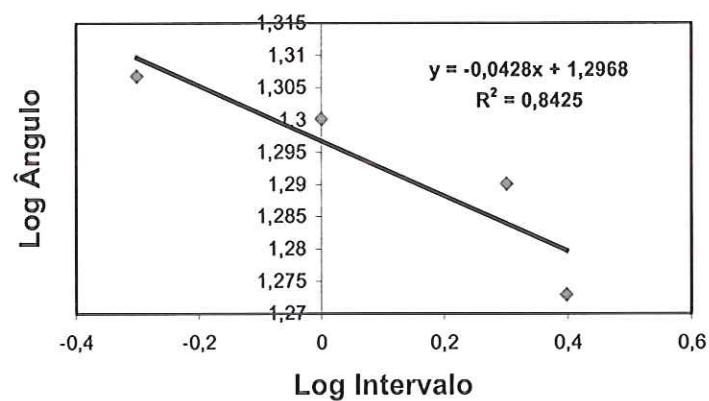


Figura C24. Determinação da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção do perfil de Grasselli (2001) com *JRC* de 17.

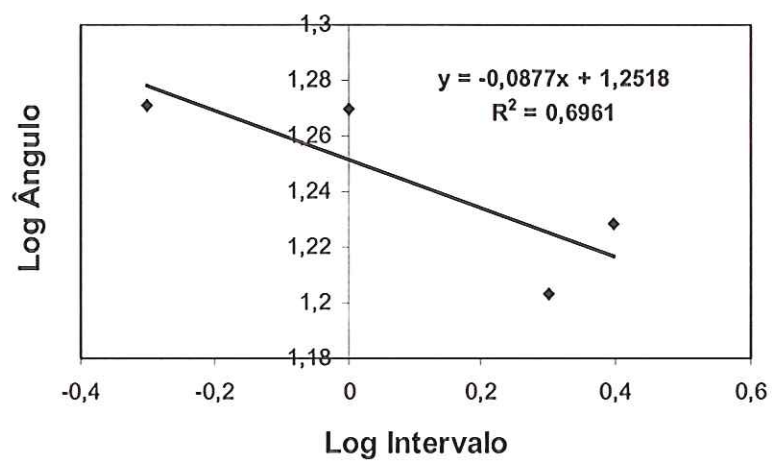


Figura C25. Determinação da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção do perfil de Grasselli (2001) com *JRC* de 17.

APÊNDICE D – Determinação da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção no efeito escala dos perfis de rugosidade.

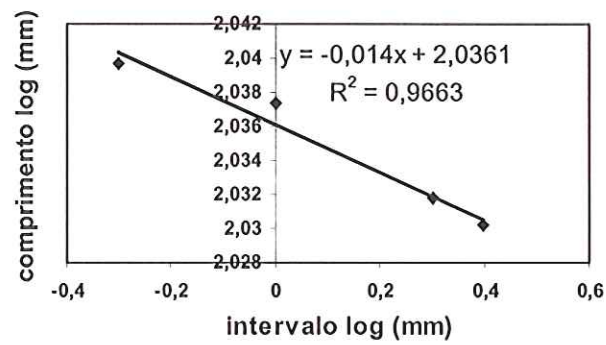


Figura D1. Determinação da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção do perfil de Grasselli (2001) com *JRC* inicial de 17 e com um comprimento de 10 cm.

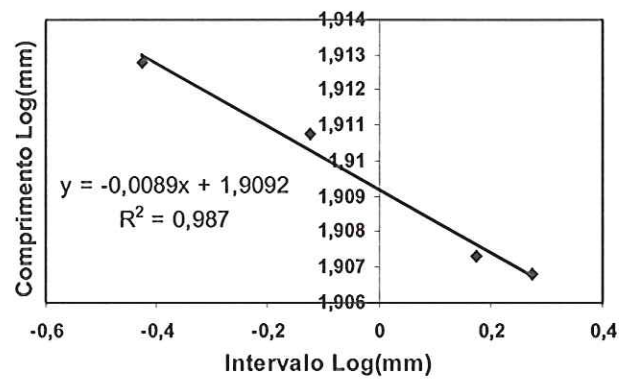


Figura D2. Determinação da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção do perfil de Grasselli (2001) com *JRC* inicial de 17 e com um comprimento de 7,5 cm.

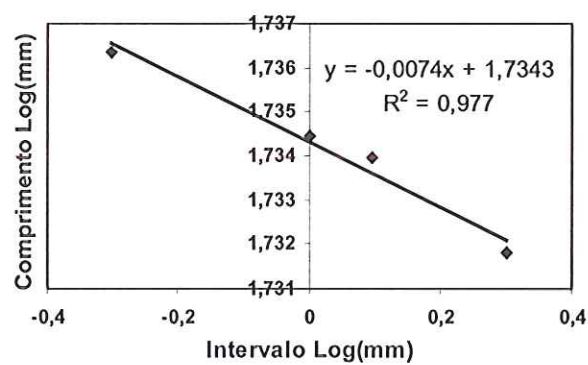


Figura D3. Determinação da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção do perfil de Grasselli (2001) com *JRC* inicial de 17 e com um comprimento de 5 cm.

