Campus de São Carlos

PROPAGAÇÃO DE FRATURAS
EM JUNTAS RUGOSAS
NÃO-PERSISTENTES

AUTOR: VICTOR HUGO GAITÁN OLIVA

ORIENTADOR: PROF. DR. ANTONIO AIRTON BORTOLUCCI

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**ESCOLA DE ENGENHARIA
DE SÃO CARLOS**

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA

**Propagação de Fraturas em juntas rugosas
não-persistentes**

Victor Hugo Gaitán-Oliva

Dissertação apresentada à Escola de
Engenharia de São Carlos da
Universidade de São Paulo, como
parte dos requisitos para a obtenção
do Título de Mestre em Geotecnia.

Orientador: Antonio Airton Bortolucci

São Carlos
2005

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA

Propagação de fraturas em juntas rugosas
não-persistentes

Victor Hugo Gaitán-Oliva

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

G144c Gaitán-Oliva, Victor Hugo
Propagação de fraturas em juntas rugosas não-
persistentes / Victor Hugo Gaitán-Oliva. -- São
Carlos, 2005.

Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia de
São Carlos-Universidade de São Paulo, 2005.

Área: Geotecnia.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Airton Bortolucci.

1. Coalescência. 2. JCR. 3. Juntas descontinuas.
4. Juntas não-persistentes. 5. Juntas rugosas.
6. Maciços rochosos fraturado. 7. Ponte rochosa.
- I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **VICTOR HUGO GAITAN OLIVA**

Dissertação defendida e julgada em 04-02-2005 perante a Comissão Julgadora:

Prof. Dr. **ANTONIO AIRTON BORTOLUCCI (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

aprovado

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

Aprovado

Prof. Dr. **CARLOS DE ALMEIDA NÓBREGA**
(UNESP/Rio Claro)

aprovado

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

Profª. Titular **MARIA DO CARMO CALIJURI**
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

“A Deus, nosso padre. Aos meus pais, Hugo e Yolanda, pelo amor sempre presente. Aos meus irmãos, Erika e Gerardo, meus eternos amados. Aos meus amigos, tantos...”

AGRADECIMENTOS

Ao professor Antonio Airton Bortolucci pela orientação e amizade.

À CAPES, pela concessão da bolsa de estudo.

Aos professores do departamento de Geotecnia, e em especial para Nelson Aoki, José Carlos Cintra e Tarcísio Barreto Celestino, não somente pela conversas acadêmicas como também pelas lições da vida.

Ao engenheiro Benedito Osvaldo de Souza pela sempre presente disposição e colaboração nos ensaios de laboratório. Além disso, pelo ensino da cultura brasileira e os temas filosóficos.

Às secretárias Maristela Batissaco e Neiva Mompean Rosalis pela ajuda em todo momento, ao engenheiro Herivelto Moreira dos Santos pelos múltiplos socorros ao computador.

Aos funcionários e colegas do Departamento de Geotecnia pela amizade e auxílio durante a elaboração deste trabalho.

Aos meus prezados amigos, que não listarei aqui, pois não teria tanto espaço o papel para escrever tantos nomes e tantas coisas que quero lhes dizer desde o meu coração. Saibam sim, que agradeço a Deus por ter-lhes conhecido neste longo caminho pelo paraíso.

À Andréa Novelli pela grande ajuda e motivação que me deste no final da minha pesquisa.

À minha família: minha mãe Yolanda Aurora, meu pai Hugo, minha irmã Erika e meu irmão Gerardo, pelo amor, o incentivo, a paciência e os esforços para que eu chegasse até aqui.

Ao povo de Honduras e do Brasil, o primeiro que pagou meus estudos para me formar de engenheiro Civil, e o segundo que com seu suor e trabalho financiou meu mestrado. Estarei sempre em grande dívida com todos vos.

RESUMO

Gaitán-Oliva, V. H. (2004). *Propagação de fraturas em juntas rugosas não-persistentes*. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2005, 131 p.

O presente trabalho foi realizado para estudar o efeito sobre a propagação de fraturas em juntas não-persistentes quando existe uma variação da rugosidade nas juntas. Para esta abordagem, foram analisados os modos de coalescência, o ângulo de início das fraturas, a resistência à compressão e deformação de modelos de argamassa contendo juntas não-persistentes e submetidos a estados biaxiais de tensão. Na literatura especializada encontram-se vários trabalhos que estudam o comportamento de juntas lisas não-persistentes. Infelizmente, este tipo de juntas não leva em conta os efeitos da dilatação e do aumento do atrito. Neste estudo, desenvolveu-se um método para produzir juntas rugosas não-persistentes dentro dos moldes de argamassa. Desta forma, conseguiu-se comparar os diferentes modos de ruptura, tanto para as juntas lisas como as rugosas.

A configuração geométrica usada foi de 15 juntas com $a=54^\circ$; $b=60^\circ$; $L_j = L_b = 50\text{mm}$ e $d=25\text{mm}$. Onde a é o ângulo gerado entre o plano de uma junta e o plano formado entre as pontas de juntas não-coplanares, b é a inclinação da junta com respeito a plano de tensão maior, L_b denota a distância entre juntas paralelas coplanares, L_j é o comprimento da junta e d é a distância entre juntas paralelas não coplanares. Estes parâmetros mantiveram-se constantes em todos os ensaios, tanto para as juntas lisas ($JRC=0$) como as rugosas ($JRC= 6,96$ e $JRC= 12,25$). Usando os parâmetros acima mencionados, observou-se que o tipo de ruptura sempre aconteceu por escalonamento.

Para as amostras contendo as juntas lisas, $JRC=0$, o mecanismo principal de coalescência entre as juntas é a tração. Para estas juntas, os ângulos de início das fraturas, em média, resultaram de 64° e 65° para esquerda e direita, respectivamente. Em média, a resistência a compressão normalizada ($s_{nor} = \frac{s_1 - s_2}{s_{cs}}$; onde s_1 e s_2 são as tensões principais e s_{cs} é a resistência média à compressão simples) destes corpos de

prova resultou ter o valor mais baixo, $s_{nor}=0,52$, e a maior deformação, $e=0,0057$. No caso das juntas com $JRC=6,7$, a coalescência ocorreu tanto por tração como por cisalhamento, descrevendo um caminho ondulante entre as pontas das juntas. O ângulo médio de início das fraturas foi de 40° para o lado esquerdo e 48° para o lado direito. A resistência média normalizada destes corpos a compressão foi de $s_{nor}=0,54$ e uma deformação de $e=0,0053$. Com as juntas com $JRC=12,3$, a coalescência também apresentou ambos os mecanismos, tração e cisalhamento, seguindo uma direção inclinada no início e trajetória reta no meio. Os ângulos de início obtidos foram 5° no lado esquerdo e 20° do lado direito. Os valores maiores de resistência média normalizada e o valor médio menor de deformação foram obtidos nestes tipo de juntas, sendo estes de $s_{nor}=0,59$ e $e=0,0045$.

Verificou-se então que a rugosidade tem uma grande influência sobre a propagação da fratura, afetando grandemente o modo de coalescência, o ângulo de início de propagação das fraturas e a resistência e deformação total dos corpos de prova.

Palavras chave: Coalescência, JRC , juntas descontínuas, juntas não-persistentes, juntas rugosas, maciços rochosos fraturado, ponte rochosa.

ABSTRACT

Gaitán-Oliva, V. H. (2004). *Fracture propagation on rough non-persistent joints*. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2005, 131 p.

The present experimental study was conducted to investigate the effect of joint roughness on the fracture propagation of models with non-persistent joints. For this approach the parameters investigated are: coalescence, the crack initiation angle, the compressive strength and deformation of the mortar samples containing non-persistent rough joints under biaxial loading. There are many works in specialized literature that study the behavior of non-persistent smooth joints, unfortunately, this kind of approach does not take into account the effect of the dilation and the increase of friction due to the joint roughness. In this study, a new method was developed to produce non-persistent rough joints inside the mortar models. With this method it was possible to compare the different paths of rupture generated for the smooth and for the rough joints.

Each sample had 15 joints with $\alpha=54^\circ$; $\beta=60^\circ$; $L_j = L_b = 50\text{mm}$ and $d = 25\text{mm}$. Where α is the formed angle between the joint plane and the plane generated by two non coplanar joint tips, β is the joint inclination angle with the principal plane stress, L_b is the distance between coplanar joints, L_j is the length of the joint, d is the distance between two non-coplanar joints. These parameters remained constant in all the tests; the only variation permitted was in the joint roughness: from smooth joints ($JRC = 0$) to rough joints ($JRC = 6,96$ and $JRC = 12,25$). Using the mentioned parameters before it was always obtained the stepping failure.

For the samples containing smooth joints, $JRC=0$, the main mechanism of coalescence is tension. For these joints the average crack initiation angles, had resulted of 64° and 65° for left and right side, respectively. The average normalized compression strength ($s_{nor} = \frac{s_1 - s_2}{s_{cs}}$; where s_1 and s_2 are the principal stresses and s_{cs} is the average compression strength) of these tests resulted to have the lowest value, $s_{nor} = 0,52$, and the highest deformation, $\epsilon=0,0057$. In the case of joints with $JRC = 6,7$; the mechanisms of coalescence are tension and shear, growing in a waving path between the joint tips. The average crack initiation angle was of 40° for the left side and 48° for

the right side of the joint. The average normalized compression strength of these tests was of $\sigma_{nor} = 0,54$ and deformation $\epsilon = 0,0053$. With joints having $JRC = 12,3$; the coalescence also presents both mechanisms, tension and shear, following a direction inclined in the beginning and a straight line in the middle of the way. The crack initiation angles had been: 5° in the left side and 20° of the right side. The highest values of average normalized strength resistant and the lowest average value of deformation were found in this type of joint, being of $\sigma_{nor} = 0,59$ e $\epsilon = 0,0045$ respectively.

With this approach, it was verified that the joint roughness influence the fracture propagation, affecting the coalescence, the crack initiation angle, the resistance and total deformation of the tested specimens.

Keywords : Coalescence, JRC , discontinuous joints, non-persistent joints, rough joints, fracture rock masses, rock-bridge.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Métodos disponíveis para medição da rugosidade de superfícies. GRASSELLI (2001)	7
Figura 2.2 – Perfilômetro de ponta contato da EESC	8
Figura 2.3 – Perfilômetro de pequenas amostras. DEVELI <i>et al.</i> (2001)	9
Figura 2.4 – Geometria obtida a partir do perfilômetro e processada com o software SGIPRO. DEVELI <i>et al.</i> (2001)	10
Figura 2.5 – Superfície obtida com o perfilômetro laser. CHAE <i>et al.</i> (2004)	11
Figura 2.6 – Gráfico de <i>JRC</i> versus dimensão fractal. WAKABAYASHI & FUKUSHIGE (1992)	12
Figura 2.7 – Mecanismos de ruptura por cisalhamento. KABEYA & LEGGE (1996)	14
Figura 2.8 – Componentes da envolvente de ruptura cisalhamento-tensão normal. PATTON (1966)	16
Figura 2.9 – Obtenção do ângulo α_i pelo ensaio de inclinação (<i>Tilt Test</i>)	17
Figura 2.10 - Perfis típicos de rugosidade para determinar o valor de <i>JRC</i> . BARTON & CHOUBEY (1977)	18
Figura 2.11 – Componentes da tensão próximos à ponta da junta. ERDOGAN & SIH (1963)	21
Figura 2.12 – Possíveis caminhos de propagação de fraturas em juntas não-persistentes. POLLARD <i>et al.</i> (1982)	22
Figura 2.13 – Representação geométrica da propagação de fraturas. HORII & NEMAT-NASSER (1986)	23
Figura 2.14 – Explicação gráfica do conceito do EVD. KANEKO & SHIBA (1990)	24
Figura 2.15 – Configuração dos corpos virtuais. SCAVIA & CASTELLI (1996)	26
Figura 2.16 – Idéia básica para derivação do módulo de Young equivalente. WU & WANG (2001)	27
Figura 2.17 – Modelo matemático apresentando a configuração geométrica das juntas. SUNG-OONG (2000)	28
Figura 2.18 – Curva de tensão vs deformação para os corpos de prova com múltiplas juntas. Os pontos a,...,j correspondem aos indicados na Figura 2.18. WONG <i>et al.</i> (2002,b)	29
Figura 2.19 – Formas de ruptura dos diferentes tipos de configuração das juntas. WONG <i>et al.</i> (2002,b)	30
Figura 2.20 – Geometria dos corpos de prova e juntas. SAVILAHTI <i>et al.</i> (1990)	31
Figura 2.21 – Sistema de carregamento dos ensaios de cisalhamento. SAVILAHTI <i>et al.</i> (1990)	32
Figura 2.22 – Geometria das juntas não-persistentes em forma de cruz. KESHAN <i>et al.</i> (1990)	33
Figura 2.23 – Variação da resistência com o ângulo θ . KESHAN <i>et al.</i> (1990)	33

Figura 2.24 – Geometria dos corpos de prova multi-fraturados utilizados por JAMIL (1992)	36
Figura 2.25 – Configuração geométrica dos corpos de prova. SHEN (1995)	37
Figura 2.26 – Configuração da matriz de juntas. CHONG (1998)	38
Figura 2.27 – Configuração da fratura tipo “z”. CHONG (1998)	41
Figura 2.28 – Geometria dos corpos de prova. WONG & CHAU (1998)	42
Figura 2.29 – Nove diferentes tipos de propagação de fraturas. As letras S, M e W identificam os mecanismos de ruptura, cisalhamento, cisalhamento/tração e tração. WONG & CHAU (1998)	43
Figura 2.30 – Geometria do corpo de prova. WONG <i>et al.</i> (2002)	44
Figura 2.31 – Esquema da envoltória de resistência Mohr-Coulomb.	45
Figura 3.1 – Granito fanerítico equigranular	49
Figura 3.2 – Granito fanerítico inequigranular	49
Figura 3.3 – Amostras das juntas no perfilômetro da EESC. Na esquerda com ponta arredonda e na direita com ponta afiada.	50
Figura 3.4 – Superfícies das juntas digitalizadas depois de medidas com o perfilômetro. As unidades dos eixos estão representadas em micrometros (μm).	50
Figura 3.5 – Configuração geométrica das juntas não-persistentes. Onde: $\mathbf{b}$ é a inclinação da junta com relação ao plano de tensão maior; $\mathbf{a}$ é o ângulo gerado entre o plano de uma junta e o plano formado entre as pontas de juntas não-coplanares; Lb denota à distância entre juntas paralelas coplanares; Lj é o comprimento da junta e d é a distância entre juntas paralelas não coplanares	51
Figura 3.6 – Esquema das tampas usadas para fixar as juntas	52
Figura 3.7 – Fixação das fitas de poliéster na fôrma de aço	52
Figura 3.8 – Desenho esquemático da fôrma de aço	53
Figura 3.9 – Corpo de prova depois da concretagem	54
Figura 3.10 – Retificação das faces do corpo de prova	55
Figura 3.11 – Esquema do sistema de carregamento biaxial. Modificado de CHONG (1998).	56
Figura 3.12 – Prismas de transmissão de carga. CHONG (1998) e AGUIAR (1998).	57
Figura 3.13 – Sistema final de ensaios biaxiais	57
Figura 3.14 – a) retificação dos corpos de prova cilíndricos. b) esquema dos ensaios triaxiais	58
Figura 3.15 – Ensaios de inclinação (<i>Tilt Test</i>)	61
Figura 3.16 – Anel de aço para fixar as peças de argamassa	62
Figura 3.17 – Parte superior e inferior do anel sem contato	63
Figura 3.18 – Configuração de LVDT no ensaio de cisalhamento	63
Figura 3.19 – Representação gráfica dos ensaios de cisalhamento	64
Figura 4.1 – Envoltórias de resistência instantâneas para distintos valores de tensão obtidas com o programa <i>Rocklab</i> ® 2004.	67

Figura 4.2 – Seções utilizadas nos corpos de prova. Unidades apresentadas em micrômetros (μm)	68
Figura 4.3 – Forma gráfica da lei empírica de resistência das juntas de rochas.	72
Figura 4.4 – Envoltória de <i>JRC</i> das juntas rugosas.	74
Figura 4.5 – Configuração geométrica dos blocos ANL	76
Figura 4.6 – Ruptura típica nos corpos de prova ANL	77
Figura 4.7 – Configuração geométrica dos corpos de prova BNL	79
Figura 4.8 – Modo de propagação das fraturas dos modelos B1L	80
Figura 4.9 – Modo de propagação das fraturas dos modelos B2L	80
Figura 4.10 – Resistência normalizada dos corpos de prova BNL	81
Figura 4.11 – Configuração geométrica dos corpos de prova CNX	83
Figura 4.12 – Ângulo de início da propagação da fratura (<i>h</i>) para os modelos CNL.	83
Figura 4.13 – Coalescência típica dos modelos CNL	84
Figura 4.14 – Ângulo de início da propagação da fratura (<i>h</i>) para os modelos CNR.	85
Figura 4.15 – Coalescência típica de fraturas nos modelos CNR	86
Figura 4.16 – Mecanismos de coalescência típicos dos modelos CNR	87
Figura 4.17 – Ângulo de início da propagação da fratura (<i>h</i>) para os modelos CNR	88
Figura 4.18 – coalescência típica das fraturas nos modelos CNRR	89
Figura 4.19 – Mecanismos de coalescência típicos dos modelos CNRR	89
Figura 4.20 – Curva de Resistência Normalizada (s_{nor}) x <i>JRC</i> , modelos CNX	92
Figura 4.21 – Curva de Módulo de Elasticidade x <i>JRC</i> , modelos CNX	93
Figura A.1 – Curva Tensão x Deformação A1L	110
Figura A.2 – Curva Tensão x Deformação A2L	111
Figura A.3 – Curva Tensão x Deformação A3L	112
Figura A.4 – Curva Tensão x Deformação A4L	113
Figura A.5 – Curva Tensão x Deformação B1L	114
Figura A.6 – Curva Tensão x Deformação B3L	115
Figura A.7 – Curva Tensão x Deformação B4L	116
Figura A.8 – Curva Tensão x Deformação B5L	117
Figura A.9 – Curva Tensão x Deformação B6L	118
Figura A.10 – Curva de Tensão x Deformação C1L	119
Figura A.11 – Curva Tensão x Deformação C2L	120
Figura A.12 – Curva Tensão x Deformação C3L	121
Figura A.13 – Curva Tensão x Deformação C4L	122
Figura A.14 – Curva Tensão x Deformação C1R	123
Figura A.15 – Curva Tensão x Deformação C2R	124