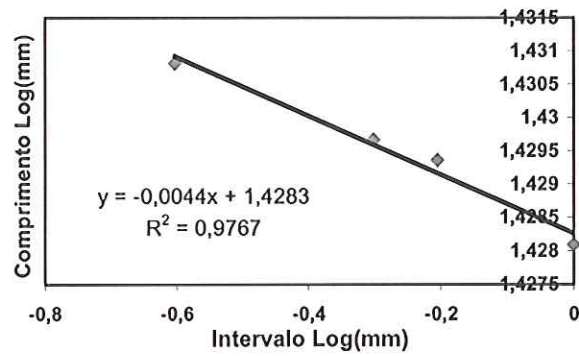


Figura D4. Determinação da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção do perfil de Grasselli (2001) com  $JRC$  inicial de 17 e com um comprimento de 2,5 cm.

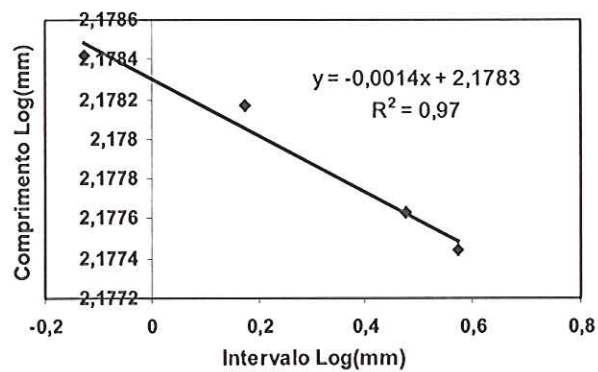


Figura D5. Obtenção da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção do perfil de Makurat et al. (1990) com um  $JRC$  inicial de 2,6 e com comprimento de 15 cm.

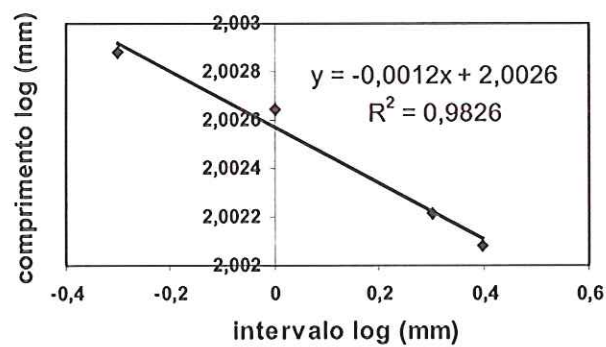


Figura D6. Obtenção da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção do perfil de Makurat et al. (1990) com um  $JRC$  inicial de 2,6 e com comprimento de 10 cm.

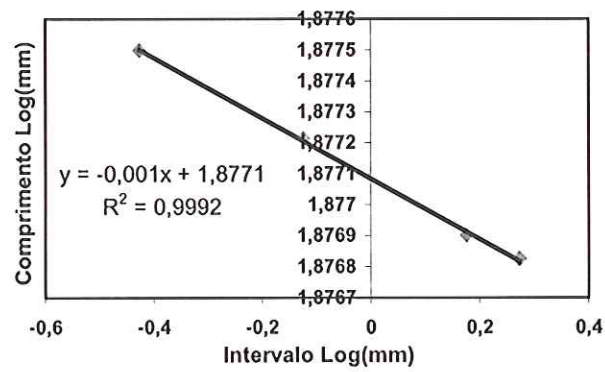


Figura D7. Obtenção da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção do perfil de Makurat et al. (1990) com um *JRC* inicial de 2,6 e com comprimento de 7,5 cm.

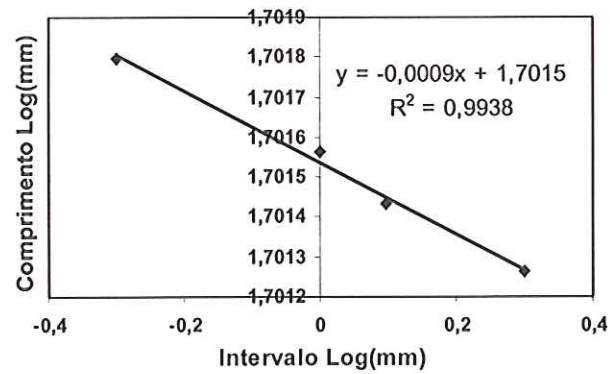


Figura D8. Obtenção da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção do perfil de Makurat et al. (1990) com um *JRC* inicial de 2,6 e com comprimento de 5 cm.

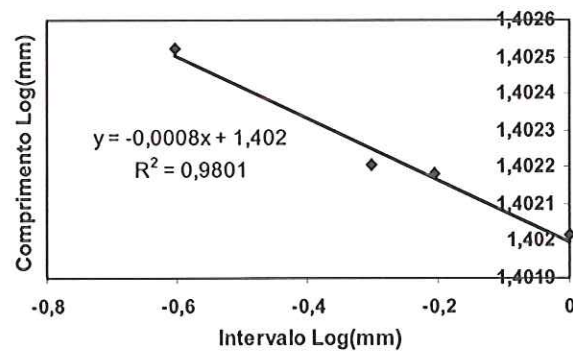


Figura D9. Obtenção da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção do perfil de Makurat et al. (1990) com um *JRC* inicial de 2,6 e com comprimento de 2,5 cm.

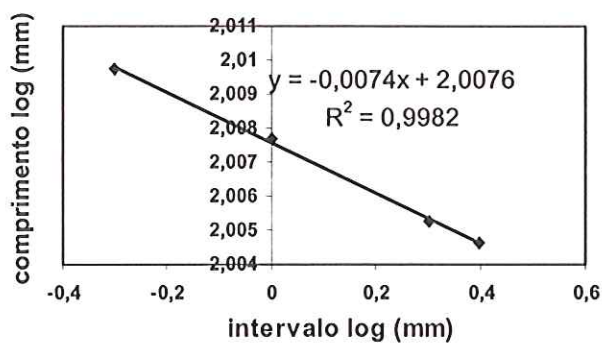


Figura D10. Determinação da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção do perfil de Papaliangas et al. (1990) com *JRC* inicial de 10 e com comprimento de 10 cm.

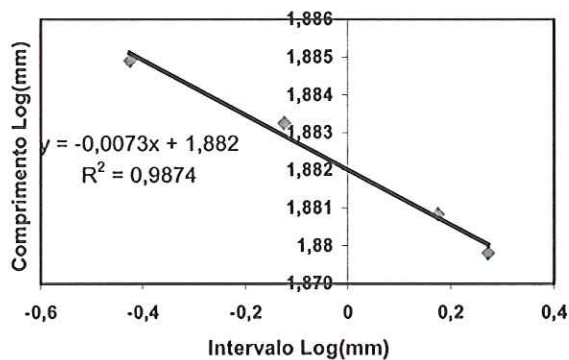


Figura D11. Determinação da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção do perfil de Papaliangas et al. (1990) com *JRC* inicial de 10 e com comprimento de 7,5 cm.

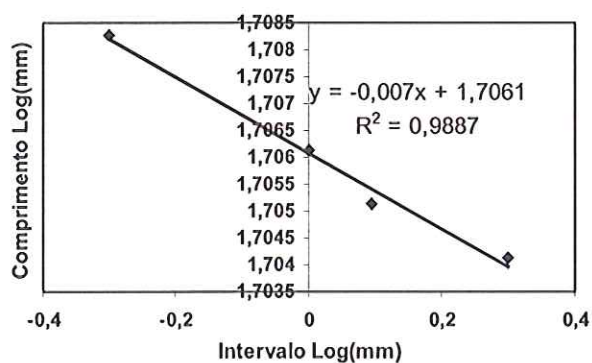


Figura D12. Determinação da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção do perfil de Papaliangas et al. (1990) com *JRC* inicial de 10 e com comprimento de 5 cm.



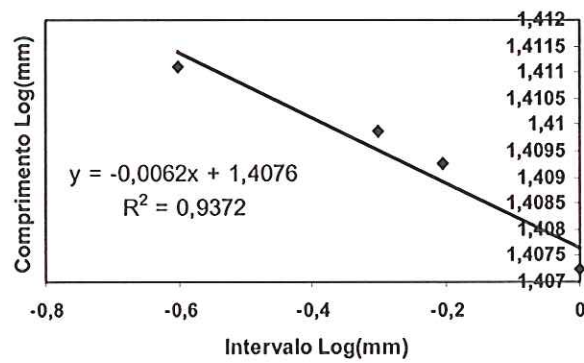


Figura D13. Determinação da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção do perfil de Papaliangas et al. (1990) com *JRC* inicial de 10 e com comprimento de 2,5 cm.

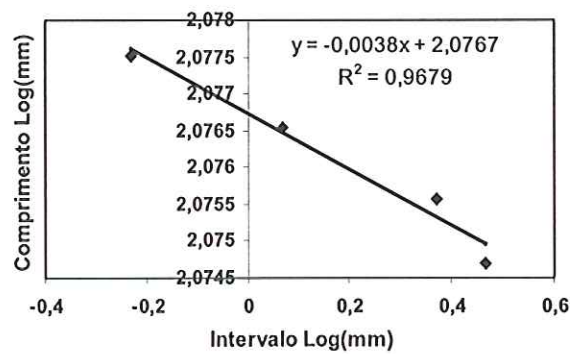


Figura D14. Obtenção da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção do perfil de Makurat et al. (1990) com *JRC* inicial de 6,9 e com comprimento de 11,72 cm.