Figura A.16 – Curva Tensão x Deformação C3R	125
Figura A.17 – Curva Tensão x Deformação C4R	126
Figura A.18 – Curva Tensão x Deformação C1RR	127
Figura A.19 – Curva Tensão x Deformação C2RR	128
Figura A.20 – Curva Tensão x Deformação C3RR	129
Figura A.21 – Curva Tensão x Deformação C4RR	130
Figura B.1 – Relação das tensões principais com a equação de BARTON (1976)	131
Figura C.1 – Relação da deformação com o <i>JRC</i> . Modelos CNX	133

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Modos de coalescência dependentes da inclinação α . SHEN (1995)	38
Tabela 3.1 – Resultado dos ensaios de compressão simples	59
Tabela 3.2 – Resultado de ensaios de compressão triaxial.....	60
Tabela 3.3 – Resultado dos ensaios de inclinação (<i>Tilt Test</i>)	61
Tabela 3.4 – Resultado dos ensaios de cisalhamento direto.....	64
Tabela 4.1 – <i>JRCn</i> visual e estatístico das seções da junta rugosa 1	70
Tabela 4.2 – <i>JRCn</i> visual e estatístico das seções da junta 2.....	70
Tabela 4.3 – Resultado dos ensaios de inclinação (<i>Tilt Test</i>). Onde CNX (sendo N igual a 1,2,..., etc e X igual a L, R ou RR) representa o número do corpo de prova, “e” e “d” o sentido do ensaio.	71
Tabela 4.4 – Média do valor de <i>JRCn</i> obtido a partir dos ensaios de cisalhamento. Onde CNX (sendo N igual a 1,2,..., etc e X igual a L, R ou RR) representa o número do corpo de prova, “e” e “d” o sentido do ensaio.....	73
Tabela 4.5 – Resultado dos ensaios biaxial. Onde: <i>e</i> representa a deformação no plano de tensão menor.....	75
Tabela 4.6 – Resultados dos ensaios biaxiais ANL.....	78
Tabela 4.7 – Resultados dos ensaios biaxiais BNL	82
Tabela 4.8 – Resultado dos ângulos de início da propagação da fratura nos modelos CNL	84
Tabela 4.9 – Resultados dos ensaios biaxiais CNL	85
Tabela 4.10 – Resultado dos ângulos de início da propagação da fratura nos modelos CNR....	86
Tabela 4.11 – Resultados dos ensaios biaxiais CNR	88
Tabela 4.12 – Resultado dos ângulos de início da propagação da fratura nos modelos CNRR.....	88
Tabela 4.13 – Resultado dos ensaios biaxiais CNRR	90
Tabela 4.14 – Resultado do ângulo de propagação da fratura e modos de coalescência nos ensaios CNX	91
Tabela 4.15 – Resultado da resposta mecânica dos ensaios CNX.....	93
Tabela 4.16 – Sumário dos ângulos <i>h</i> e a coalescência dos ensaios biaxiais.	94
Tabela 4.17 – Resumo da resistência à compressão normalizada, deformação, módulo de elasticidade e trabalho dos ensaios biaxiais.	95

LISTA DE SIMBOLOS

a	Ângulo gerado entre o plano de uma junta e o plano formado entre as pontas de juntas não-coplanares (°)
a_l	Ângulo obtido do ensaio de inclinação (°)
ACF	Função de auto-correlação
A_s	Tamanho médio das partículas granulares (cm ²)
b	Inclinação da junta com respeito ao plano de tensão maior (°)
c	Coesão (MPa)
L_c	Espaçamento entre centros das juntas (mm)
CLA	Linha central média
c_{xmax}	Coesão aparente (MPa)
Df	Ângulo de rugosidade da junta (°)
DS_l	Taxa de carregamento (kN/seg)
d	Distância entre juntas paralelas não coplanares (mm)
df	Dimensão fractal
d_n	Ângulo de dilatação máxima (°)
e	Deformação
E	Módulo de elasticidade (GPa)
E_m	Módulo de deformação (GPa)
EVD_j	Volume de defeito equivalente da junta (m ³)
f_b	Ângulo de atrito básico (°)
f_r	Ângulo de atrito residual (°)
G	Módulo de cisalhamento (GPa)
h	Ângulo de início da fratura (°)
i	Inclinação das irregularidades (°)
JCS	Resistência da parede da junta (<i>Joint wall compression strength</i> , MPa)
JK_n	Rigidez normal da junta (MPa/mm)
JK_s	Rigidez cisalhante da junta (MPa/mm)
JRC	Coefficiente de rugosidade da junta (<i>Joint roughness coefficient</i>)
K	Grau de persistência
K_I	Fator de intensidade de tensão – modo I (MPa*m ^{1/2})

K_{II}	Fator de intensidade de tensão – modo II (MPa*m ^{1/2})
L_b	Distância entre juntas paralelas coplanares (mm)
L_c	Espaçamento entre centros das juntas (mm)
L_j	Comprimento da junta (mm)
m	Coefficiente de atrito na junta
m_b, s_1	Constantes dependentes da rocha HOEK & BROWN (1980)
MVS	Valor da média quadrada
n	Módulo de Poisson
P_n	Ângulo de pressão média (MPa)
r, q	Coordenadas polares
r_2	Constante elástica intrínseca do corpo intacto
RMS	Raiz média quadrada
s_1, s_2	Tensões principais (MPa)
s_{cs}	Resistência à compressão simples (MPa)
s_n	Tensão normal à junta (MPa)
s_{nor}	Resistência à compressão normalizada
s_q	Tensão tangencial (MPa)
s_r	Tensão radial (MPa)
s	Valor de sobreposição das juntas (mm)
s_2	Tensor médio de tensões
SF	Função estrutura
SI	Espaçamento entre linhas de digitação do perfil (mm)
t	Tensão de cisalhamento (MPa)
$t_{r,q}$	Tensão de cisalhamento (MPa)
V	Volume total do corpo (m ³)
V_d	Volume de defeito produzido pelas juntas (m ³)
w	Intensidade de juntas
x, y, z	Coordenadas cartesianas
Z_2	Primeira derivada da raiz média quadrada
Z_3	Segunda derivada da raiz média quadrada

Z_4 Relação entre a diferença das inclinações positivas e negativas sobre o comprimento do perfil

SUMÁRIO

Lista de figuras	I
Lista de tabelas	V
Lista de símbolos	VI
CAPÍTULO 1	1
INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Generalidades	1
1.2 Objetivos da pesquisa.....	3
1.3 Abordagem da pesquisa	3
CAPÍTULO 2	6
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1 Rugosidade	6
2.1.1 Descrição da rugosidade	7
2.1.2 Quantificação da rugosidade	11
2.1.3 Relação rugosidade-dilatância	14
2.2 Estudos sobre juntas não-persistentes	19
2.2.1 Modelos matemáticos e computacionais (método indireto)	20
2.2.2 Ensaios de modelos reais (método direto).....	31
2.3 Critério de Resistência	45
CAPÍTULO 3	47
SIMULAÇÃO FÍSICA – ENSAIOS DE LABORATÓRIO	47
3.1 Introdução.....	47
3.2 Modelagem do maciço rochoso.....	48
3.2.1 Modelagem das juntas lisas e rugosas.....	48
3.2.2 Caracterização da rugosidade	50
3.2.3 Distribuição espacial das juntas	51
3.2.4 Fixação das juntas no corpo de prova	52
3.2.5 Molde para os corpos de prova com juntas não-persistentes	53
3.2.6 Modelagem da matriz rochosa	53
3.3 Ensaios biaxiais	55
3.3.1 Sistema de carregamento biaxial.	55
3.3.2 Transmissão das cargas ao corpo de prova	56
3.4 Ensaios de compressão simples, triaxial e de cisalhamento direto.	58
3.4.1 Ensaios de compressão simples e triaxial.....	58
3.3.2 Ensaios de cisalhamento direto.	60
CAPÍTULO 4	65
RESULTADO E ANÁLISE DOS DADOS.....	65
4.1 Introdução.....	65
4.2 Ensaios de compressão simples e triaxial.	66
4.2.1 Ensaios de compressão simples.	66
4.2.2 Ensaios de compressão triaxial.....	66
4.3 Quantificação das superfícies rugosas.....	68

4.3.1 Análise visual das superfícies	69
4.3.2 Análise estatística das superfícies.....	69
4.3.3 Ensaios de cisalhamento de baixo nível de tensões.....	71
4.3.4 Ensaios de cisalhamento com tensão normal variável.....	72
4.3.5 Resultado das análises	74
4.5 Ensaios de compressão biaxial.....	75
4.5.1 Ensaios biaxiais ANL.....	76
4.5.2 Ensaios biaxiais BNL.....	79
4.5.3 Ensaios biaxiais CNX.....	82
4.5.2.1 Ensaios Biaxiais CNL	83
4.5.2.2 Ensaios Biaxiais CNR	85
4.5.2.3 Ensaios Biaxiais CNRR	88
4.5.2.4 Resultado das análises dos Ensaios Biaxiais CNX.....	91
4.5.4 Resultados das análises dos ensaios biaxiais.....	93
CAPÍTULO 5.....	96
CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	96
5.1 Modelagem física.....	96
5.2 Ensaios de compressão simples e triaxial.....	97
5.3 Caracterização e quantificação da superfície rugosa.....	97
5.4 Ensaios de compressão biaxial.....	98
5.4.1 Ângulo de início da propagação da fratura (h).....	98
5.4.2 Coalescência da fratura	99
5.4.3 Resistência à compressão normalizada (s_{nor})	99
5.4.4 Deformação (e), Módulo de elasticidade (E) e Trabalho realizado (W).	100
5.5 Recomendações	101
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	102
APÊNDICE.....	109
APÊNDICE A. Curvas de Tensão x Deformação dos ensaios biaxiais.....	110
APÊNDICE B. Procedimento para determinar as tensões principais a partir da equação de BARTON (1976).	131
APÊNDICE C. Curva de deformação em relação ao <i>JRC</i>	132

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

“o segundo dia. Disse também Deus: Ajuntem-se as águas debaixo dos céus num só lugar, e apareça a porção seca. E assim o fez. À porção seca chamou Deus Terra e ao ajuntamento das águas, mares. E viu Deus que isso era bom”

Gênesis 1: 8-10.

1.1 Generalidades

As discontinuidades podem ser caracterizadas como persistentes, quando atravessam todo o maciço, ou não-persistentes, quando têm comprimentos limitados. As juntas persistentes transformam o maciço rochoso numa interação de blocos que modificam o comportamento de tensão-deformação do maciço. Neste caso, dependendo da orientação das juntas com respeito às tensões principais, o comportamento do maciço pode ser governado pelas características mecânicas das juntas, com baixa influência do material intacto. No caso das juntas não-persistentes, podem ser encontradas desde uma macro escala, em nível de tectônica de placas, até em micro escala, nomeadas de defeito do material ou micro-fissuras. Quando o maciço rochoso apresenta juntas não-persistentes e é submetido a carregamento ou alívio de tensão, a resposta tensão-deformação é controlada tanto pelas características do material intacto como pelas propriedades das juntas, fazendo assim, um sistema rocha-junta extremamente complexo e difícil de ser representado matematicamente.

Além da persistência dentro das juntas existe outra particularidade, que é a rugosidade. Esta produz um efeito de dilatação e um aumento do atrito quando as superfícies da junta tentam se deslocar uma sobre a outra. A dilatação e o aumento do atrito geram estados de tensão internos na junta que modificam as tensões vizinhas, criando assim sistemas de tensões que alteram desde a superfície da junta, cisalhando ou cavalgando sobre as rugosidades, até mudanças nas pontes rochosas que se encontram entre as juntas. Conseqüentemente, uma mudança na rugosidade interna da junta altera de maneira global o comportamento mecânico do maciço.

A análise dos maciços rochosos com juntas não-persistentes tem sido feita por meio de modelagem numérica, ensaios *in-situ* e com modelos físicos. A modelagem numérica usa corpos de prova virtuais nos quais se simulam diferentes tipos de ensaios (compressão uniaxial e biaxial, cisalhamento direto, entre outros) empregando-se para isto diferentes técnicas numéricas. Estas técnicas podem ser: elementos finitos, elementos de contorno, diferenças finitas, deslocamentos descontínuos, métodos energéticos, entre outros. A desvantagem deste tipo de abordagem é que usualmente trabalha-se dentro da mecânica do contínuo, o que obriga a utilizar algum tipo de artifício para modelar as juntas não-persistentes.

Por outro lado, os ensaios *in-situ*, são ensaios de grande escala, conseqüentemente, são caros, complexos e não repetitivos. Desta maneira, resulta uma tarefa titânica tentar separar as variáveis que influenciam o comportamento do maciço rochoso. Mas de qualquer forma, se as condições de ruptura são bem conhecidas, os dados obtidos são de grande utilidade para trabalhar no maciço rochoso onde foi feito o ensaio.

Outro tipo de abordagem são os modelos físicos, com os quais podem-se realizar ensaios de uma forma relativamente barata, simples e altamente repetitiva. Usam-se de dois tipos: os modelados com argamassas e os criados a partir de blocos de rochas. Com os modelos criados com argamassa, os materiais usualmente usados como aglutinador são o gesso e o cimento. Neste tipo de modelos, durante a moldagem, se geram as juntas descontínuas com lâminas de poliéster ou com lâminas de aço. Para os modelos criados a partir de blocos de rocha, as juntas são geradas mediante cortes com serra, obtendo assim juntas descontínuas abertas. Similarmente, em qualquer dos dois métodos o tamanho e a densidade das juntas, como outros fatores, podem ser perfeitamente controlados, sendo que esta é uma das principais vantagens deste tipo de ensaios.

Em contrapartida, neste tipo de modelagem as condições naturais das juntas ou da matriz rochosa são dificilmente reproduzidas.

Concluindo, observa-se que a complexidade do fenômeno tensão-deformação dentro dos maciços rochosos depende, entre outros fatores, tanto do sistema de juntas como da rugosidade interna das mesmas. Neste sentido, tentado aclarar como uma das variáveis afeta o comportamento dos maciços rochosos com juntas não-persistentes, estuda-se as conseqüências da variação da rugosidade interna das juntas sobre a propagação da fratura e conseqüentemente seu efeito sobre o conjunto junta-rocha.

1.2 Objetivos da pesquisa

O objetivo principal desta pesquisa é investigar a influência da rugosidade (JRC) sobre a propagação da fratura em modelos que apresentam juntas não-persistentes. Enfoca-se no modo de coalescência, no ângulo de início das fraturas, na resistência à compressão e deformação dos modelos, quando são mantidos constantes os valores de: ângulo gerado entre o plano de uma junta e o plano formado entre as pontas de juntas não-coplanares (α), ângulo de inclinação da junta (β), comprimento da junta (L_j), espaçamento entre juntas paralelas não coplanares (d), comprimento da ponte rochosa (L_b) e tensão confinante (σ_2).

1.3 Abordagem da pesquisa

O comportamento de maciços rochosos quando se apresentam juntas não-persistentes é controlado tanto pelas características do material intacto como pelas propriedades das juntas. Neste trabalho observaram-se as mudanças no comportamento mecânico dos corpos de prova quando se varia a rugosidade interna das juntas, para esta finalidade, o estudo dividiu-se em 5 etapas. Na primeira, desenvolveu-se um novo método para gerar juntas rugosas, mas o processo para inserir-las dentro dos corpos de prova foi o mesmo utilizado por JAMIL (1992). Na segunda etapa, testaram-se amostras do material intacto em ensaios uniaxiais e triaxiais, para determinar os parâmetros de resistência e de deformação da argamassa. Na terceira, ensaiaram-se de forma biaxial os corpos de prova que apresentavam juntas não-persistentes com os três tipos de

rugosidade, $JRC = 0; 6,7; 12,3$. Na quarta, realizaram-se ensaios de cisalhamento direto sobre juntas com diferentes valores de JRC . A última etapa consiste na interpretação e na análise dos resultados.

Na primeira etapa desta pesquisa, visou-se um método com o qual consegue-se reproduzir juntas naturais em filmes de poliéster que depois são inseridos dentro de blocos de argamassa, de 600x300x150mm. A explicação deste procedimento é exposta no Capítulo 3.

A segunda etapa consistiu em testar, triaxial e uniaxialmente, 77 corpos de prova de argamassa com diâmetro de 50mm e altura média de 96mm. Destes, 47 corpos de prova foram testados em ensaios de compressão simples e 30 em ensaios de compressão triaxial. Diferentes valores de tensões confinantes foram usados para os ensaios triaxiais, obtendo dessa forma, as resistências máximas e as envoltórias de resistência dos corpos de prova. A descrição dos resultados é apresentada no Capítulo 4

Na terceira etapa, ensaiaram-se biaxialmente 21 blocos de argamassa, de 600mm x300mm x150 mm, que apresentam juntas não-persistentes. Os ensaios dividiram-se em três grupos (ANL, BNL e CNX) de 4, 6 e 12 blocos, respectivamente. Cada bloco, dependendo do grupo, contendo 17, 14 e 15 juntas não-persistentes, respectivamente. Em cada grupo, foram mantidas constantes a inclinação da junta com respeito a plano de tensão maior, θ , ângulo gerado entre o plano de uma junta e o plano formado entre as pontas de juntas não-coplanares, α , o comprimento da junta, L_j , a distância entre fraturas paralelas não-coplanares, d , e o comprimento da ponte rochosa, L_r . Convém ressaltar que a variável estudada foi a rugosidade da junta, descrita pelo valor do coeficiente JRC , variando-o dentro de cada grupo. Detalhes sobre estes ensaios são apresentados nos Capítulos 3 e 4

Na quarta etapa, realizaram-se 31 ensaios de cisalhamento direto sobre as amostras de juntas retiradas dos blocos de argamassa após realizados os ensaios biaxiais. As amostras com as juntas foram testadas com diferentes valores de confinamento, obtendo-se as envoltórias de resistência para os diferentes valores de JRC . A aquisição de dados foi feita por meio de LVDT sendo os dados arquivados no computador em intervalos de 1 segundo. A descrição destes ensaios é apresentada no Capítulo 3.