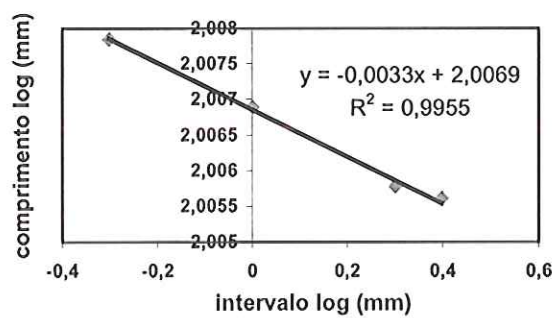


Figura D15. Obtenção da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção do perfil de Makurat et al. (1990) com *JRC* inicial de 6,9 e com comprimento de 10 cm.

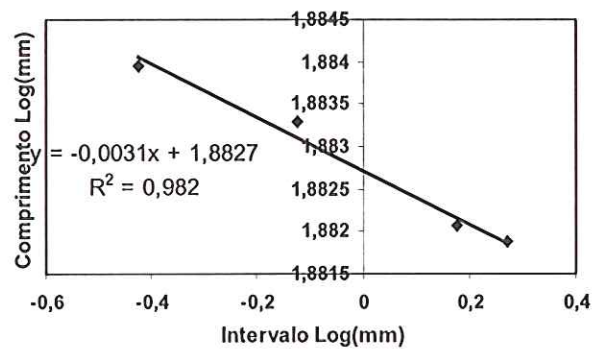


Figura D16. Obtenção da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção do perfil de Makurat et al. (1990) com *JRC* inicial de 6,9 e com comprimento de 7,5 cm.

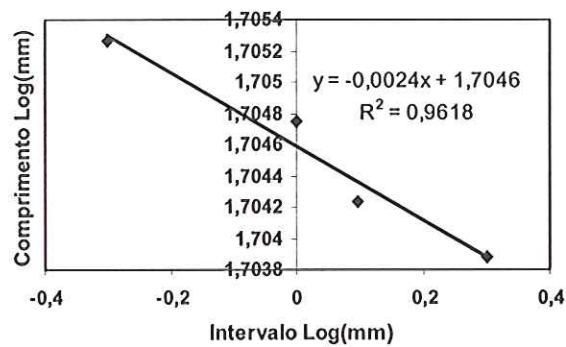


Figura D17. Obtenção da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção do perfil de Makurat et al. (1990) com *JRC* inicial de 6,9 e com comprimento de 5 cm.

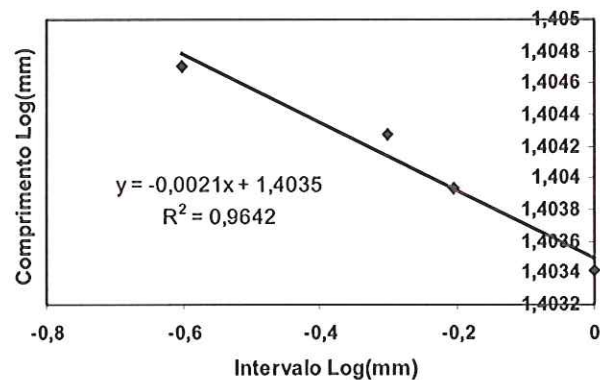


Figura D18. Obtenção da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção do perfil de Makurat et al. (1990) com *JRC* inicial de 6,9 e com comprimento de 2,5 cm.

APÊNDICE E – Determinação da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção para a correlação no efeito escala.

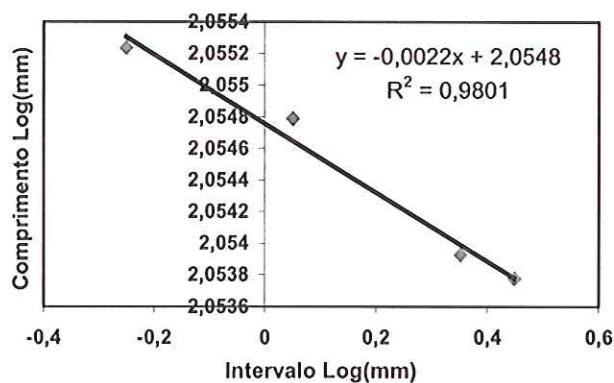


Figura E1. Determinação da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção do perfil de Makurat et al. (1990) com valor de  $JRC$  de 4,3 e comprimento de 11,23 cm.

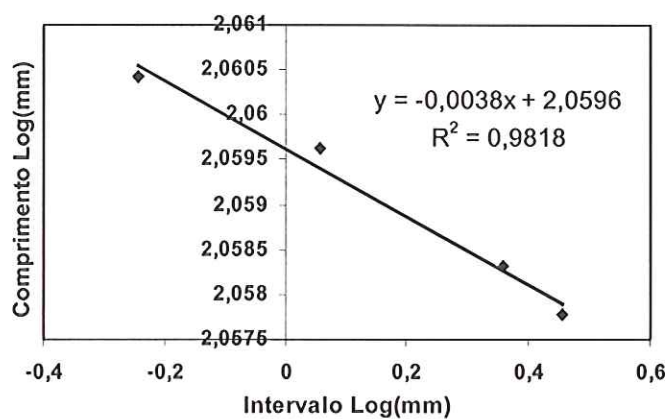


Figura E2. Obtenção da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção do perfil de Bandis et al. Com 5,3 de  $JRC$  e comprimento de 11,38 cm.