O quinto estágio é dedicado à análise dos resultados obtidos correlacionando todos os ensaios antes mencionados. Estas informações são apresentadas no Capítulo 4.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

“Lo que fue volverá a ser, lo que se hizo se hará nuevamente. No hay nada nuevo bajo el sol. Y si te dicen: «Mira, esto es nuevo», aun eso ya fue en siglos anteriores.”

Eclesiastés 1:9-10.

Neste capítulo primeiramente relata-se alguns dos procedimentos utilizados para descrever e quantificar a rugosidade de uma junta em rocha, também, como a rugosidade altera o comportamento mecânico do maciço. Na segunda parte descrevem-se alguns dos métodos utilizados no estudo de corpos de prova que apresentam juntas não-persistentes. finalmente, a terceira parte é dedicada aos critérios de resistência utilizados para este tipo de corpos de prova.

2.1 Rugosidade

Um dos fatores mais importantes quando se fala sobre rugosidade é a descrição e quantificação da morfologia da superfície em estudo. Isto se deve ao fato que diferentes morfologias ou rugosidades geram valores distintos de resistência ao cisalhamento, que são conseqüentes da relação rugosidade-dilatância. Para tentar compreender esta relação, este sub-capítulo é dividido em três partes. A primeira parte, se refere alguns dos métodos usados para descrever a rugosidade. A segunda, apresenta as formas de quantificar a rugosidade. Na terceira parte, se resume alguns dos métodos usados para estudar a relação rugosidade-dilatância.

2.1.1 Descrição da rugosidade

Vários são os métodos que têm sido empregados na mecânica das rochas para poder descrever a superfície rugosa encontrada nas juntas. Alguns destes métodos usam técnicas de contato e outros usam métodos ópticos para determinar malhas de pontos que depois podem ser correlacionados e assim gerar as superfícies por meio de computadores. Um excelente resumo de tais métodos é apresentado por GRASSELLI (2001) e é sintetizado na Figura 2.1.

Figura 2.1 – Métodos disponíveis para medição da rugosidade de superfícies.

GRASSELLI (2001)

Um dos métodos mais usados para medir a superfície das juntas em rochas são os perfilômetros de contato, isto é devido ao baixo custo do equipamento e à facilidade de processamento dos dados obtidos a partir dele. Basicamente o funcionamento deste tipo de equipamento fundamenta-se nos procedimentos topográficos, pois são obtidas as

coordenadas x,y,z de cada ponto medido na superfície (Figura 2.2), para depois ser processado em qualquer programa de interpolação e assim gerar a superfície. Existem dois tipos de perfilômetros, os de ponta arredondada e os de ponta afiada com formato de agulha, cada um com precisões distintas. No caso dos perfilômetros com ponta arredonda, estes danificam menos a superfície, em contrapartida, tem menor resolução. O perfilômetro com ponta de agulha ou afiada, tem maior precisão pois consegue atingir espaços entre as partículas muito menores, em contraste, devido à ponta afiada, tem a tendência a riscar a superfície medida. A obtenção dos dados neste método usualmente é feita colocando um sensor de contato na barra que contém a ponta e assim, quando a ponta faz contato com a superfície esta envia um sinal ao aquisitor de dados ligado a um computador que registra as coordenados do ponto.

Figura 2.2 – Perfilômetro de ponta contato da EESC

DEVELI *et al.* (2001) desenvolveram um equipamento de medição mecânica e controlado por computador, para mensurar a superfície de amostras de rocha de 54mm x 54mm, Figura 2.3. Este equipamento foi projetado para poder se obter, de maneira rápida e de baixo custo, a superfície de espécimes que são encontrados *in-situ* a partir de ensaios rotativos (Max. 54 x 54mm). Consiste em três partes móveis com liberdade nos três eixos, x,y,z . O movimento das partes é gerado por motores controlados pelo computador e os dados são obtidos através de uma ponta arredondada de 0,2mm, obtendo assim, uma precisão de $\pm 0,05$ mm na direção x e y , e de $\pm 0,02$ mm na direção z . Para poder controlar os movimentos e fazer a aquisição dos dados do equipamento desenvolveram um software chamado SG1PRO, elaborado em linguagem C. Um exemplo da superfície obtida após medição esta apresentado na Figura 2.4.

Figura 2.3 – Perfilômetro de pequenas amostras. DEVELI *et al.* (2001)

Figura 2.4 – Geometria obtida a partir do perfilômetro e processada com o software SG1PRO. DEVELI *et al.* (2001)

Devido ao problema do contato com as amostras dos perfilômetros mecânicos outros autores têm optado por métodos que evitem esta situação. Dentro destes métodos encontram-se os que utilizam luz laser para determinar a rugosidade de uma superfície. Seguindo esta metodologia, CHAE *et al.* (2004) determinaram a rugosidade de juntas de amostras de granito com microscópios a laser. As amostras de 55mm de diâmetro e 100 mm de comprimento foram testadas mediante o ensaios brasileiro de tração e obtida assim uma superfície de ruptura. Após este procedimento as amostras foram colocadas no microscópio a laser e a morfologia da superfície de ruptura era determinada. Uma representação da morfologia obtida é mostrada na Figura 2.5. O espaçamento entre os eixos x e y foi de $2,5\mu\text{m}$ e a resolução obtida com este método para o eixo z foi de $0,05\mu\text{m}$.

Figura 2.5 – Superfície obtida com o perfilômetro laser. CHAE *et al.* (2004)

Observa-se que, em qualquer dos métodos expostos se obtém bons resultados e que as superfícies são bem definidas em qualquer caso. Assim, a escolha entre um método ou outro depende mais do grau de precisão requerido. Usualmente na mecânica de rochas trabalha-se em grandes escalas, razão pela qual os métodos mecânicos apresentam-se como uma boa alternativa.

2.1.2 Quantificação da rugosidade

Uma vez obtida a superfície de uma junta por qualquer dos métodos antes mencionados, procede-se a quantificá-la, isto é, no caso da mecânica das rochas, designar um valor através do qual pode-se prever o comportamento mecânico da junta quando é submetida a carregamentos. O índice mais aceito para esta medida é o coeficiente *JRC*, (*Joint Roughness Coefficient*) o qual pode ser traduzido como Coeficiente de Rugosidade da Junta. Este índice foi proposto por BARTON (1976) que, a partir de retroanálise de vários casos publicados, observou que existia uma relação entre a morfologia da superfície dos corpos de prova e a resistência ao cisalhamento que estes apresentavam. Como resultado, esta morfologia podia ser quantificada como um índice dentro da equação que descreve a envoltória de resistência das juntas ensaiadas. Uma melhor explicação sobre como obter este índice através de ensaios de cisalhamento direto ou por comparação visual é descrita no Capítulo 2.1.3. Desta forma, admitindo o

índice JRC como uma boa quantificação da rugosidade, vários autores tem pesquisado muitas formas para sua obtenção.

WAKABAYASHI & FUKUSHIGE (1992) determinaram a dimensão fractal de cada um dos perfis propostos por BARTON & CHOUBEY (1977) e propuseram uma equação (Eq.2.1) na qual mede-se a rugosidade por meio da dimensão fractal e se relaciona com o JRC . Concluíram que, quando se tem amostras de juntas distintas, mas, com igual dimensão fractal (df) os valores de JRC serão os mesmos e conseqüentemente a resistência mecânica das juntas será similar. Isto é devido a que o ângulo básico de atrito (f_b) não varia muito entre distintos tipo de rocha.

$$JRC = \sqrt{\frac{df - 1}{4,413 \times 10^{-5}}} \quad (2.1)$$

Na qual JRC é o valor de rugosidade da juntas e df representa o valor da dimensão fractal.

Figura 2.6 – Gráfico de JRC versus dimensão fractal. WAKABAYASHI & FUKUSHIGE (1992)

Outra forma para obter o valor do JRC é por meio de métodos estatísticos. Assim, TSE & CRUDEN (1979) digitalizaram os perfis propostos por BARTON & CHOUBEY (1977) e estudaram oito parâmetros estatísticos para determinar o valor de

JRC. Os parâmetros estudados foram: a raiz média quadrada (*RMS*), a linha central média (*CLA*), a primeira derivada da raiz média quadrada (Z_2), a segunda derivada da raiz média quadrada (Z_3), a relação entre a diferença das inclinações positivas e negativas sobre o comprimento do perfil (Z_4), valores da média quadrada (*MVS*), a função de auto-correlação (*ACF*) e o valor da função estrutura (*SF*). Concluíram que o valor que produzia o menor erro para quantificar o valor de *JRC* é o coeficiente de Z_2 e a relação obtida é representada pela Equação 2.2.

$$JRC = 32,2 + 32,47 \cdot \log_{10} Z_2 \quad (2.2)$$

$$Z_2 = \sqrt{\frac{1}{L} \cdot \int_0^L \left(\frac{dz(x)}{dx} \right)^2 dx} \quad (2.3)$$

Onde Z_2 é o valor da primeira derivada da raiz média quadrada, z é a amplitude da rugosidade com respeito a linha central e L é o comprimento do perfil.

YU, X. & VAYSSADE, B. (1990) revisaram os valores propostos por TSE & CRUDEN (*op cit*) para a obtenção do *JRC*, usando o mesmo método de digitação das superfícies mas levando em consideração o espaçamento (*SI*) entre as seções em que era realizado este processo. Concluíram que a equação relacionando o *JRC* com o índice Z_2 é influenciada por *SI* e como resultado propuseram as seguintes relações:

$$JRC = 60,32 \cdot Z_2 - 4,51 \quad , SI \leq 0,25 \text{ mm} \quad (2.4)$$

$$JRC = 61,79 \cdot Z_2 - 3,47 \quad , 0,25 < SI < 1 \text{ mm} \quad (2.5)$$

$$JRC = 64,22 \cdot Z_2 - 2,31 \quad , SI \geq 1 \text{ mm} \quad (2.6)$$

Outro estudo sobre a rugosidade elaborado por KABEYA & LEGGE (1996) relaciona o tamanho dos grãos minerais, com o comportamento ao cisalhamento das juntas e com o índice *JRC*. Foram fixadas duas variáveis, a matriz e o tipo de mineral, mudando somente o tamanho dos grãos. Posteriormente, com as amostras, fizeram ensaios de cisalhamento direto, de *tilt test* e a partir de retroanálise obteve-se o índice

JRC. Os autores concluíram que o *JRC* pode ser expresso pelas Equações 2.7 e 2.8 e que o mecanismo de ruptura por cisalhamento depende basicamente de três fatores: 1) matriz do corpo; 2) o tamanho dos grãos minerais ; 3) tensão normal Figura 2.7.

$$JRC = 4,027 \times A_s^{0,418} \quad (\text{tilt test}) \quad (2.7)$$

$$JRC = 6,313 \times A_s^{0,381} \quad (\text{cisalhamento}) \quad (2.8)$$

Onde *JRC* é o coeficiente de rugosidade da junta e *A_s* é o tamanho médio das partículas granulares.

Figura 2.7 – Mecanismos de ruptura por cisalhamento. KABEYA & LEGGE (1996)

2.1.3 Relação rugosidade -dilatância

O efeito da rugosidade sobre o cisalhamento e o atrito é maiormente verificado quando a junta está submetida a baixos níveis de confinamento e como resultado, este tende a ser mais importante que outros fatores (GRASSELLI, 2001). Assim, um dos trabalhos mais citados com respeito à dilatância e rugosidade em rochas foi feito por PATTON (1966), quem estudou a ruptura de taludes em maciços rochosos, comparando os resultados de ensaios de campo com os dados obtidos em ensaios de laboratório. Os

ensaios de laboratório foram realizados em corpos de prova de gesso calcinado de 74,93mm x 44,45mm x 50,8mm, com diferentes configurações de rugosidades. Desse modo, o autor indicou sete parâmetros correlacionados para produzir rupturas combinadas de dilatação e cisalhamento:

- 1) a inclinação das irregularidades “ i ”
- 2) o ângulo de atrito residual “ f_r ”
- 3) o tamanho das irregularidades
- 4) os deslocamentos ao longo do plano de ruptura
- 5) os níveis de tensão no plano de ruptura
- 6) a umidade no plano de ruptura
- 7) as tensões internas no material.

Concluiu que o gráfico da envoltória de resistência dos corpos de prova, quando submetidos ao cisalhamento direto, pode ser dividida em duas partes (Figura 2.8):

a) Fase inicial, descrita pela envoltória; $t = s_n \tan(f_b + i)$ (2.9)

b) Fase final, $t = c_{x \max} + s_n \tan(f_r)$ (2.10)

Onde t é a tensão de cisalhamento, s_n simboliza a tensão normal, i é o ângulo de inclinação da superfície dentada, f_b é o ângulo de atrito entre duas superfícies relativamente lisas, f_r é o ângulo de atrito residual de cisalhamento e $c_{x \max}$ é a coesão mobilizada quando os dentes são cisalhados.

Figura 2.8 – Componentes da envolvente de ruptura cisalhamento-tensão normal. PATTON (1966)

BARTON & CHOUBEY (1977) estabeleceram a *lei empírica do atrito nas juntas* das rochas, que pode ser usada para extrapolar e prever os valores de cisalhamento máximo de um corpo de prova ou uma junta num maciço rochoso. Os autores descrevem ainda uma medida empírica para determinar o valor da rugosidade de uma junta por meio do índice *JRC*. Este índice pode ser obtido de varias formas, entre elas podem se destacar duas: a primeira, é comparando a rugosidade com um perfil da Figura 2.10 e designando a qual categoria pertence, contudo, tem-se a desvantagem de depender muito da experiência e critério de quem faz a medida; na segunda forma se faz uma retroanálise do ensaio de *Tilt Test* (Figura 2.9) usando a fórmula:

$$JRC = \frac{1 + b}{\log_{10}\left(\frac{JCS}{\sigma_n}\right)} \quad (2.11)$$

Na qual *JRC* é o coeficiente de rugosidade da junta, α_l é o ângulo obtido do *Tilt Test*, ϕ_b é o ângulo básico de escorregamento, *JCS* (Joint wall Compression Strength)

representa a resistência à compressão da parede da junta e s_n é a tensão normal sobre a junta.

O ângulo α_1 é obtido por meio do *Tilt Test*, o qual, de forma resumida, consiste em colocar a amostra sobre uma superfície e incliná-la até um ângulo α_1 , como é esquematizado na Figura 2.9. O ângulo α_1 representa o máximo valor em que a parte superior da amostra não sofre movimentação.

Figura 2.9 – Obtenção do ângulo α_1 pelo ensaio de inclinação (Tilt Test)

Outro fenômeno estudado por BARTON & CHOUBEY (1977) diz respeito à dilatância quando uma junta desliza sobre a outra no momento do cisalhamento. Observaram que no instante que ocorre o cavalgamento das rugosidades, dependendo da intensidade da tensão normal à junta, podem acontecer uma das três possibilidades: a) rugosidades cisalhadas completamente, não produzindo dilatância; b) rugosidades parcialmente cisalhadas provocando dilatância e cisalhamento das rugosidades; c) rugosidades permanecem íntegras, somente produzindo dilatância. Definiram o efeito da dilatância na junta como o ângulo d_n , expresso na seguinte equação:

$$d_n = JRC * \log_{10} \left(\frac{JCS}{s_n} \right) \quad (2.12)$$

Figura 2.10 - Perfis típicos de rugosidade para determinar o valor de JRC.

BARTON & CHOUBEY (1977)

Segundo BANDIS (1990), o fenômeno de dilatância é a parte mais importante do comportamento da junta não planares (rugosas) já que, durante o cisalhamento, o vetor de deslocamento horizontal desvia-se da direção em que o esforço é aplicado para cavalgar as irregularidades da superfície, produzindo uma componente de deslocamento normal no corpo. Por outro lado, em constante tensão normal (σ_n), a dilatância agrega um componente geométrico (ângulo de dilatação, d_n) à resistência básica de atrito, ao

mesmo tempo que aumenta a condutividade hidráulica em magnitudes que tenha algum grau de relevância.

Para MAKSIMOVIE (1992) a resistência ao cisalhamento das juntas de uma rocha, pode ser descrita mediante um modelo mecânico onde as superfícies da rugosidade são zonas rígidas cavalgando umas sobre outras, num ângulo γ sobre as zonas de deslizamento e separadas por uma série de mecanismos pneumáticos. Assim, concluiu-se que a resistência ao cisalhamento da junta pode ser denotada pela equação:

$$t_f = s_n \tan \left[f_b + \frac{\Delta f}{\left(1 + \frac{s_n}{P_n}\right)} \right] \quad (2.13)$$

Na qual t_f é a resistência ao cisalhamento da descontinuidade, s_n é a tensão normal, f_b é o ângulo básico de atrito (obtido cisalhando o corpo de prova evitando a dilatação), Δf é o ângulo de rugosidade da junta (quando o $s_n = 0$, pode ser chamado também como ângulo de máxima dilatação) e P_n é o ângulo de pressão média (é igual ao valor de tensão normal na qual a contribuição da dilatação é igual a $\frac{1}{2}$ do ângulo de dilatação máxima, Δf).

2.2 Estudos sobre juntas não-persistentes

Os estudos feitos em juntas não-persistentes podem-se dividir em dois grupos: a) métodos diretos, que são aqueles em que o comportamento do maciço rochoso é simulado, elaborando corpos de prova, usualmente com materiais que simulam a rocha, e depois são testados em máquinas de ensaio. b) métodos indiretos, feitos mediante o modelagem matemática e/ou computacional, que atualmente se realizam de maneira conjunta. É de se observar que a grande maioria destes estudos é realizada com juntas lisas, evitando-se assim, a relação rugosidade - dilatação dentro das juntas.

2.2.1 Modelos matemáticos e computacionais (método indireto)

ERDOGAN & SIH (1963) estudaram matematicamente a propagação de fraturas em placas contendo uma junta não-persistente e submetidas a estados planos de carregamento ou submetidas a cisalhamento transversal (torção). No caso de uma placa contendo uma junta não-persistente e submetida a um estado plano de tensões (Figura 2.11), acontece um modo misto de propagação da fratura e as tensões nas proximidades da extremidade da junta são influenciadas pelos fatores de intensidade de tensão K_I (tração) e K_{II} (cisalhamento). Esta influencia é representada mediante as Equações 2.14 ; 2.15 e 2.16 em coordenadas polares.

$$\mathbf{s}_r = \frac{1}{\sqrt{2} \cdot r} \cdot \cos \frac{\mathbf{q}}{2} \left[K_I \cdot \left(1 + \sin^2 \frac{\mathbf{q}}{2} \right) + \frac{3}{2} K_{II} \cdot \sin \mathbf{q} - 2 \cdot K_{II} \cdot \tan \frac{\mathbf{q}}{2} \right] + \dots \quad (2.14)$$

$$\mathbf{s}_q = \frac{1}{\sqrt{2} \cdot r} \cdot \cos \frac{\mathbf{q}}{2} \cdot \left[K_I \cdot \cos^2 \frac{\mathbf{q}}{2} - \frac{3}{2} \cdot K_{II} \cdot \sin \mathbf{q} \right] + \dots \quad (2.15)$$

$$\mathbf{t}_{rq} = \frac{1}{2 \cdot \sqrt{2} r} \cdot \cos \frac{\mathbf{q}}{2} \cdot \left[K_I \cdot \sin \mathbf{q} + K_{II} \cdot (3 \cdot \cos \mathbf{q} - 1) \right] + \dots \quad (2.16)$$

Onde $\mathbf{s}_r$ é tensão radial, $\mathbf{s}_q$ é a tensão tangencial, $\mathbf{t}_{rq}$ é tensão cisalhante e, r e $\mathbf{q}$ são as coordenadas do ponto. A determinação de K_I e K_{II} normalmente é feita com simulação numérica (*apud* BORTOLUCCI, 1993).

Segundo ERDORGAN & SIH (*op cit.*) para acontecer o modo misto de propagação de fraturas em materiais frágeis submetido a aplicações lentas de carregamento, duas hipóteses devem ser satisfeitas:

- a) A propagação se dá a partir da extremidade da fratura.
- b) A direção da propagação coincide com a direção do plano de atuação da maior tensão principal de tração.

Estas hipóteses implicam que a fratura começará a crescer desde a ponta da junta ao longo da direção onde a tensão tangencial (σ_θ), é máxima e a tensão de cisalhamento ($\tau_{r\theta}$) é zero.

Figura 2.11 – Componentes da tensão próximos à ponta da junta. ERDOGAN & SIH (1963)

Na de propagação de juntas não-persistentes, POLLARD, *et al.* (1982) observaram que os mecanismos envolvidos são a tração e o cisalhamento (K_I e K_{II}). Qualitativamente, a forma de propagação pode ser deduzida a partir do sinal e magnitude da relação K_{II}/K_I combinado com a relação entre o comprimento da junta (L_j) e o espaçamento entre os centros das juntas (L_c). Esta relação é representada na Figura 2.12. onde pode-se observar que para baixos valores de L_j/L_c a interação entre as juntas é quase desprezível, sendo próxima para todos os valores de θ representados (θ é o ângulo de inclinação das juntas com respeito ao plano de tensão maior).

Figura 2.12 – Possíveis caminhos de propagação de fraturas em juntas não-persistentes.
POLLARD *et al.* (1982)

HORII & NEMAT-NASSER (1986) estudaram os micro-mecanismos envolvidos na transição entre a ruptura frágil a uma ruptura dúctil, quando é aumentado o confinamento do corpo de prova. Neste estudo os autores apresentam uma forma analítica de calcular o fator de intensidade de tensão K_I para uma junta mediante as seguintes equações:

$$\mathbf{t}^* = -\frac{1}{2} \cdot (\mathbf{s}_1 - \mathbf{s}_2) \cdot \sin(2 \cdot \mathbf{g}) - c + \mathbf{m} \frac{1}{2} \cdot [\mathbf{s}_1 + \mathbf{s}_2 - (\mathbf{s}_1 - \mathbf{s}_2) \cdot \cos(2 \cdot \mathbf{g})] \quad (2.17)$$

$$K_I = \frac{3}{4} \sqrt{\mathbf{p} \cdot \frac{L_j}{2}} \cdot \mathbf{t}^* \left(\sin \frac{1}{2} \mathbf{h} + \sin \frac{3}{2} \mathbf{h} \right) \quad (2.18)$$

Onde K_I é o fator de intensidade de tensão no momento de iniciação da fratura, $\mathbf{s}_1$ e $\mathbf{s}_2$ são as tensões no infinito, $\mathbf{g}$ é a inclinação da junta ($90^\circ - \mathbf{b}$), L_j é o comprimento da junta, c é o valor da coesão, $\mathbf{h}$ é o ângulo de início da fratura e $\mathbf{m}$ é o coeficiente de atrito na junta. Todos estes coeficientes estão representados na Figura 2.13.

Figura 2.13 – representação geométrica da propagação de fraturas.

HORII & NEMAT-NASSER (1986)

KANEKO & SHIBA (1990), propuseram um Modelo de Defeito Volumétrico Equivalente (*Equivalent Volume Defect Model, EVDM*), para analisar a deformabilidade e o comportamento em deformação dos maciços rochosos. Assim, o *EVD* representa o efeito das juntas descontínuas dentro do maciço, e usando este conceito, a relação tensão/deformação pode ser simplesmente formulada e tratada dentro do marco da mecânica do contínuo. Para a determinação do *EVD*, assumiram primeiro que o EVD_j de cada junta é determinado de maneira independente e a sua forma corresponde a um prato elíptico. Segundo, o EVD_i de todas as juntas é expresso como a união de todos os EVD_j , isto significa que a interação mecânica deve ser tratada como a interação geométrica entre as juntas (Figura 2.14). De esta maneira, obteriam a seguinte expressão:

$$\mathbf{e} = \frac{V}{V - V_d} \cdot r_2 \cdot s_2 \quad (2.19)$$

Onde $\mathbf{e}$ é a deformação média do corpo, V é o volume total do corpo, V_d é o volume de defeitos produzido pelas juntas, r_2 representa uma constante elástica intrínseca do corpo intacto e s_2 é o tensor médio de tensões.

Figura 2.14 –Explicação gráfica do conceito do EVD. KANEKO & SHIBA (1990)

KULATILAKE *et al.* (1992), compararam o comportamento de modelos físicos que apresentam juntas lisas não-persistentes, com os resultados obtidos de simulações numéricas. Os corpos de prova foram modelados em placas delgadas de gnaisses de 1 m², não apresentando informações sobre a quantidade de juntas ou a forma de criação das mesmas. A simulação numérica foi realizada mediante o uso do método dos elementos distintos. Devido ao fato que este método não permite o estudo de juntas não-persistentes foi necessário a criação de juntas fictícias com as quais simularam o comportamento mecânico das pontes de rocha. Para simular este comportamento as juntas fictícias devem estar dentro dos seguintes parâmetros:

- a) Para ambas, rocha sã e junta fictícia, deve-se usar o mesmo valor paramétrico de tensão

b) O valor de “ G/JK_s ”, deve ser entre 0,008 e 0,012 m, onde G é o módulo de cisalhamento e JK_s é o valor da rigidez cisalhante da junta fictícia.

c) O valor de “ JK_n/JK_s ”, deve ser entre 2 e 3, onde JK_n é o valor da rigidez normal da junta. O valor mais apropriado a ser escolhido seria E/G , onde E é o módulo de Young. Os autores justificam isto, sobre o fato que existe pouco conhecimento sobre a relação JK_n/JK_s antes de entrar os dados no computador e, como de certa forma esta relação está vinculada com E/G , pode-se adotar este valor como inicial, lembrando que trata-se da junta fictícia.

Após comparar os resultados do método numérico com os obtidos a partir dos ensaios, os autores concluíram que as análises por meio de elementos distintos poderiam servir para representar o comportamento de maciços rochosos com juntas não-persistentes, sempre que as pontes de rocha forem tratadas como juntas fictícias e respeitando-se os parâmetros antes mencionados.

HAN (1992) analisou o efeito mecânico das juntas lisas não-persistentes em corpos submetidos a cargas cíclicas, mediante o método dos elementos finitos usando o artifício chamado Força Nodal Equivalente (*ENF*). Este artifício não modela diretamente as juntas, mas sim, o efeito mecânico das descontinuidades equilibrando as forças que atuam nas suas posições geométricas. Desta maneira, muda-se fisicamente o material descontínuo para um material contínuo. Os corpos de prova foram retangulares com dimensões 3,0x1,4m contendo duas juntas não-persistentes. A inclinação das juntas (**b**) com relação ao plano de tensão maior foi utilizada com dois valores, 0° e 45°. No trabalho não se indicam outras variáveis geométricas das juntas. A malha utilizada foi de 0,05x0,05m. Concluiu que, pelo fato dos maciços rochosos terem muitas famílias de descontinuidades, e conjuntamente, uma complexa variedade de propriedades mecânicas, a análise matemática e física deles é quase impossível de ser realizada.

SCAVIA & CASTELLI (1996) estudaram o comportamento das pontes de rocha em juntas lisas descontínuas mediante o método de deslocamentos descontínuos (DDM) baseados na suposição que a rocha é um material elástico linear e que as juntas são não elásticas. Fazendo uso de um programa chamado BEMCON e do método DDM, idealizaram um corpo de prova como o representado na Figura 2.15. Assim, compararam o valor de s_0 (tensão iniciadora da tração produzida por uma junta dentro de um corpo) com o valor de s_c , que representa a tensão na qual duas fraturas

propagam-se até finalmente coalescer. Concluíram que para baixos valores de “ δ ”, com pouco ou nada de sobreposição, a propagação da fratura aconteceu de forma instável, mas, com incrementos de “ δ ” torna-se estável. Por outro lado, quando se aumenta a relação “ d/L_j ” aumenta-se o valor de S_c e S_0 .

Figura 2.15 – Configuração dos corpos virtuais. SCAVIA & CASTELLI (1996)

TANG & KOU (1998) estudaram o comportamento de matérias rochosos, contendo juntas lisas não-persistentes, usando o método numérico – computacional “Rock Failure Process analysis code, RFPA^{2D}” (TANG, 1997). Com este método analisaram corpos de prova virtuais de 200mm x 100mm, que apresentavam onze juntas pequenas (8,6mm cada uma) e oito grandes (28,8 mm). Como é sabido, os maciços rochosos por ser materiais compostos apresentam uma grande heterogeneidade, mas, o programa pode simular esta realidade. Colocaram no corpo de prova 9800 elementos com distintos valores de elasticidade ou módulos de Young. Ao finalizar os ensaios, concluíram que o método podia representar de maneira aproximada o comportamento dos maciços rochosos. Além disso, observaram que quando o corpo de prova é carregado axialmente, as micro fraturas propagavam-se a partir das pontas das juntas na direção do carregamento, mesmo assim, a presença de um pequeno esforço lateral, não confinante senão de empuxo, resultava num crescimento instável da fratura, fazendo que a amostra colapse sem aumento de tensão axial. Por outro lado, verificaram que o

crescimento instável das fraturas não acontecia quando o corpo era submetido ao confinamento.

WU & WANG (2001), analisando a energia de deformação atuante no corpo (U), determinaram que esta podia-se dividir em duas partes (Fig. 2.16): energia de deformação da rocha sã (U_o) e energia de deformação das juntas (U_c). Conseqüentemente, baseado neste princípio obtiveram um módulo elástico equivalente, definido na seguinte equação:

$$E_m = \frac{E}{1 + \frac{32(1-u^2)}{p(2-u)} \sum_{i=1}^m I \bar{a} h^2 (1-n^2) n^2} \quad (2.20)$$

Onde E é o módulo de elasticidade da rocha sã, n é o Coeficiente de Poisson, I é a norma estatística de densidade volumétrica das discontinuidades, $\bar{a}$ é a média estatística do raio das discontinuidades, $h = t$ da rocha sã / t da junta (t_r/t_j), m é o número de famílias de juntas e n é a variável de anisotropia que depende da orientação das juntas.

Figura 2.16 – Idéia básica para derivação do módulo de Young equivalente.

WU & WANG (2001)

SUNG-OONG (2000) estudou o comportamento das juntas lisas descontínuas ou não-persistentes, por meio do método de elementos finitos e o programa de computador FRANC2DL (Fracture Analysis Code for 2D Layered Structures). O corpo de prova foi modelado matematicamente tendo o módulo de Young de 10.000 MPa, o coeficiente de Poisson (ν) de 0,2 admitindo-se o material homogêneo, submetido a um carregamento no infinito de 10MPa e confinado. Para as juntas o comprimento foi de $L_j = 8\text{m}$, e a inclinação de $\beta = 45^\circ$ (Fig. 2.18). Com tudo isto, testou-se os modelos com $d/L_j = 1/4, 1/2, 3/4$ e $s/L_j = 0, 1/4, 1/2$ e $3/4$, para avaliar a influência do espaçamento e da sobreposição das juntas. Concluiu-se que o valor das tensões que produzem a propagação da fratura aumentam quando existe um decréscimo na relação d/L_j ou quando existe um acréscimo na relação s/L_j . Um fato importante é que o modelo do trabalho pressupõe um material homogêneo, o que gera certas diferenças com os resultados nos ensaios reais.

Figura 2.17 – Modelo matemático apresentando a configuração geométrica das juntas.
 SUNG-OONG (2000)

WONG *et al.* (2002,b) investigaram numericamente a propagação de fraturas em corpos de prova carregados uniaxialmente usando o programa computacional Rock Failure Process Analysis (RFPA^{2D}). A análise foi feita em modelos matemáticos de corpos de prova com uma, três ou múltiplas juntas, estas últimas localizadas aleatoriamente no corpo. No caso dos corpos de prova com três juntas o tamanho destes foi de 170x100mm e das juntas $L_j = 20\text{mm}$, com $\beta = 45^\circ$ e três tipos de configuração, D,

V e H, sendo estas diagonal, vertical e horizontal respectivamente. Infelizmente os autores não apresentam mais informações geométricas das juntas.

A representação gráfica das formas de ruptura dos modelos, tanto de três juntas como os de múltiplas juntas, são mostradas na Figura 2.19. Observa-se que, com três juntas na configuração D, o corpo de prova quase é partido pela metade. Também, no caso de múltiplas juntas, a ruptura acontece pelas juntas que estão mais próximas às bordas do corpo de prova.

Concluíram que: o comprimento e localização da junta são fatores importantes, assim, quanto maior o comprimento da junta e maior a proximidade com a fronteira livre, maior será a facilidade para que a fratura se propague. Além disto, a interação das tensões é o fator mais importante na iniciação e propagação de fraturas em modelos com múltiplas juntas e não a proximidade de uma com a outra. Na Figura 2.18 mostra-se o gráfico tensão-deformação do corpo de prova com múltiplas juntas, na qual as letras a,b,...,j estão em congruência com as letras da Figura 2.19.

Figura 2.18 – Curva de tensão vs deformação para os corpos de prova com múltiplas juntas. Os pontos a,...,j correspondem aos indicados na Figura 2.18. WONG *et al.* (2002,b)

Figura 2.19 – Formas de ruptura dos diferentes tipos de configuração das juntas.

WONG *et al.* (2002,b)

2.2.2 Ensaios de modelos reais (método direto)

SAVILAHTI *et al.* (1990) estudaram o efeito das pontes de rocha (espaçamento entre juntas) nos ensaios de cisalhamento direto em modelos com juntas lisas não-persistentes. Consideraram nove diferentes configurações de juntas, três das quais foram estudadas com o código matemático de elementos distintos (UDEC). Para o material dos corpos de prova utilizou-se uma mistura de 67% de gesso com 33% de água obtendo uma resistência a compressão simples (s_{cs}) de 21 MPa. Para gerar as juntas foram inseridas lâminas delgadas de plástico e deixadas dentro do corpo de prova. O tamanho dos corpos de prova foi de 280 x 280 x 280 mm e a configuração geométrica das juntas esta mostrada na Figura 2. 20. Para a aplicação do carregamento, começou-se com uma pré-carga da amostra por 100seg, sendo a tensão de confinamento mantida em 0,5MPa e ao mesmo tempo, era aplicada a tensão cisalhante até atingir a ruptura, tudo isto realizado por meio de macacos hidráulicos servo-controlados. O esquema do carregamento é mostrado na Figura 2.21. Concluíram, que quando os corpos de prova são submetido ao cisalhamento, tendo essas configurações de juntas descontínuas, o mecanismo de coalescência entre as juntas é produzido por tração.

Figura 2.20 – Geometria dos corpos de prova e juntas. SAVILAHTI *et al.* (1990)

Figura 2.21 – Sistema de carregamento dos ensaios de cisalhamento. SAVILAHTI *et al.* (1990)

KESHAN *et al.* (1990) analisaram a influência da direção das juntas lisas não-persistentes e a pressão confinante sobre o mecanismo de ruptura dos maciços rochosos. O estudo foi feito como modelos de gesso de 40x40x15cm, os quais representavam as propriedades mecânicas do maciço. Infelizmente os autores não fizeram referência sobre a resistência ou outro parâmetro mecânico dos corpos de prova, nem sobre o porquê da escolha do ângulo formado entre as linhas da cruz (Figura 2.22). Realizaram a modelagem das juntas com lâminas de policarbonato, sendo que estas se apresentavam em forma de cruz, uma com comprimento de 96mm e a outra com 48mm, cruzando-se ambas linhas no centro num ângulo de 80°. A variação do ângulo θ com relação ao plano de tensão maior variou de 0° a 90° com aumento de 15° em cada teste. Concluíram que quanto maior é a pressão de confinamento, maior será a resistência do corpo, mesmo apresentando as juntas não-persistentes. Também, a variação do ângulo θ tem grande influência sobre a resistência, da seguinte maneira, quando θ está entre 90° – 60° com cada incremento de θ ocorrerá uma diminuição da resistência; com θ entre 60° – 45°, obtiveram os menores valores de resistência; depois com θ entre 45° e 15° a resistência aumenta com cada acréscimo de θ ; e finalmente quando θ está entre 15° e 0° com cada aumento de θ a resistência decresce novamente (Fig. 2.23).