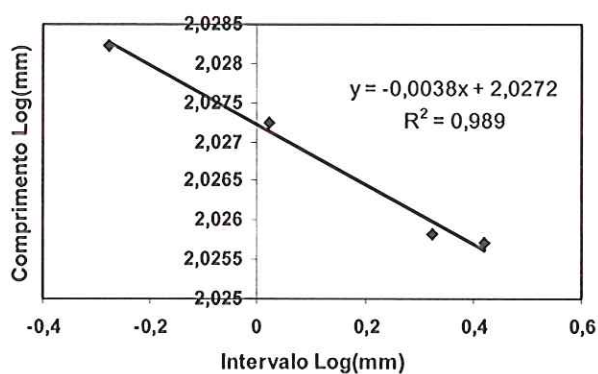


Figura E3. Obtenção da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção do perfil de Bandis et al. Com 6,8 de  $JRC$  e comprimento de 10,54 cm.

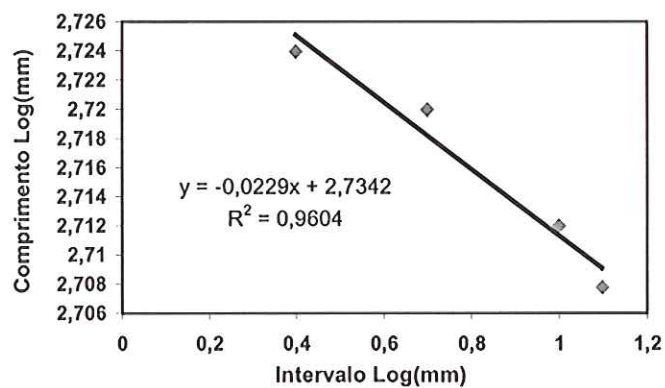


Figura E4. Determinação da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção do perfil da ISRM (1978) com valor de JRC de 20 e comprimento de 50 cm.

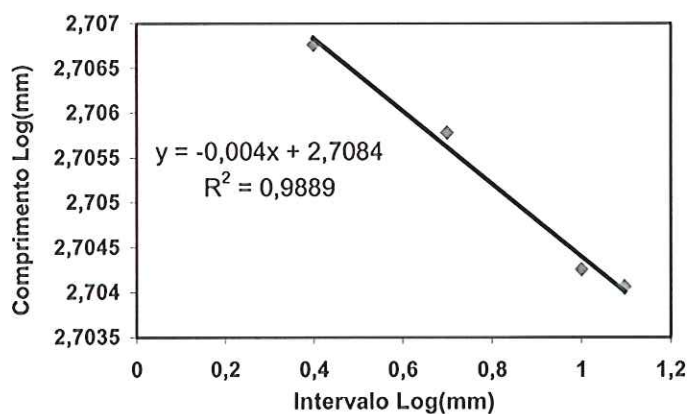


Figura E5. Determinação da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção do perfil da ISRM (1978) com valor de JRC de 10 e comprimento de 50 cm.

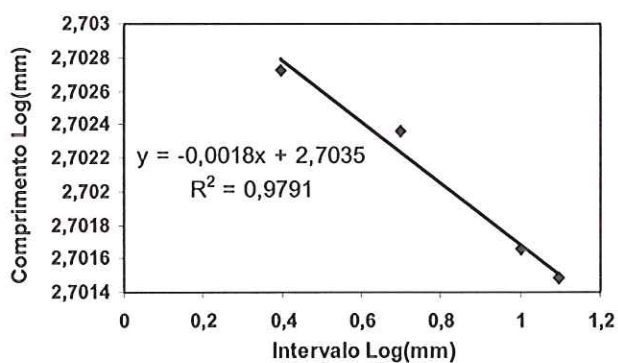


Figura E6. Determinação da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção do perfil da ISRM (1978) com valor de JRC de 5 e comprimento de 50 cm.

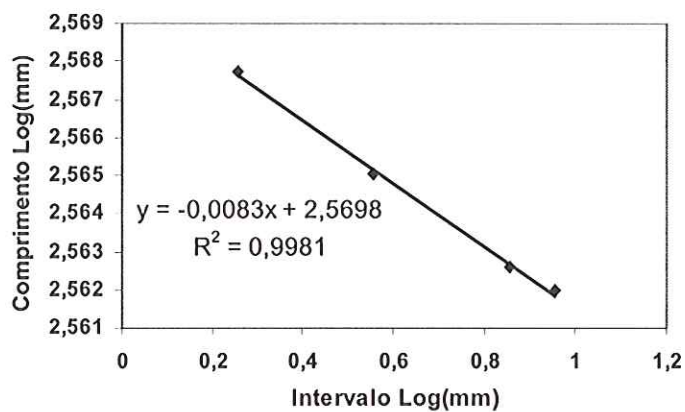


Figura E7. Determinação da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção do perfil 1 de Bandis et al. (1981) com *JRC* de 12 e comprimento de 36 cm.