Figura 2.22 – Geometria das juntas não-persistentes em forma de cruz. KESHAN *et al.* (1990)

Figura 2.23 – Variação da resistência com o ângulo β . KESHAN *et al.* (1990)

TSIDZI (1990) investigou a influência dos planos de foliação de xistos nos ensaios triaxiais e uniaxiais. As medidas do corpos de prova foram $L=72\text{mm}$ e $D=36\text{mm}$, com foliações em diferentes graus de orientação e distintas persistências. Observou-se que quando os corpos de prova apresentavam juntas não-persistentes, o modo de ruptura se deu por cisalhamento, sem praticamente ter relevância o ângulo de inclinação das juntas. Contudo, os menores valores de resistência foram encontrados nas amostras com juntas orientadas a $\theta=45^\circ$.

JAMIL (1992) realizou ensaios biaxiais em modelos de concreto (Figura 2.23) onde estudou a anisotropia das tensões e os modos de ruptura para juntas lisas fechadas persistentes e não-persistentes. Neste trabalho conseguiu-se analisar o movimento de marcas colocadas na face exposta do corpo de prova, mediante um mecanismo de vídeo e processamento digital de imagens (Applied Intelligent System). Desta forma, registrou-se os padrões de movimento antes e até atingir a ruptura. As juntas persistentes e não-persistentes foram modeladas tendo uma inclinação θ com relação à tensão maior (S_1), variando nos seguintes ângulos: $67,5^\circ$, 45° , $22,5^\circ$ e 10° . Os outros parâmetros geométricos das juntas foram: $101,6$ e $203,2$ mm para o comprimento de junta (L_j); comprimento da ponte de rocha, L_b , de $25,4$ e $50,8$ mm; espaçamento entre as filas de juntas, d , foi mantida entre $50,8$ e $101,6$ mm e o grau de persistência (K , Eq. 2.21) foi de $0,8$ e $0,667$. Para saber a influência do confinamento sobre a resistência à compressão deste tipo de modelos, testou-se três tensões de confinamento, 0 ; $0,69$ e $1,39$ MPa.

$$K = \frac{L_j}{L_j + L_b} \quad (2.21)$$

Foram verificados quatro modos de ruptura nos corpos de prova com juntas não-persistentes lisas: 1) Deslizamento ao longo da junta, cisalhando através do material intacto de rocha. 2) Modo escalonado, deslizamento ao longo da junta e ruptura de tração na ponte da rocha. 3) Modo multi-escalonado, ruptura por tração no ponte da rocha, escalonamento entre as juntas sem deslizamento da junta, ruptura desenvolvida numa zona. 4) Cisalhamento através do material intacto de rocha, cruzando as juntas.

Em relação à inclinação **b** concluiu que:

- Para as juntas com **b**=67,5°
 - O tipo de ruptura dominante foi o modo 1.
 - A persistência (*K*) e a pressão confinante, não têm influência significativa sobre o modo de ruptura para esta inclinação.
- Juntas com **b**=45°
 - Nesta inclinação, o grau de persistência (*K*) tem um alto grau de influência, tanto no modo de ruptura como na resistência.
 - Com *K*=0,667 e sem confinamento, a ruptura ocorre no modo 2, e com confinamento a ruptura é de modo 1.
 - Com *K*=0,8 a ruptura ocorre no modo 1, tanto confinada como sem confinamento.
- Juntas com **b**=22,5°
 - A ruptura ocorre no modo 2, sem depender de *K* e do estado de confinamento.
 - A resistência do modelo pode ser descrito pela equação:

$$s_{1f} = \frac{q_t + c_j \frac{L_j}{d} + s_3 \cot b (\tan f_j + \tan b) \left[\left(\frac{L_j}{d} \tan b - 1 \right) \cos^2 b + 1 \right]}{\cos^2 b (1 - \tan b \tan f_j) \left(\frac{L_j}{d} \tan b - 1 \right)} \quad (2.22)$$

Onde s_{1f} é a tensão de ruptura, q_t é a resistência à tração, c_j é uma fração da resistência à tração ($0,08 q_t$) e $f_j=17,5^\circ$.

- Juntas com **b**=10°
 - Com $d = 50,8\text{mm}$ o modo 3 de ruptura é o dominante, também com pequenos aumentos no confinamento provocaram significantes aumentos na resistência.

- Com $d = 101,6\text{mm}$ as juntas não controlam o modo de ruptura, modo 4, já que este é comparável com os resultados obtidos em amostras intactas.

Figura 2.24 – Geometria dos corpos de prova multi-fraturados utilizados por JAMIL (1992)

CHEN *et al.* (1992) realizaram experimentos de laboratório em amostras de mármore contendo juntas lisas não-persistentes e submetidas a carregamentos uniaxiais. As medidas do bloco foram 110mm x 80mm x 10mm. A modelagem das juntas foi realizada mediante uma serra circular com espessura de 1mm. Uma vez obtido o corpo de prova, fizeram 10 tipos de ensaios nos quais variou-se o ângulo das juntas em relação ao carregamento e o sobreposição das juntas. Os dados do comprimento das juntas e a sobreposição foram excluídos do artigo. Concluíram que a propagação da junta sempre iniciou-se na ponta e de forma perpendicular a esta, logo continuava-se propagando até

atingir a fratura da junta mas próxima. Este tipo de coalescência é chamada de escalonamento.

SHEN (1995) estudou o mecanismo de coalescência de fraturas, comparando os dados obtidos de ensaios uniaxiais com os obtidos mediante análises numérica (critério G modificado, e o DDM). Nos ensaios de laboratório usaram-se corpos de prova de 152mm x 76mm x 30 mm, modelados em gesso e apresentando duas juntas de comprimento limitado (Fig 2.23), as quais foram criadas durante a cura do corpo, tendo um comprimento de 12,7mm e separadas de 12,7 mm. Foram usadas dois tipos de junta, *as abertas*, que foram geradas colocando as folhas de aço de 0,04mm e retiradas depois da cura do molde e, *as fechadas* elaboradas com lâminas de polietileno de 10 μ m retiradas durante a cura do gesso. Para compreender o efeito da distância entre as juntas ou da ponte de rocha entre elas e da inclinação das juntas, variou-se a inclinação do ângulo do ponte (α) desde 45° até 120° e do ângulo das juntas (β) desde 30° até 60°, ambos com aumentos de 15°. Concluiu que a coalescência das juntas ocorre em quase todas as configurações de inclinações dos pontes e das juntas, a exceção das juntas com $\beta=30^\circ$. Também que, a coalescência das fraturas pode ser causada por diferentes modos de ruptura, e que esta depende altamente da orientação da ponte de rocha (α). Além disso, foram identificados três tipos característicos de mecanismos de ruptura na coalescência e estão resumidos na Tabela 2.1.

Figura 2.25 – Configuração geométrica dos corpos de prova. SHEN (1995)

Tabela 2.1 – Modos de coalescência dependentes da inclinação α . SHEN (1995)

α	Modo de ruptura	Descrição
45° - 60°	cisalhamento	A superfície de ruptura encontrou-se rugosa e escalonada contendo material pulverizado. A coalescência começou desde as pontas das juntas.
75° - 90°	tração + cisalhamento	A superfície de ruptura no centro da ponte era suave, não entanto, próximo às pontas da junta a superfície encontrou-se rugosa e escalonada. A coalescência começou no centro da ponte rochosa.
105° - 120°	tração	A superfície de ruptura encontrou-se suave e limpa. A coalescência começou desde as pontas das juntas.

AGUIAR (1998) ensaiou modelos de juntas lisas não-persistentes em corpos de argamassa, modificando os modelos de JAMIL (1992), nos laboratórios de Geotécnica da EESC, em São Paulo e concluiu que:

- quando os planos de fraturamento são menores que 30°, medidos a partir do plano de tensão maior e com espaçamento entre as juntas de 5,0 cm, apresenta-se ruptura tipo “stepping” ou escalonada e a variação de persistência em nada influenciou na ocorrência deste tipo de ruptura.
- a ruptura ao longo da ponte entre as juntas ocorreu nas amostras com orientações entre os 30° e 60°.
- aos 60° de orientação, o cisalhamento que se iniciou nas discontinuidades seguiu pela ponte rochosa na direção do plano de fraturamento ocorrendo em vários planos indistintamente.
- quanto ao espaçamento, este parece influenciar tanto o modo de ruptura quanto a resistência, assim a persistência da discontinuidade é decisiva na resistência do maciço sob qualquer configuração
- a maior influência nos valores de resistência foi dada por as amostras com orientação de 30°.

WANG (1998) estudou a resistência em compressão biaxial de modelos com juntas não-persistentes, fazendo uso de modelos de laboratório e métodos de simulação numérica. Para a modelagem dos corpos de prova foi realizada uma mistura de cimento, areia e água (argamassa) com traço 1:5:0,9 em relação ao peso, e para as medidas geométricas adotou-se os seguintes valores (Figura 2.26):

- Medidas do corpo: 60cm x 30cm x 15 cm
- Espaçamento entre juntas adjacentes (d).
- Comprimento da junta (L_j). Igual ao valor de “ d ”, $L_j = d = 56,8$ mm.
- O valor da densidade ($w = \frac{l_j}{d}$). Devido a que o valor de $L_j = d$, conseqüentemente $w = 1$.
- Comprimento do ponte da rocha $L_b = \frac{d}{\frac{1}{K} - 1}$
- A persistência $K = \frac{L_j}{L_j + L_b}$. Os valores de K variaram de 0,3 , 0,5 e 0,7 o que representava uma persistência baixa, media e alta respectivamente.
- β representa o angulo da orientação das junta. Utilizou-se os seguintes ângulos: 30°, 45° e 60°.

Figura 2.26 - Configuração da matriz de juntas. CHONG (1998)

Utilizaram-se os seguintes valores para a tensão de confinamento (s_2) nos ensaios: 0,5 MPa; 1,0 MPa e 2,0 MPa. A maneira de realizar o carregamento foi aumentando s_1 e s_2 simultaneamente até atingir o valor da tensão confinante desejada, s_2 permanecia estável, e s_1 continuava aumentando até atingir a carga última. Como resultado observou-se que a ruptura podia dividir-se em cinco tipos de mecanismos, os quais são descritos da seguinte maneira:

I. Fraturas abertas por tração na junta e compressão com cisalhamento na ponte da rocha. Este tipo de ruptura apareceu principalmente nas amostras com $b = 30^\circ$ e com valores de $K = 0,7$.

II. Fraturas abertas por tração na junta e desenvolvimento no corpo da rocha, formando ruptura tipo escalonada. Este tipo de ruptura aconteceu nas amostras submetidas a s_2 de: 0,5 MPa e 1,0 MPa, com valores de $K=0,7$.

III. Um padrão de ruptura tipo “z”, que consiste em 4 passos (Fig. 2.27): 1) uma fratura aberta por tração vai desde a ponta da junta 1 até o meio da junta 2 (a-b). Ao mesmo tempo, outra fratura aberta por tração iniciava-se na ponta da junta 2 e desenvolvia-se até o meio da junta 3 (c-d). 2) a fratura a-b continuava avançando, cortava a junta 2 e atingia a junta 3 (b-e). 3) finalmente, a fratura aberta por tração c-e surge e a fratura “z” b-e-c-d é formada. Este tipo de ruptura foi verificada nas amostras com $s_1=0,5$ MPa; $K=0,5$ e $b=60^\circ$.

IV. Fraturas cisalhantes desenvolvem-se desde as pontas da junta para os vértices das juntas vizinhas, formando-se fraturas de grande comprimento paralelas ao eixo da tensão maior.

V. As juntas não se desenvolveram, isto aconteceu quando a tensão confinante foi considerada alta $s_2 = 2,0$ MPa.

O autor concluiu que, para valores pequenos de persistência ($K=0,3$), os resultados maiores de tensão última (s_{lf}) aparecem quanto menor for ângulo de inclinação das juntas ($b=30^\circ$). Quando $K=0,7$ os valores máximos de s_{lf} apareceram em amostras com $b=60^\circ$. Igualmente importante é o fato que quando a tensão de confinamento é grande ($s_2=2,0$ MPa) o efeito das juntas sobre a ruptura do modelo é mínima. Quando a tensão de confinamento é baixa esta não é afetada pela porosidade do

modelo. Isto prova que a ruptura em modelos submetidos a grandes tensões confinantes é devido aos micro-defeitos do material e não pelas juntas preexistentes.

Figura 2.27 – Configuração da fratura tipo “z”. CHONG (1998)

WONG & CHAU (1998) fizeram um estudo detalhado sobre a coalescência de fraturas em amostras simuladas de rocha apresentando duas juntas descontínuas. Os corpos de prova foram modelados com uma mistura de pó de barita, areia uniforme, gesso e água. Além disto, os corpos escalaram-se de acordo com o teorema π assegurando desta forma manter as propriedades de fragilidade e dilatância do material quando este fosse submetido a compressão uniaxial ($DS_1=0,002 \text{ kN/seg}$; *tempo normal do ensaio 20 - 25 min*). O tamanho dos corpos de prova, obedecendo com o teorema, tomou-se de 60mm x 120mm x 25mm e a geometria da juntas como está representada na Figura 2.28. Variou-se $\mathbf{b}$ desde 35° até 75° e $\mathbf{a}$ de 45° até 120°, ambos em acréscimos de 15°; as distâncias L_j e L_b foram de 12 mm e 20mm respectivamente para todos os ensaios. Para fazer as juntas, inseriram-se lâminas finas de aço com diferentes rugosidades logrando mudar assim o coeficiente de atrito ($\mathbf{m}$), resultando em 0,6; 0,7 e 0,9. Posteriormente aos ensaios, observaram que 60% das fraturas iniciaram-se nas pontas internas das juntas (Fig 2.28), 20% começaram nas pontas externas e os restantes 20% iniciaram-se nas duas pontas simultaneamente. Além disso, definiram que a coalescência da fratura ocorria em três tipos característicos (Fig. 2.29), designados como:

- 1) Modo S quando só ocorre cisalhamento, unindo as juntas preexistentes;
- 2) Modo M, chamado como modo misto, cisalhamento/tração, dividido em dois partes: a) modo M I onde as fraturas de tração aparecem nas pontas internas das juntas e posteriormente aparece a fratura por cisalhamento no meio do ponte, b) modo M II,

primeiramente nasce na junta inferior uma fratura de tração, seguido por uma abrupta propagação de uma fratura de cisalhamento proveniente da ponta interior da junta superior;

3) Modo W, chama-se quando só existe a fratura por tração, basicamente é dividido em três grupos, W I, W II, W III, e as combinações W I/II, WI/III, W II/III. Assim, W I é aquela coalescência de dois fraturas de tração; W II, a coalescência resulta quando uma fratura de tensão propaga-se desde a ponta da junta inferior até atingir a ponta da outra junta; e, W III resulta quando a fratura por tensão começa na ponta interior da junta inferior e atinge a ponta interior da outra junta.

Depois de estudar o comportamento das fraturas nos corpos ensaiados, os autores concluíram que as resistências mínimas encontravam-se nos modelos com $b=65^\circ$. Por outro lado, quando $b > 45^\circ$ resistência pico é influenciada pelo ângulo a , e contrariamente, quando $b < 45^\circ$, a não mostrou ter quase nenhuma relevância.

Figura 2.28 – Geometria dos corpos de prova. WONG & CHAU (1998)

Figura 2.29 – Nove diferentes tipos de propagação de fraturas. As letras S, M e W identificam os mecanismos de ruptura, cisalhamento, cisalhamento/tração e tração. WONG & CHAU (1998)

WONG *et al.* (2002) investigaram experimentalmente o rastejo e o mecanismo de ruptura no contorno de uma abertura circular, simulando um túnel, num maciço rochoso que apresenta juntas não-persistentes lisas. O modelo empregado foi modelado usando uma mistura de barita, areia, gesso e água, com dosagem de 2:4:1:1,5 respectivamente. Os corpos de prova tinham as seguintes dimensões: comprimento: 100 mm, largura: 100 mm e espessura : 25 mm. A geometria das juntas era: comprimento da junta $L_j = 10$ mm, distância entre juntas (B1, B2...): 10 mm, $b = 45^\circ$, $a = 60^\circ$ e o diâmetro do furo: 20 mm (Figura 2.30). O procedimento para o ensaio realizou-se por etapas, na primeira, fixa-se a relação de tensões na qual estará submetido o corpo de prova ($I = s_2/s_1$), isto realizou-

se carregando biaxialmente o corpo de prova a uma taxa (0,002 kN/s) para ambas as tensões, até atingir o valor desejado de σ_2 e continuava-se aumentando σ_1 até obter o valor de I desejado. A segunda etapa começava após dois minutos de ter finalizado o carregamento, e consistia em construir o furo. nesta etapa, foram mantidas as cargas biaxiais, o furo era realizado a uma taxa de 2,5mm/min, este processo em media durava 10 min. A última etapa consistiu em observar a coalescência das fraturas e as deformações do túnel.

Figura 2.30 – Geometria do corpo de prova. WONG *et al.* (2002)

Os autores observaram que, quando $I = 1/3$ após escavação do furo ou túnel, as micro fraturas se propagam de forma estável entre as juntas finalizando com o colapso do túnel, sendo a tração o modo de ruptura. Para $I > 1/2$ imediatamente após abertura do túnel acontece uma pequena deformação, gerada pela coalescência das juntas mais próximas as bordas do túnel, logo, não existindo acréscimo no carregamento externo o furo colapsa bruscamente. Neste caso, o cisalhamento e, em algumas juntas, tração com cisalhamento é o modo de ruptura dominante. Quando $I = 2/3$, posteriormente à escavação do túnel não existe deformação, mas, passado alguns minutos sem acréscimo do carregamento externo o túnel colapsa bruscamente.

2.3 Critérios de Resistência

Dentro dos critérios que usam envoltórias retas de resistência encontra-se o critério de ruptura por cisalhamento de Mohr-Coulomb. Segundo SHEOREY (1997) o critério de ruptura Mohr-Coulomb é linear e de maneira geral representa vagamente o comportamento triaxial das rochas. Este critério basicamente mostra que a ruptura acontece quando a tensão cisalhante no plano de ruptura é maior que a tensão cisalhante descrita pela Equação 2.23.

$$t_r = c + s_r \tan f \quad (2.23)$$

Onde s_r e t_r representam a tensão normal e cisalhante na ruptura, c é o intercepto da envoltória no eixo t e f representa o ângulo de atrito do material

Figura 2.31 – Esquema da envoltória de resistência Mohr-Coulomb.

Segundo HOEK & BROWN (1980) a envoltória de resistência de uma rocha raramente pode ser descrita por uma reta. Assim, o critério de resistência do comportamento mecânico das rochas deve ser tal que, leve em conta os estados de tensões em que aquela rocha tem sido submetida e as propriedades intrínsecas da matriz rochosa. Baseados nestes princípios os autores propuseram um critério de ruptura que descreve uma envoltória curva de resistência e que depende dos parâmetros empíricos m , s_1 e estados de tensões atuais na rocha. Este critério desde seu aparecimento tem sido modificado até a última versão que apareceu no 2002, HOEK *et al.* (2002). Assim, o critério na última versão indica as seguintes relações para determinar a envoltória de resistência:

$$s_1 = s_3 + s_{cs} \cdot \left(m_b \cdot \frac{s_3}{s_{cs}} + s \right)^a \quad (2.24)$$

Onde s_1 e s_3 representam a tensão principal maior e menor na ruptura respectivamente, s_{cs} é o valor de resistência à compressão simples do material intacto e, m_b , s_1 e a são constantes que dependem das características do maciço.

Os critérios antes expostos são usados para descrever o comportamento mecânico de corpos de prova intactos ou fraturados. Para descrever o comportamento mecânico das juntas propriamente, na mecânica das rochas utiliza-se o critério de BARTON & CHOUBEY (1977), já citado e descrito anteriormente neste capítulo.

CAPÍTULO 3

SIMULAÇÃO FÍSICA – ENSAIOS DE LABORATÓRIO

“Por mais que o homem tente ser como seu criador, este nunca o conseguirá, pois em Deus não existe imperfeição. Toda existência celestial, terrestre ou entre elas, existe desde a verdadeira existência de Deus”

Tratado sobre a unidade de Deus, Maimonides.

3.1 Introdução

Na natureza não há um maciço rochoso semelhante a outro, não existe uma junta igual a outra. Sabendo isto, a engenharia não tenta dar soluções deterministas, mas sim soluções aproximadas do comportamento real. Uma das formas de aproximação desta realidade é a simulação física, a qual tenta reproduzir de forma isolada cada uma das variáveis que formam um conjunto. No caso de maciços rochosos com juntas não-persistentes a simulação física apresenta-se como uma excelente ferramenta, pois os fatores envolvidos na formação deste tipo de maciços são relativamente bem reproduzidos. Por exemplo, a matriz rochosa é fabricada com cimento artificial que pode reproduzir a resposta mecânica ao carregamento ou ao alívio de tensões; adicionalmente, controlam-se as características e a distribuição granulométrica dos grãos minerais, criando-se assim heterogeneidade. Além disto, geram-se as características desejadas para as juntas. Contudo, por mais controle que se tenha sobre as propriedades do maciço, jamais estaríamos habilitados para reproduzir um verdadeiro maciço rochoso.

Mesmo com todas as limitantes, nesta pesquisa optou-se pela simulação física de juntas não-persistentes rugosas. Assim, este capítulo é dedicado à explicação dos procedimentos utilizados para esta finalidade.

Na primeira parte, descreve-se o procedimento utilizado para poder copiar em lâminas de poliéster a rugosidade de juntas rochosas geradas em peças de granito. Além disso, inclui-se a descrição do material utilizado para modelar o maciço rochoso e o método empregado para preparação dos corpos de prova. Na segunda parte, descreve-se o sistema adotado para realizar os ensaios biaxiais. E a terceira, relata o sistema usado tanto nos ensaios uniaxiais e triaxiais dos corpos intactos, quanto nos ensaios de cisalhamento direto realizado nas juntas.

3.2 Modelagem do maciço rochoso

3.2.1 Modelagem das juntas lisas e rugosas.

Um dos passos fundamentais nesta pesquisa foi a simulação da rugosidade dentro das juntas não-persistentes no maciço rochoso. Vários estudos descrevem a criação das juntas lisas não-persistentes dentro de blocos de argamassa (JAMIL, 1992; MUGHIEDA, 1997; CHONG, 1998 e AGUIAR, 1998). Os materiais frequentemente utilizados para criar este tipo de juntas são lâminas de aço ou de polímeros. Nesta pesquisa, para gerar as juntas lisas e rugosas utilizaram-se lâminas de filme de poliéster transparente com 0,05mm de espessura.

A criação das juntas lisas ($JRC=0$) consistiu basicamente no corte de lâminas de Poliéster em fatias de 50mm de largura por 210 mm de comprimento. Para as juntas de $JRC=6,7$ cortaram-se as lâminas de poliéster em fatias com larguras de 53mm e com 210 mm de comprimento, levando-se em conta o fato da rugosidade encurtar as lâminas quando pressionadas na rocha, obtendo-se ao final uma medida de 50.2mm x 206mm. Para copiar a rugosidade nas lâminas de poliéster de uma rocha natural, utilizou-se uma peça retangular de granito fanerítica equigranular (Figura 3.1). Ela foi rompida pela metade para obter uma fratura similar a uma natural. Após este procedimento, foi obtido molde e contramolde da peça de rocha e na sequência aquecidas em estufas a 89°C. Fora da estufa as lâminas de poliéster são colocadas no meio da rocha quente e aplica-se pressão por 2 minutos, retira-se o poliéster e logo após deixa-se em repouso. Para determinar se o processo de criação das juntas de poliéster era repetitivo, as juntas foram comparadas sobrepondo uma acima da outra e medindo-se a diferença no

comprimento e na largura de uma com relação à outra. O erro encontrado após comparar todas as juntas, foi de apenas 1.2% no comprimento e 1.13% na largura, assegurando a repetibilidade do processo de criação das juntas nas lâminas de poliéster.

Para as juntas de $JRC=12,3$ utilizou-se o mesmo tipo de lâminas de poliéster, cortadas em fatias de 55,6mm de largura por 210 mm de comprimento, obtendo-se ao final fatias de 49,8mm x 206mm, respectivamente. Para copiar a rugosidade da rocha natural utilizou-se o mesmo procedimento para as juntas de $JRC=6,7$, com a diferença de que a rocha selecionada foi um granito fanerítico inequigranular (Figura 3.2). O erro obtido nestas juntas foi similar ao anterior.

Figura 3.1 – Granito fanerítico equigranular

Figura 3.2 – Granito fanerítico inequigranular

3.2.2 Caracterização da rugosidade

A caracterização da rugosidade das juntas foi realizada mediante o perfilômetro do departamento de Metrologia da Escola de Engenharia de São Carlos. Este perfilômetro é de contato e pode ser usado tanto com pontas arredondadas como com pontas afiadas. No caso desta pesquisa utilizou-se o perfilômetro com pontas arredondada para a superfície menos rugosa e com ponta afiada para a outra superfície. Desta forma, obteve-se os dados x, y, z das superfícies para depois serem caracterizadas mediante interpolação pelo método de mínima curvatura. A Figura 3.3 mostra as juntas no perfilômetro e na Figura 3.4 se apresentam as superfícies digitalizadas.

Figura 3.3 – Amostras das juntas no perfilômetro da EESC. Na esquerda com ponta arredonda e na direita com ponta afiada.

Figura 3.4 – Superfícies das juntas digitalizadas depois de medidas com o perfilômetro. As unidades dos eixos estão representadas em micrometros (μm).

3.2.3 Distribuição espacial das juntas

As juntas foram distribuídas dentro do corpo de prova de modo a assegurar a coalescência entre juntas não coplanares. Este tipo de coalescência é chamado de escalonamento (JAMIL, 1992; MUGHIEDA, 1997; AGUIAR, 1998 e CHONG, 1998). Para atingir este tipo de coalescência testaram-se três tipos de distribuição geométrica das juntas. Estes testes foram divididos em três grupos: ANL, BNL e CNX, onde A, B ou C designa a distribuição geométrica das juntas; N denota o número do ensaio, 1,2,..., etc e a letra X identifica o tipo de junta utilizada, podendo ser lisa (L), com rugosidade média (R, $JRC=6,7$) ou com a maior rugosidade (RR, $JRC=12,3$).

Para o grupo ANL utilizaram-se 17 juntas em cada corpo de prova, no grupo BNL colocaram-se 14 juntas e para o grupo CNX utilizaram-se 15 juntas. A Figura 3.5 apresenta as variáveis geométricas utilizadas para distribuir as juntas dentro dos corpos de prova nos diferentes grupos.

Figura 3.5 – Configuração geométrica das juntas não-persistentes. Onde: β é a inclinação da junta com relação ao plano de tensão maior; α é o ângulo gerado entre o plano de uma junta e o plano formado entre as pontas de juntas não-coplanares; Lb denota a distância entre juntas paralelas coplanares; Lj é o comprimento da junta e d é a distância entre juntas paralelas não coplanares

3.2.4 Fixação das juntas no corpo de prova

O método para fixação das juntas no corpo de prova foi proposto por JAMIL (1992), depois usado por MUGHIEDA (1997) e modificado por AGUIAR (1998). Este método consiste basicamente em fixar as fitas de poliéster entre duas tampas que estão colocadas na fôrma de aço, onde então o será moldado o corpo de prova. Uma das tampas é colocada na parte superior e outra na parte inferior da fôrma (Figura 3.6). As tampas foram marcadas para obter sempre as mesmas posições espaciais das juntas. Adicionalmente, a fixação das faixas de poliéster foi realizada por meio de fita adesiva (Figura 3.7).

Figura 3.6 – Esquema das tampas usadas para fixar as juntas

Figura 3.7 – Fixação das fitas de poliéster na fôrma de aço

3.2.5 Molde para os corpos de prova com juntas não-persistentes

Os corpos de prova foram moldados numa caixa desmontável de aço com paredes de 1/8" de espessura (Figura 3.7). As medidas internas da caixa utilizada foram de 600mm de comprimento por 300mm de largura com uma profundidade máxima de 150mm, sendo que as tampas superior e inferior eram idênticas. Estas tampas contêm cortes inclinados em θ graus e espessura de 5mm para fixar as juntas. Um esquema da geometria destas fôrmas é apresentado na Figura 3.8.

Figura 3.8 – Desenho esquemático da fôrma de aço

3.2.6 Modelagem da matriz rochosa

As características mais importantes a serem modeladas quando se tenta representar maciços rochosos são a resistência e a deformação. Segundo JAMIL (1992), um material que tenha as mesmas características de uma rocha provavelmente nunca será encontrado. Assim, a alternativa é obter um material que seja suficientemente próximo a determinadas rochas. No caso desta pesquisa, optou-se por um material previamente utilizado por outros pesquisadores (JAMIL, 1992; MUGHIEDA, 1997; CHONG, 1998 e AGUIAR, 1998), e que pode ser representativo desde rochas sedimentares até certos tipos de rochas ígneas. Este material consiste em uma mistura de cimento *Portland*, areia fina e água, comumente chamado de argamassa.

A argamassa foi preparada com uma relação em peso de 10kg de cimento *Portland*, 25kg de areia e 5,3kg de água no caso dos modelos ANL, obtendo-se com esta mistura uma resistência média à compressão simples (S_{cs}) de 35,94 MPa. Para os modelos BNL e CNX utilizou-se 10kg de cimento portland, 50kg de areia e 9kg de água, obtendo-se com esta mistura uma resistência media à compressão simples de 14,61 MPa.

Para preparar a argamassa os materiais foram pesados e logo misturados na betoneira durante 6 minutos. Posteriormente, a argamassa foi colocada nas fôrmas de aço que estavam sobre a mesa vibratória. A colocação da argamassa foi realizada em três camadas para assegurar a homogeneidade dentro do corpo de prova. Em cada uma das camadas a fôrma foi vibrada por 30 segundos evitando-se assim a segregação. A Figura 3.9 apresenta o corpo de prova depois deste processo.

Figura 3.9 – Corpo de prova depois da concretagem

Ao mesmo tempo que se produziam os corpos de prova prismáticos, foram preparados em média, 4 corpos de prova cilíndricos de 50mm de diâmetro por 100mm de altura. Eles foram utilizados para determinar as características mecânicas da argamassa. Transcorridos dois dias após a concretagem, os corpos de prova foram desmoldados e submergidos em água por 28 dias. Após esse período, os corpos de prova prismáticos foram removidos da água e suas faces retificadas como ilustra a Figura 3.10. Desta forma, foi garantida a uniformidade da espessura em todos os corpos de prova e ao mesmo tempo, adquiriu-se uma melhor superfície para observar a

propagação das fraturas. As dimensões finais dos corpos de prova prismáticos foram de 600mmx300mmx132mm.

Figura 3.10 – Retificação das faces do corpo de prova

3.3 Ensaios biaxiais

3.3.1 Sistema de carregamento biaxial.

Nesta pesquisa adotou-se o mesmo sistema de carregamento usado por CHONG (1998), mostrado na Figura 3.11. Este sistema consiste num pórtico de grande tamanho onde estão instalados dois transferidores hidráulicos servo-controlados e dirigidos pelo painel de controle MTS. A capacidade de carga dos transferidores hidráulicos é de 50t e 100t, no sentido vertical e horizontal, respectivamente. O confinamento dos corpos de prova (s_2) foi produzido pelo transferidor hidráulico de 50t no sentido vertical, sendo este mantido constante ao longo de todo o ensaio. O carregamento para produzir a ruptura (s_1) aplicou-se horizontalmente mediante o controle de deslocamento a uma taxa de 0,35mm/min. A medida dos deslocamento foi realizada por meio dos transferidores hidráulicos, o que produz que o deslocamento registrado seja muito maior que aquele que acontece dentro do corpo de prova. Contudo, como a configuração de carregamento sempre é a mesma e a única mudança é o corpo de prova, teoricamente as diferenças de deslocamento serão produzidas unicamente pelo corpo de prova.

Figura 3.11 – Esquema do sistema de carregamento biaxial. Modificado de CHONG (1998).

3.3.2 Transmissão das cargas ao corpo de prova

Devido ao fato do corpo de prova apresentar descontinuidades que produziam deformações diferenciais na superfície, utilizou-se o mesmo sistema adotado por AGUIAR (1998) e CHONG (1998), capaz de simular uma transmissão de carga uniforme, e ao mesmo tempo, se adaptar às deformações. Este sistema consiste num arranjo de prismas que transmitem as cargas desde os macacos hidráulicos até as superfícies do corpo de prova (Figura 3.11). Este arranjo começa com uma célula de pressão que transmite a carga para um prisma grande, que por sua vez, transmite para os dois prismas medianos e estes ao mesmo tempo, transmitem para quatro pequenos prismas que estão em contato com o corpo de prova (Figura 3.12).

Figura 3.12 – Prismas de transmissão de carga. CHONG (1998) e AGUIAR (1998).

Um dos problemas encontrados com o sistema de carregamento e de transmissão de forças, foi que existe uma rotação das peças colocadas na direção de S_I . Esta rotação é devida às forças gravitacionais e à instabilidade própria do arranjo dos prismas. Para solucionar este problema o carregamento foi realizado com suportes laterais de forma a evitar a sua rotação. Todo este sistema pode ser observado na Figura 3.13.

Figura 3.13 – Sistema final de ensaios biaxiais

3.4 Ensaios de compressão simples, triaxial e de cisalhamento direto.

3.4.1 Ensaios de compressão simples e triaxial

Os ensaios de compressão simples e triaxial foram realizados para determinar os parâmetros mecânicos dos corpos de prova submetidos a carregamentos biaxiais. Para isto, utilizaram-se os corpos de prova cilíndricos obtidos da moldagem dos corpos de prova prismáticos. Inicialmente, as faces dos cilindros foram retificadas para obter superfícies paralelas. Este processo foi realizado na retífica semi-automática, na qual consegue-se trabalhar com 4 corpos de prova ao mesmo tempo (Figura 3.14a). Em outra etapa, foram ensaiados os corpos de prova em compressão simples e triaxial na máquina servo-controlada MTS com capacidade de 2700 kN. No caso dos ensaios triaxiais utilizou-se a câmara de confinamento com capacidade máxima de 1,7 MPa e o confinamento foi produzido mediante ar comprimido (Figura 3.14b). Os resultados dos ensaios de compressão simples e triaxiais são apresentados nas Tabelas 3.1 e 3.2, respectivamente.