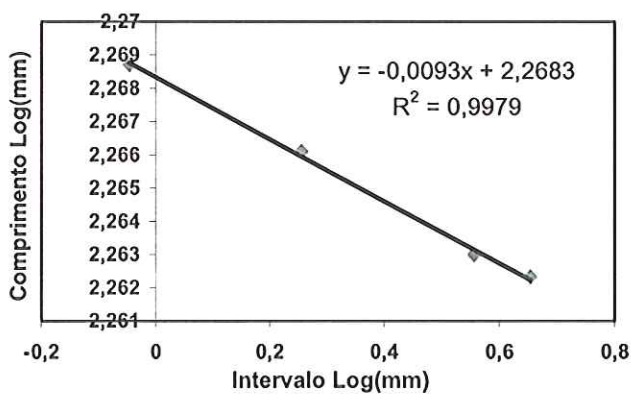


Figura E8. Determinação da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção do perfil 1 de Bandis et al. (1981) com *JRC* de 14,4 e comprimento de 18 cm.

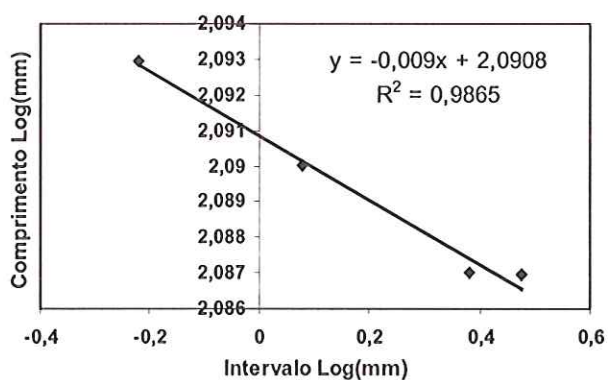


Figura E9. Determinação da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção do perfil 1 de Bandis et al. (1981) com *JRC* de 17 e comprimento de 12 cm.

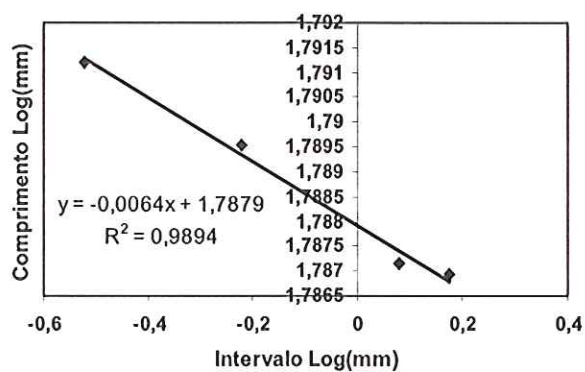


Figura E10. Determinação da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção do perfil 1 de Bandis et al. (1981) com  $JRC$  de 18 e comprimento de 6 cm.

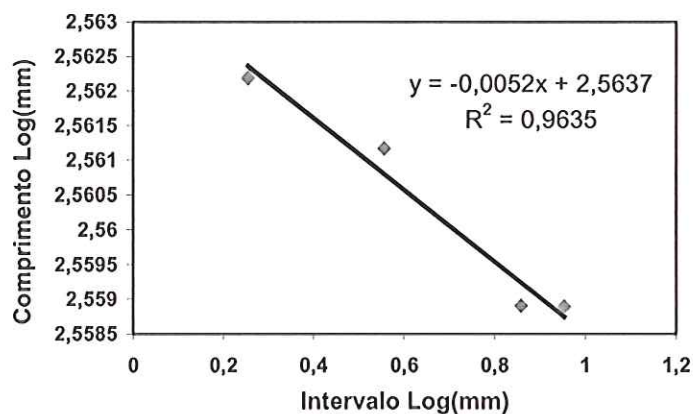


Figura E11. Obtenção da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção do perfil 4 de Bandis et al. (1981) com  $JRC$  de 8 e comprimento de 36 cm.

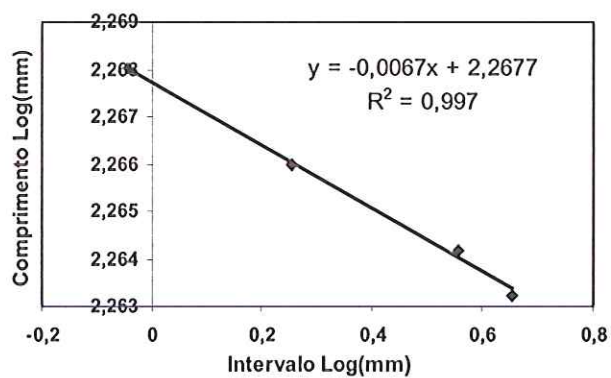


Figura E12. Obtenção da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção do perfil 4 de Bandis et al. (1981) com  $JRC$  de 11 e comprimento de 18 cm.