Figura 3.14– a) retificação dos corpos de prova cilíndricos. b) esquema dos ensaios triaxiais

Tabela 3.1 – Resultado dos ensaios de compressão simples

Nome	Diâmetro (mm)	Altura (mm)	massa (g)	Densidade (g/cm ³)	Resistência (Mpa)	Média da resistência (MPa)	Desvio Padrão (MPa)
A1L6015	50	95,00	388,95	2,0862	28,92	35,94	7,37
A1L6025	50	98,50	396,27	2,0500	32,43		
A1L6035	50	97,50	397,40	2,0769	37,10		
A1L6045	50	98,00	404,40	2,1027	30,82		
A1L6055	50	95,00	384,09	2,0602	30,28		
A2L6015	50	98,75	418,56	2,1598	16,70		
A2L6025	50	99,30	421,20	2,1614	38,62		
A2L6035	50	99,00	420,52	2,1644	37,68		
A2L6045	50	97,60	419,01	2,1876	23,34		
A2L6055	50	97,80	409,51	2,1336	36,70		
A3L6015	50	92,50	384,52	2,1182	46,77	14,61	2,43
A3L6025	50	95,90	402,56	2,1390	40,79		
A3L6035	50	96,10	409,30	2,1702	44,27		
A3L6045	50	94,30	386,78	2,0900	39,80		
A3L6055	50	95,00	408,46	2,1909	39,68		
A4L6014	50	97,80	414,38	2,1590	38,02		
A4L6024	50	96,40	420,34	2,2218	40,63		
A4L6034	50	95,50	412,68	2,2019	42,92		
A4L6044	50	96,70	416,50	2,1947	37,39		
B1L6013	50	91,40	363,56	2,0268	13,40		
B1L6023	50	93,00	382,97	2,0983	15,30	14,61	2,43
B2L6025	50	91,50	363,49	2,0242	13,41		
B2L6035	50	92,50	383,26	2,1113	15,40		
B2L6045	50	92,80	389,07	2,1363	14,34		
B3L6015	50	92,80	361,48	1,9848	13,08		
B3L6025	50	94,70	369,74	1,9895	13,54		
B4L6015	50	93,40	363,04	1,9806	14,10		
B4L6025	50	95,70	374,08	1,9918	13,58		
B5L6015	50	96,10	380,03	2,0150	14,85		
B5L6045	50	94,90	372,61	2,0007	15,38		
B6L6015	50	94,40	378,74	2,0444	16,50	14,61	2,43
B6L6025	50	94,30	370,94	2,0044	15,49		
C1L6015	50	88,50	350,28	2,0168	16,70		
C1L6025	50	94,70	384,37	2,0682	17,23		
C2L6015	50	95,00	384,60	2,0629	20,77		
C2L6025	50	89,70	365,08	2,0739	18,82		
C3L6015	50	95,00	380,82	2,0426	10,75		
C3L6025	50	90,00	358,36	2,0289	8,58		
C4L6015	50	89,90	366,00	2,0745	14,43		
C4L6025	50	95,00	389,15	2,0873	13,74		
C1R6013	50	93,40	387,01	2,1114	17,13	14,61	2,43
C2R6013	50	93,30	372,96	2,0369	11,63		
C34R6014	50	94,20	392,94	2,1255	15,64		
C34R6024	50	93,20	389,99	2,1322	16,18		
C12RR6014	50	95,70	399,62	2,1278	12,86		
C12RR6024	50	95,7	393,43	2,0948	12,72		
C34RR6013	50	95,3	392,31	2,0976	13,65		

Tabela 3.2 – Resultado de ensaios de compressão triaxial

Corpo de prova	Diâmetro (mm)	Altura (mm)	massa (g)	Densidade (g/cm ³)	Resistência (MPa)	
					$\sigma_3 - \sigma_2$	σ_1
B3L35	50	92,9	358,74	1,968	0,2	20,97
B3L45	50	94,1	365,74	1,980	0,4	19,19
B3L55	50	92,7	359,53	1,976	0,6	19,91
B4L35	50	92,6	361,42	1,989	0,2	18,87
B4L45	50	93,0	361,33	1,980	0,4	19,26
B4L55	50	92,8	369,18	2,027	0,6	24,05
B5L35	50	92,7	371,67	2,043	0,2	19,98
B5L45	50	95,2	382,27	2,046	0,6	26,68
B5L55	50	92,6	356,92	1,964	0,4	24,05
C1L45	50	95,4	359,45	1,920	0,4	21,43
C1L55	50	92,9	360,74	1,979	0,1	16,86
C2L35	50	94,0	370,56	2,009	1,0	30,03
C2L45	50	94,7	269,54	1,450	0,6	29,88
C2L55	50	95,0	368,98	1,979	0,2	25,98
C3L45	50	93,0	360,40	1,975	0,2	14,13
C3L55	50	96,3	365,30	1,933	0,2	14,05
C4L35	50	94,1	359,03	1,944	0,2	21,66
C4L45	50	96,3	373,81	1,978	0,1	17,19
C4L55	50	94,0	366,37	1,986	0,2	19,83
C1R23	50	94,2	370,21	2,003	0,5	25,18
C1R33	50	96,8	381,60	2,009	1,0	25,92
C2R23	50	95,3	366,48	1,960	0,5	21,00
C2R33	50	94,2	358,62	1,940	1,0	21,93
C34R6034	50	92,0	363,86	2,015	0,5	21,65
C34R6044	50	93,1	378,98	2,074	1,0	26,68
C12RR6034	50	94,1	369,42	2,000	0,3	19,44
C12RR6044	50	91,8	357,45	1,984	0,6	20,06
C34RR6023	50	97,0	379,00	1,991	0,2	25,15
C34RR6033	50	93,0	362,68	1,987	0,4	26,44

3.3.2 Ensaios de cisalhamento direto.

Os ensaios de cisalhamento direto foram realizados para determinar as envoltórias de resistência das juntas colocadas dentro dos corpos de prova prismáticos. Além disso, com estes ensaios também se determinaram os valores de *JRC* das juntas através de retroanálise. Para realizar estes ensaios as amostras das juntas foram extraídas dos blocos prismáticos por meio de perfuração rotativa. Observou-se que com este método de extração, as amostras não apresentaram nenhum tipo de alteração. Após a extração, realizaram-se dois tipos de ensaios de cisalhamento, um com baixo nível de tensões (ensaios de inclinação, *Tilt test*) e outro com variação da tensão normal.

Para realizar os ensaios de cisalhamento direto com baixo nível de tensão normal, utilizou-se uma plataforma móvel na qual se apoiava a peça de argamassa. Uma

vez apoiada a peça na plataforma, começa-se a levantá-la de forma lenta até o momento em que a peça superior se desloca sobre a inferior. Quando este deslocamento acontece anota-se o ângulo formado entre a plataforma e a horizontal (α_1). Uma visão geral deste ensaio está ilustrada na Figura 3.15. A tabela 3.3 apresenta o resultado destes ensaios.

Figura 3.15 – Ensaio de inclinação (*Tilt Test*)

Tabela 3.3 – Resultado dos ensaios de inclinação (*Tilt Test*)

Corpo de prova	Largura (cm)	Comprimento (cm)	Peso Lâmina (g)	Peso Lâmina + Peça (g)	Peso da Peça (g)	Ângulo α com poliéster (°)		Ângulo α sem poliéster (°)	
						esquerda	direita	esquerda	direita
C1L	5,00	9,40	0,24	129,89	129,65	22	28	28	34
C2L	5,00	9,50	0,24	199,72	199,48	24	24	30	34
C3L	5,00	9,30	0,24	205,59	205,35	26	23	35	34
C4L	5,00	9,90	0,24	192,80	192,56	22	27	33	34
C1R	5,00	9,43	0,24	206,07	205,83	50	49	53	51
C2R	5,00	9,50	0,24	212,00	211,76	50	62	53	62
C3R	4,80	9,50	0,24	168,50	168,26	67	49	67	54
C4R	5,00	9,47	0,24	188,83	188,59	56	52	57	55
C5R	5,00	9,50	0,25	174,94	174,69	70	62	68	66
C6R	5,00	9,84	0,24	157,62	157,38	64	55	65	61
C7R	4,15	9,40	0,22	188,19	187,97	58	60	60	63
C8R	4,70	9,60	0,26	171,60	171,34	56	64	67	64
C1RR	4,35	9,60	0,27	202,71	202,44	59	57	63	60
C2RR	4,60	9,60	0,23	190,16	189,93	63	62	63	66

Continuação **Tabela 3.3**

Corpo de prova	Largura (cm)	Comprimento (cm)	Peso Lâmina (g)	Peso Lâmina + Peça (g)	Peso da Peça (g)	Ângulo α com poliéster (°)		Ângulo α sem poliéster (°)	
						esquerda	direita	esquerda	direita
C3RR	5,00	9,33	0,23	206,60	206,37	59	53	56	55
C4RR	4,90	9,20	0,23	200,95	200,72	58	57	62	57
C5RR	5,00	9,60	0,24	198,92	198,68	60	62	65	64
C6RR	4,75	9,60	0,25	197,35	197,10	63	67	63	68
C7RR	5,00	9,70	0,24	221,29	221,05	54	59	60	60
C8RR	4,90	9,60	0,24	197,87	197,63	63	57	63	61
C9RR	4,80	9,30	0,23	231,89	231,66	59	58	61	61
C10RR	4,50	9,50	0,25	181,28	181,03	62	59	62	63
C11RR	4,50	9,60	0,27	186,64	186,37	57	59	58	63
C12RR	5,00	9,50	0,24	212,14	211,90	62	58	64	61
C13RR	5,00	9,70	0,27	204,96	204,69	64	59	64	64
C14RR	5,00	9,50	0,26	186,22	185,96	56	61	63	61
C15RR	3,70	9,40	0,21	171,39	171,18	50	52	50	52

No caso dos ensaios de cisalhamento com variação do nível de tensões utilizaram-se as mesmas peças que no anterior, já que estas não apresentavam nenhum tipo de dano. Para realizar estes ensaios adaptou-se uma máquina de cisalhamento direto para solos, colocando-lhe um anel de aço para fixar as amostras de argamassa e LVDT para medir os deslocamentos (Figura 3.16).

Figura 3.16 – Anel de aço para fixar as peças de argamassa

Este anel foi projetado de tal forma que permite colocar peças com diferentes tipos de geometria, variando desde as irregulares até aquelas com formas bem definidas, o que neste estudo as peças tinham formatos cilíndricos. Uma vantagem adicional da utilização do anel foi garantir a total ausência do contato entre a parte superior e inferior, evitando-se desta forma o atrito produzido por estas peças (Figura 3.17).

Figura 3.17 – Parte superior e inferior do anel sem contato

No caso dos LVDT, estes estão distribuídos de tal forma que mede-se o deslocamento horizontal, a força que está sendo aplicada na parte superior da amostra (esta força é obtida medindo-se a deformação de uma célula de carga com constante linear de 1,6kN/mm), o deslocamento vertical e o deslocamento transversal. Este último é com relação ao movimento cisalhante e serve para determinar se as amostras rugosas têm algum tipo de rotação. A Figura 3.18 mostra a disposição dos LVDT e o esquema do ensaio. A velocidade de cisalhamento foi de 0,5mm/min e os níveis de tensão normal utilizados foram de 0,0; 0,2 e 0,4 MPa. O resultado destes ensaios é apresentado na Tabela 3.4 e Figura 3.19.

Figura 3.18 – Configuração de LVDT no ensaio de cisalhamento

Tabela 3.4 – Resultado dos ensaios de cisalhamento direto

Corpo de prova	Sentido	Rotação (°)	Tensão normal (MPa)	Tensão Cisalhamento Maximo (MPa)
C1LL0500	-	0	0,0130	0,0050
C2LL0502	-	0	0,2000	0,0408
C4LL0502	-	0	0,2000	0,0477
C3LL0504	-	0	0,4000	0,1325
C4LL0504	-	0	0,4000	0,1671
C2L0502	-	0	0,2000	0,0419
C4L0502	-	0	0,2000	0,0919
C3L0504	-	0	0,4000	0,1454
C4L0504	-	0	0,4000	0,1206
C1RL0500D	Direita	0,007	0,0000	0,0248
C2RL0502D	Direita	-0,060	0,2000	0,2145
C3RL0504D	Direita	-0,062	0,4000	0,3340
C4R0500D	Direita	0,004	0,0180	0,0346
C5R0502D	Direita	-0,084	0,2000	0,3312
C6R0504D	Direita	0,0191	0,4003	0,3016
C7R0502I	Esquerda	0,0458	0,1998	0,2888
C8R0504I	Esquerda	0,0458	0,3999	0,3227
C1RRL0500D	Direita	0,00764	0,0204	0,0582
C13RRL0502D	Direita	-0,03056	0,2004	0,2730
C2RRL0502D	Direita	0,01146	0,2003	0,3231
C3RRL0503D	Direita	-0,02292	0,3005	0,3406
C14RRL0504D	Direita	-0,0382	0,4004	0,4398
C4RR0500D	Direita	0,00764	0,0189	0,0643
C5RR0502D	Direita	-0,00382	0,2004	0,5288
C6RR0505D	Direita	0,04584	0,5007	0,7075
C7RRL0500I	Esquerda	0,04966	0,0176	0,0235
C8RRL0502I	Esquerda	-0,03438	0,2003	0,3705
C9RRL0504I	Esquerda	0,02674	0,4000	0,5273
C10RR0500I	Esquerda	0,01528	0,0200	0,0627
C11RR0502I	Esquerda	-0,01528	0,2001	0,3127
C12RR0504I	Esquerda	-0,03056	0,4015	0,5768

Figura 3.19 – Representação gráfica dos ensaios de cisalhamento

CAPÍTULO 4

RESULTADO E ANÁLISE DOS DADOS

“- Acautelai-vos – aconselhou – contra os juízos arrebatados pela paixão porque esta desfigura muitas vezes a verdade. Aquele que olha por um vidro de cor vê todos os objetos da cor desse vidro: se o vidro é vermelho, tudo lhe parece rubro; se é amarelo, tudo se lhe apresenta completamente amarelado. A paixão está para nós como a cor do vidro para os olhos.”

O homem que calculava, Malba Tahan.

4.1 Introdução

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados de todos os ensaios efetuados para esta pesquisa. Para realizar esta abordagem este capítulo está dividido em 4 partes. Na primeira parte, analisam-se os ensaios de compressão simples e triaxiais, fazendo-se ênfase na envoltória de resistência obtida a partir destes. A segunda, dedica-se à análise da caracterização das superfícies das juntas rugosas, para determinar o *JRC* por comparação visual e estatística. Na terceira, estudam-se os ensaios de cisalhamento direto, tanto os de baixo nível de tensões como os de tensão normal variável. E na quarta, analisa-se o ângulo de início das fraturas (***h***) e os modos de coalescência, a resistência à compressão e deformação dos modelos prismáticos submetidos a carregamentos biaxiais.

4.2 Ensaios de compressão simples e triaxial.

4.2.1 Ensaios de compressão simples.

Os ensaios denominados ANL (sendo $N = 1, 2, 3, \dots$, etc) o traço da argamassa proposto foi de 1:2,5:0,53 obtendo-se um valor médio de resistência à compressão simples de $s_{cs}=35,94\text{MPa}$ (Tabela 3.1), não resultando no tipo de coalescência esperado (escalonada), por esta razão este ensaios foram excluídos das análises de coalescência e propagação da fratura. Para os ensaios BNL e CNX o traço utilizado foi de 1:5:0,9 e o valor médio da resistência à compressão simples foi de $s_{cs}=14,61\text{MPa}$. Com este traço e com a mudança de outras variáveis conseguiu-se estudar a propagação e coalescência das fraturas nos ensaios de compressão biaxial.

4.2.2 Ensaios de compressão triaxial

Vários autores usam o ensaio de compressão triaxial, com corpos de prova obtidos do material intacto, para determinar suas características mecânicas. Este ensaio tem a vantagem de ser uma forma rápida de estimar um critério de ruptura para um determinado material. No caso das rochas, as envoltórias de resistência apresentam um comportamento extremamente não linear, principalmente, quando se trabalha com baixos níveis de confinamento. Nesta pesquisa trabalhou-se com confinamento relativamente baixo, entre 1% a 6.8% da s_{cs} , representando dessa forma as condições de tensões biaxial a que os corpos de prova prismáticos foram submetidos (Tabela 3.2).

A partir dos ensaios de compressão triaxial empregou-se o critério de ruptura proposto por HOEK *et al.* (2002) utilizando o programa *RockLab* versão 1.010. Assim, obtiveram-se as envoltórias de resistência da argamassa, tanto a não linear como a de Morh-Coulomb. Para envoltória de Morh-Coulomb, calculada a partir dos parâmetros do critério de HOEK *et al.* (2002), os valores equivalentes de coesão e ângulo de atrito foram de 2,946 MPa e 51,42°, respectivamente. Na Figura 4.1 é apresentado o resultado da análise realizada com o programa.

Figura 4.1 – Envoltórias de resistência instantâneas para distintos valores de tensão obtidas com o programa *Rocklab*®2004.

4.3 Quantificação das superfícies rugosas.

Um dos passos fundamentais nesta pesquisa foi a modelação da rugosidade dentro das juntas não-persistentes no maciço rochoso. Consequentemente, o valor do *JRC* devia ser quantificado de forma confiável. Para isto, inicialmente utilizaram-se 2 métodos o de comparação visual e o método estatístico (GAITAN *et al.*, 2004), a partir dos quais, observou-se que houve uma discrepância entre ambos métodos, ± 2 unidades no valor de *JRC*. Assim, para seleccionar qual dos valores seria utilizado, optou-se por obter este índice através de outros dois ensaios, o de inclinação e do cisalhamento com tensão normal variável.

Para poder obter o *JRC* pelo método visual e o estatístico, as superfícies rugosas foram digitalizadas. A digitação da rugosidade das juntas foi realizada mediante o perfilômetro, com ponta arredondada para a superfície menos rugosa e com ponta afiada para a outra superfície. Desta forma, obteve-se os dados *x,y,z* das superfícies para depois serem caracterizadas mediante interpolação pelo método de mínima curvatura.

A partir das coordenadas obtidas, dividiu-se a superfície de ambas rugosidades em 11 seções, como mostrado na Figura 4.2. Como resultado, com cada uma das seções realizou-se a análise visual (BARTON & CHOUBEY, 1977) e estatística (YU & VAYSSADE, 1990) para determinar um valor médio de *JRC* das superfícies.

Figura 4.2 – Seções utilizadas nos corpos de prova. Unidades apresentadas em micrômetros (µm)

4.3.1 Análise visual das superfícies

A análise visual das superfícies foi realizada com o método proposto por BARTON & CHOUBEY (1977). Este método consiste em comparar a seção da superfície com os perfis da Figura 2.10 e estimar a qual deles a seção pertence. Deve-se observar que as seções das juntas rugosas têm uma largura de $\pm 50\text{mm}$ no sentido do cisalhamento, por esta razão, para poder padronizar todas as juntas optou-se fixar o comprimento padrão em 100mm. Para esta finalidade é necessário usar a correção por efeito escala do JRC_0 . Esta correção é realizada mediante a Equação 4.1.

$$JRC_n = JRC_0 \cdot \left(\frac{L_n}{L_0} \right)^{-0,02 \cdot JRC_0} \quad (4.1)$$

Onde o JRC_n é o valor do JRC na escala desejada, JRC_0 representa o JRC da amostra ensaiada, L_n é o comprimento na escala de trabalho (neste caso, 100mm) e L_0 é o valor do comprimento da amostra ensaiada. A partir da comparação visual e usando a correção por efeito escala, obteve-se o valor médio do JRC_n para ambas juntas, resultando no caso da junta rugosa 1 o valor de JRC_n de 5,2 e para a junta rugosa 2 o JRC_n igual a 10,4 (Tabela 4.1 e 4.2).

4.3.2 Análise estatística das superfícies

A análise estatística das superfícies foi realizada com o método proposto por YU & VAYSSADE (1990), aplicando-se as equações 2.3 e 2.6 aos perfis das seções das superfícies. Desta maneira, obteve-se para a junta rugosa 1 o valor médio de JRC_n igual a 3,3 e para a junta rugosa 2 o JRC_n é de 8,4.