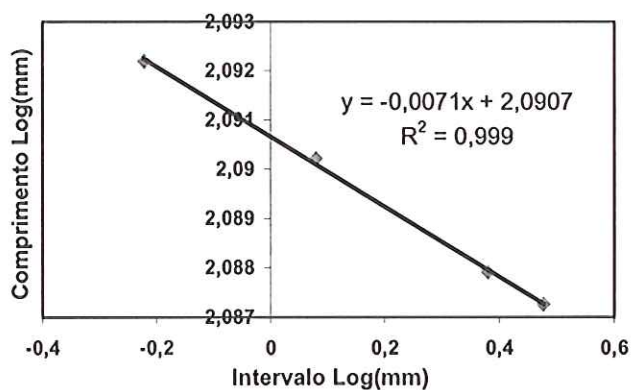


Figura E13. Obtenção da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção do perfil 4 de Bandis et al. (1981) com *JRC* de 13 e comprimento de 12 cm.

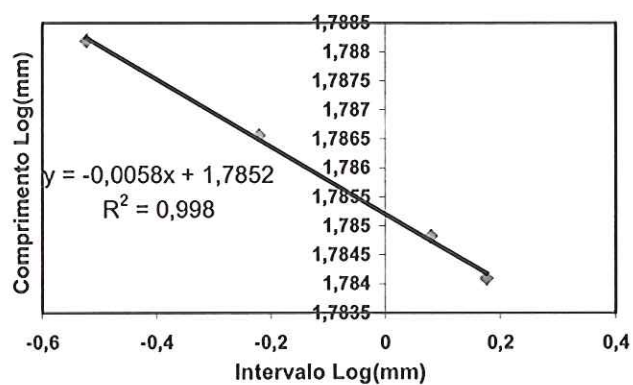


Figura E14. Obtenção da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção do perfil 4 de Bandis et al. (1981) com *JRC* de 14,5 e comprimento de 6 cm.

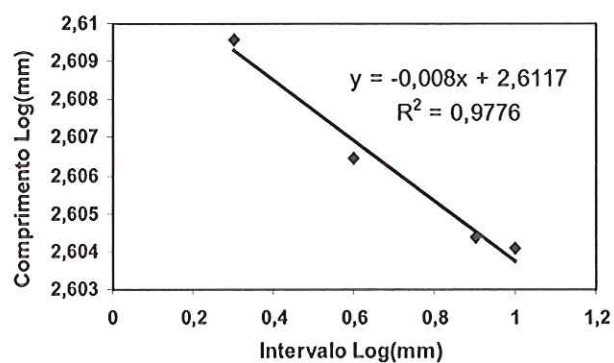


Figura E15. Determinação da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção do perfil 7 de Bandis et al. (1981) com *JRC* de 7,5 e comprimento de 40 cm.



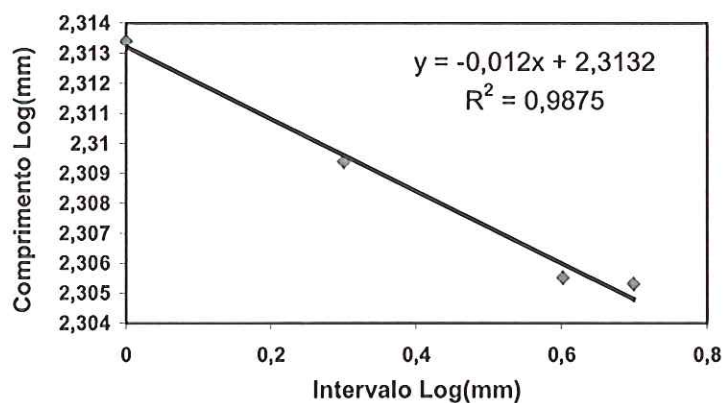


Figura E16. Determinação da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção do perfil 7 de Bandis et al. (1981) com *JRC* de 11 e comprimento de 20 cm.

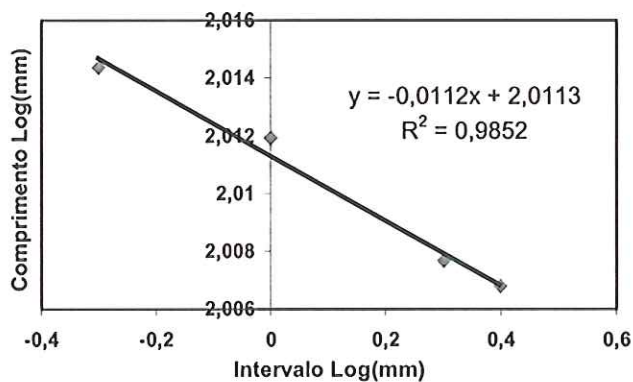


Figura E17. Determinação da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção do perfil 7 de Bandis et al. (1981) com *JRC* de 15,5 e comprimento de 10 cm.

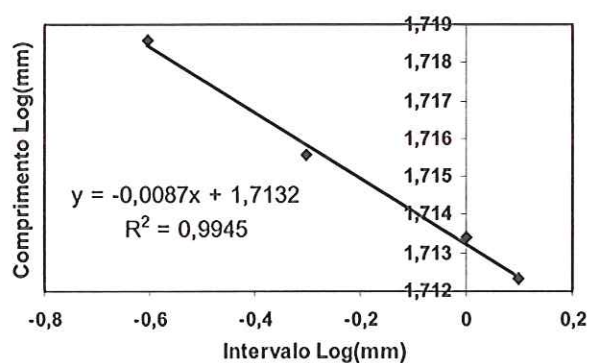


Figura E18. Determinação da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção do perfil 7 de Bandis et al. (1981) com *JRC* de 18,5 e comprimento de 5 cm.

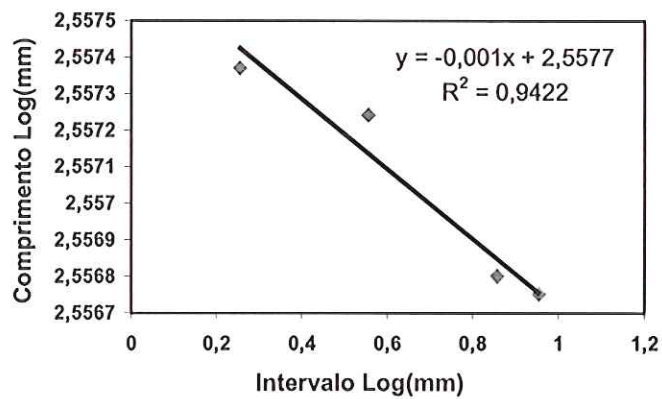


Figura E19. Obtenção da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção do perfil 11 de Bandis et al. (1981) com *JRC* de 4 e comprimento de 36 cm.

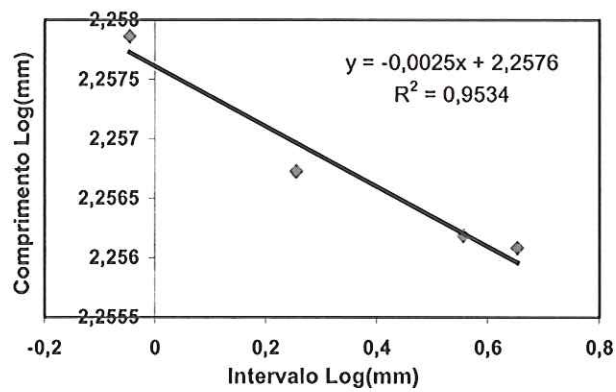


Figura E20. Obtenção da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção do perfil 11 de Bandis et al. (1981) com *JRC* de 3,5 e comprimento de 18 cm.

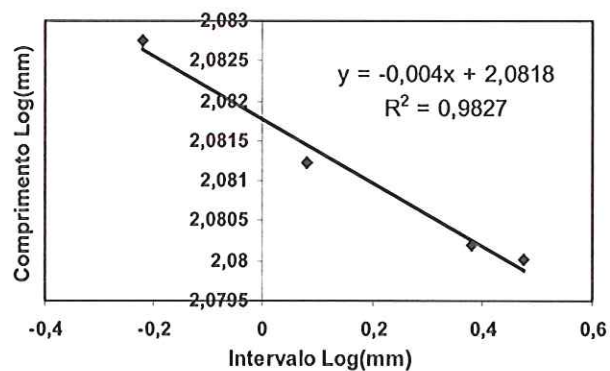


Figura E21. Obtenção da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção do perfil 11 de Bandis et al. (1981) com *JRC* de 4,5 e comprimento de 12 cm.

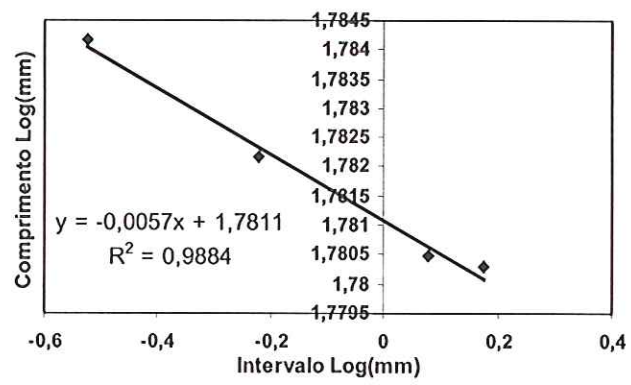


Figura E22. Obtenção da Dimensão Fractal e parâmetro de Intersecção do perfil 11 de Bandis et al. (1981) com  $JRC$  de 5 e comprimento de 6 cm.