Tabela 4.1 – JRC_n visual e estatístico das seções da junta rugosa 1

Pedra 1	Perfil	JRC_n visual	JRC_n Estatístico
y-00,000 mm		5,464	3,515
y-9,245 mm		4,646	3,072
y-18,491 mm		6,319	3,174
y-27,736 mm		7,907	3,060
y-36,982 mm		7,913	5,494
y-46,228 mm		7,121	3,382
y-55,473 mm		4,643	3,902
y-64,719 mm		3,767	2,614
y-73,964 mm		3,765	4,174
y-83,210 mm		2,867	2,344
y-92,456 mm		2,863	1,891
Escala	

As escalas horizontal e vertical estão em relação 1:1

Tabela 4.2 – JRC_n visual e estatístico das seções da junta 2

Pedra 2	Perfil	JRC_n visual	JRC_n Estatístico
y-00,000 mm		11,029	10,416
y-9,412 mm		11,798	8,466
y-18,824 mm		7,057	4,081
y-28,236 mm		9,970	7,742
y-37,648 mm		10,606	8,891
y-47,060 mm		10,561	11,323
y-56,472 mm		11,707	10,644
y-65,884 mm		12,195	8,727
y-75,296 mm		10,391	7,135
y-84,708 mm		7,699	6,721
y-94,120 mm		10,946	7,871
Escala	

As escalas horizontal e vertical estão em relação 1:1

4.3.3 Ensaio de cisalhamento de baixo nível de tensões.

Estes ensaios foram realizados devido as discrepâncias encontradas na obtenção do JRC através dos métodos de comparação visual e estatístico. O ensaio de cisalhamento de baixo nível de tensões é comumente conhecido como ensaio de inclinação (*Tilt Test*) e foi proposto por BARTON & CHOUHEY (1977). Este ensaio serve para determinar o valor do JRC_n presente numa junta mediante retroanálise, utilizando a Equação 2.12. Para determinar o valor de JRC_n realizaram-se 27 ensaios, tanto com a lâmina de poliéster como sem sua presença na junta. Sabe-se que o JRC_n depende da direção na qual o ensaio é realizado. Por esta razão, o ensaio foi realizado movimentando a superfície no sentido esquerdo e direito da junta (Tabela 4.3, Figura 4.3).

Tabela 4.3 – Resultado dos ensaios de inclinação. Onde CNX (sendo N igual a 1,2,..., etc e X igual a L, R ou RR) representa o número do corpo de prova, “e” e “d” o sentido do ensaio.

Amostra	Média do JRC_n			
	com poliéster (°)		sem poliéster (°)	
	e	d	e	d
C1L				
C2L	0,37	0,42	0,53	0,27
C3L				
C4L				
C1R				
C2R				
C3R				
C4R	6,31	5,99	5,30	5,03
C5R				
C6R				
C7R				
C8R				
C1RR				
C2RR				
C3RR				
C4RR				
C5RR				
C6RR				
C7RR				
C8RR	6,53	6,44	5,41	5,40
C9RR				
C10RR				
C11RR				
C12RR				
C13RR				
C14RR				
C15RR

Figura 4.3 – Forma gráfica da lei empírica de resistência das juntas de rochas.

4.3.4 Ensaio de cisalhamento com tensão normal variável.

Outra maneira para determinar o valor de JRC presente numa junta é mediante os ensaios de cisalhamento com tensão normal variável. Para estes ensaios utilizaram-se os mesmos corpos de prova do ensaio de inclinação, isto porque não se observou nenhum tipo de dano na superfície das juntas. Segundo BARTON (1976) o valor de JRC_0 pode ser calculado mediante retroanálise utilizando a Equação 4.4, sendo este um dos métodos mais aceitos para este tipo de cálculo.

$$JRC_0 = \frac{\tan^{-1}\left(\frac{t}{s_n}\right) - f_b}{\log_{10}\left(\frac{JCS}{s_n}\right)} \quad (4.4)$$

Onde JRC_0 é o índice de rugosidade da junta, t é tensão cisalhante, s_n é a tensão normal à junta, f_b é o ângulo de atrito básico da junta e JCS é resistência à compressão da parede da junta.

Devido ao fato das amostras ensaiadas ter um comprimento de $\pm 50\text{mm}$ no sentido do cisalhamento, é necessário fazer a correção por efeito escala (Eq 4.1). Aplicando a Eq. 4.4 e Eq. 4.1, obteve-se em média que o valor de JRC_n para as juntas lisas é de 0, para as juntas com meia rugosidade é de 6,7 e para a maior rugosidade é de 12,3. O resultado destas médias é apresentado na Tabela 4.4 e as envoltórias para as juntas rugosas estão apresentadas na Figura 4.4.

Tabela 4.4 – Média do valor de JRC_n obtido a partir dos ensaios de cisalhamento. Onde CNX (sendo N igual a 1,2,..., etc e X igual a L, R ou RR) representa o número do corpo de prova, “e” e “d” o sentido do ensaio

Amostra	Média do JRC_n			
	com poliéster (°)		sem poliéster (°)	
	e	d	e	d
C1L				
C2L				
C3L	0,00	0,00	0,00	0,00
C4L				
C1R				
C2R				
C3R				
C4R	-	8,09	6,29	7,63
C5R				
C6R				
C7R				
C8R				
C1RR				
C2RR				
C3RR				
C4RR				
C5RR				
C6RR				
C7RR				
C8RR	12,73	12,74	11,41	13,08
C9RR				
C10RR				
C11RR				
C12RR				
C13RR				
C14RR				
C15RR

Figura 4.4 – Envoltória de *JRC* das juntas rugosas.

4.3.5 Resultado das análises

Para as juntas lisas o valor de *JRC* resultou de zero ou muito próximo a ele para todos métodos. Portanto, estas juntas foram classificadas com *JRC*=0.

Com as juntas com rugosidade intermediária, observou-se que o valor de *JRC* variou desde um valor mínimo de 3,33 pelo método estatístico, até um máximo de 6,96 obtido do ensaio de cisalhamento com tensão normal variável.

Para as juntas com a maior rugosidade, o valor mínimo de *JRC* encontrou-se nos ensaios de inclinação, sendo de 5,41. Os valores máximos foram obtidos nos ensaios de cisalhamento com tensão normal variável com um valor de 12,25.

Não era esperado obter uma dispersão não correlata do *JRC* através dos diferentes ensaios. A princípio foram utilizados os métodos de comparação visual e estatística para determinar o *JRC*, não se obtendo um resultado satisfatório.

Para ter uma maior base de comparação optou-se por realizar os ensaios de inclinação e de cisalhamento com tensão normal variável, obtendo-se assim uma dispersão ainda maior. No entanto, observou-se que a diferença entre o valor de *JRC_n* de uma junta em relação a outra manteve-se em ± 5 unidades em todos os métodos,

exceto no ensaio de inclinação. Para decidir qual valor de JRC utilizar no presente estudo, baseou-se no trabalho realizado por BARTON (1976) que definiu o JRC a partir da análise de ensaios de cisalhamento direto. Por esta razão, para as juntas com meia rugosidade adotou-se o valor de $JRC=6,7$ e para as de maior rugosidade $JRC=12,3$.

4.5 Ensaio de compressão biaxial.

Para determinar a resposta mecânica de maciços rochosos que apresentam juntas não-persistentes, foram realizados um total de 21 ensaios biaxiais. Estes ensaios permitiram a caracterização dos modos de coalescência, ângulo de início das fraturas, resistência à compressão biaxial e a deformabilidade dos modelos prismáticos (Tabela 4.5). Para determinar a deformação (ϵ) dos corpos de prova utilizou-se o deslocamento registrado pelo atuador horizontal (S_1), como relatado no Cap.3.3.1, página 54.

Tabela 4.5 – Resultado dos ensaios biaxial. Onde: ϵ representa a deformação na direção principal maior.

Nome	JRC junta	α (°)	σ_2 (MPa)	σ_{cs} (MPa)	σ_1 (MPa)	ϵ	E (GPa)
A1L	0	132	0,203	31,91	9,576	0,0035	1,955
A2L	0	132	0,209	30,61	9,540	0,0084	1,8520
A3L	0	132	0,266	42,26	12,594	0,0065	2,2700
A4L	0	132	0,200	39,74	15,499	0,0094	2,2524
B1L	0	90	0,205	14,35	7,214	0,0096	1,1477
B2L	0	90	***	14,39	***	***	***
B3L	0	90	0,503	13,31	8,026	0,0065	1,6863
B4L	0	90	0,501	13,84	8,198	0,0045	2,0048
B5L	0	90	1,002	15,12	9,724	0,0067	1,7238
B6L	0	90	1,039	16,00	8,329	0,0057	1,8804
C1L	0	54	0,705	16,96	8,520	0,0060	2,0922
C2L	0	54	0,276	19,80	9,879	0,0054	2,0569
C3L	0	54	0,240	9,67	5,836	0,0053	1,5826
C4L	0	54	0,220	14,08	8,197	0,0061	1,9601
C1R	6,96	54	0,244	17,13	7,802	0,0050	2,1441
C2R	6,96	54	0,242	11,63	7,789	0,0063	1,8579
C3R	6,96	54	0,242	15,91	8,821	0,0050	2,2391
C4R	6,96	54	0,238	15,91	8,687	0,0049	2,1360
C1RR	12,25	54	0,236	12,79	8,730	0,0046	2,2945
C2RR	12,25	54	0,237	12,79	7,300	0,0042	2,2574
C3RR	12,25	54	0,232	13,65	7,652	0,0040	2,1705
C4RR	12,25	54	0,214	13,65	8,572	0,0052	2,0167

Os ensaios marcados com ** são aqueles onde não foi possível obter informações.

Devido ao fato da ruptura que se pretende estudar ser do tipo escalonada (coalescência por fraturamento entre juntas paralelas não coplanares), testou-se três tipos de distribuição de juntas, diferentes níveis de confinamento e resistências a compressão simples distintas. A nomenclatura adotada para distinguir entre cada um dos testes foi a seguinte: ANX, BNX e CNX. Onde A, B ou C designa a configuração da

junta; N denota o número do ensaio, 1,2,..., etc e a letra X identifica o tipo de junta utilizada, podendo ser lisa (L), com meia rugosidade (R, $JRC=6,7$) ou com a maior rugosidade (RR, $JRC=12,3$).

4.5.1 Ensaio biaxiais ANL

Para avaliar a distribuição geométrica das juntas, como também, para testar a influência da resistência da argamassa sobre o modo de coalescência, foram realizados quatro ensaios biaxiais denominados ANL. As constantes de distribuição geométrica utilizadas para as juntas foram: $\beta=60^\circ$, $\alpha=132^\circ$, $L_j = L_b = 50\text{mm}$, $d = 56,5\text{mm}$ e $JRC=0$. Cada um dos blocos contendo 17 juntas como mostrado na Figura 4.5. A resistência média a compressão simples (σ_{cs}) destes blocos resultou de 35,94Mpa.

Figura 4.5 – Configuração geométrica dos blocos ANL

Nestes ensaios o ângulo de início de propagação (θ) e o modo de coalescência da fratura não foram verificados, em razão da ruptura na maioria dos casos acontecer pela metade da largura do corpo de prova, no plano de tensão maior (Figura 4.6). Nos ensaios realizados por WANG (1998), com distribuição geométrica das juntas similar aos ensaios ANL, observou-se que o tipo de coalescência entre as juntas sempre foi escalonada, a fratura partia do centro da área carregada e seguia escalonando pelas juntas até atravessar o corpo de prova. A diferença entre os modelos utilizados por WANG (*op. cit.*) com os modelos ANL está na resistência à compressão simples da argamassa, sendo está, em média, de 14,95 MPa para os do citado autor e de 35,94 MPa para os modelos ANL.

Observando a diferença no tipo de propagação da fratura, estimou-se que três fatores podem estar influenciando esta mudança: primeiro, a resistência a compressão simples; segundo, a configuração das juntas e terceiro, as condições de fronteira nas faces de carregamento. Por esta razão, para eliminar uma das possíveis causas nos ensaios posteriores a este, utilizou-se uma resistência à compressão simples menor.

Figura 4.6 – Ruptura típica nos corpos de prova ANL.

Nos ensaios ANL a tensão de confinamento (S_2) foi de 0,22MPa. A tensão de confinamento manteve-se constante ao longo de todo o carregamento e descarregamento do ensaios. Para determinar a resistência dos copos de prova utilizou-se uma medida adimensional, que relaciona a diferença das tensões principais com a resistência à compressão simples. Esta medida é obtida utilizando a Equação 4.5 e é chamada de resistência à compressão normalizada.

$$S_{nor} = \frac{S_1 - S_2}{S_{cs}} \quad (4.5)$$

Onde s_{nor} é a resistência à compressão normalizada, s_I é a tensão na ruptura, s_2 é a tensão de confinamento e s_{cs} é o valor de resistência a compressão simples.

Para estes ensaios o valor médio de resistência normalizada resultou de 0,3188. Na Tabela 4.6 é apresentado o resultados das resistências normalizadas dos ensaios ANL. Detalhes sobre o comportamento de tensão-deformação destes ensaios podem ser encontrados no Apêndice A nas Figuras A.1 até A.4.

Foram determinadas também a deformação e o módulo de elasticidade no momento em que o corpo de prova atingir a resistência máxima. O deslocamento do sistema foi medido ao longo do processo de carregamento e descarregamento mediante os atuadores hidráulicos, mas, para fins da análise o deslocamento adotado foi aquele que acontece no momento de máxima tensão (s_I). Assumindo-se que o deslocamento registrado for o deslocamento que acontece no corpo de prova, para estes corpos de prova a deformação máxima resultou em média de 0,0069 (Tabela 4.6).

Para determinar o módulo de elasticidade calculou-se a inclinação da reta no valor de 50% da tensão máxima (s_I), quando possível, ou então na parte linear do gráfico, sendo este valor em média de 2,082 GPa (Tabela 4.6).

Tabela 4.6 – Resultados dos ensaios biaxiais ANL

Nome	JRC junta	α (°)	$(\sigma_1 - \sigma_2)/\sigma_{cs}$	Média $(\sigma_1 - \sigma_2)/\sigma_{cs}$	ϵ	Média ϵ	E (GPa)	Média E (GPa)
A1L	0	132	0,294	0,319	0,0035	0,00692	1,955	2,082
A2L	0	132	0,305		0,0084		1,8520	
A3L	0	132	0,292		0,0065		2,2700	
A4L	0	132	0,385		0,0094		2,2524	

4.5.2 Ensaios biaxiais BNL

No ensaios biaxiais BNL reduziu-se a resistência a compressão simples obtendo-se em média 14,50 MPa. Além disto, testaram-se diferentes níveis de confinamento (σ_2). As constantes de distribuição geométrica utilizadas para as juntas foram: $b=60^\circ$, $a=90^\circ$, $L_j=L_b=50\text{mm}$, $d=56,5\text{mm}$, $JRC=0$ e cada um dos blocos continha 14 juntas (Figura 4.7).

Figura 4.7 – Configuração geométrica dos corpos de prova BNL.

Sobre o ângulo de início com que se propaga a fratura (h) resultou basicamente em 0° . Em função de acontecer em quase todos os corpos de prova uma coalescência entre juntas coplanares, principalmente naqueles com altos confinamentos (0,5 e 1,0 MPa).

No caso do ensaio B1L (Figura 4.8) de baixo confinamento a fratura começou, simultaneamente da ponta 2 em direção a ponta 4, da ponta 3 rumo da ponta 1 e da ponta 5 com destino a ponta 1, até finalmente coalescer. O ângulo h deste tipo de coalescência foi de 48° , sendo que este tipo de coalescência é descrito por WONG & CHAU (1998) e é denominado como tipo W II/III. Já para o corpo de prova B2L (Figura 4.9), o ensaio não ocorreu de acordo com o esperado, pois o atuador de aplicação de s_1 descontrolou-se e rompeu o corpo de prova em menos de 2 segundos, quando ainda s_2 era zero. Contudo, o que pode-se extrair desse ensaio foi o fato de que as juntas passaram então a ser do tipo WII ($h=99^\circ$) segundo as categorias descritas por WONG & CHAU (*op. cit.*).

Desta forma, constatou-se que o confinamento é um fator determinante no tipo de coalescência das fraturas e que para controlar o modo de coalescência é necessário controlar esta variável.

Figura 4.8 – Modo de propagação das fraturas dos modelos B1L.

Figura 4.9 – Modo de propagação das fraturas dos modelos B2L.

Para determinar a influência do confinamento (s_2) sobre o modo de ruptura e sobre a resistência dos corpos de prova, nos ensaios BNL testou-se diferentes níveis de confinamento, sendo de 0,2 MPa; 0,5 MPa e 1,0 MPa. Observou-se que existe uma mudança no modo de coalescência entre as juntas quando se aumenta o confinamento, passando de coalescência entre juntas não coplanares até coalescer entre juntas do mesmo plano. Com respeito à resistência dos corpos de prova, verificou-se que existe um acréscimo de s_{hor} quando se incrementa o confinamento, mas, aparentemente ao atingir um certo valor de s_2/s_{cs} esta tendência deixa de existir e s_{hor} começa a ser constante ou então decresce. Este comportamento pode ser observado na Figura 4.10

onde se constata a mesma tendência nos ensaios realizados por JAMIL (1992) e WANG (1998).

As envoltórias desenhadas na Figura 4.10 representam o limite superior e inferior de fraturamento em que um corpo de prova pode se encontrar. A parte superior corresponde ao gráfico de resistência de um corpo de prova intacto, esta envoltória foi obtida a partir dos ensaios triaxiais, usando o critério de HOEK *et al.* (2002). O limite inferior representa o corpo de prova com uma junta persistente, inclinada em $b=60^\circ$. A envoltória inferior é obtida modificando a Equação 4.4 proposta por BARTON (1976), em termos das tensões principais e representada pelas Equações B.1 e B.2. O procedimento para obter esta envoltória é detalhado no Apêndice B. Na Tabela 4.7 estão os resultados das resistências obtidas dos ensaios BNL e no Apêndice A estão ilustradas as curvas de tensão-deformação dos ensaios BNL (Figuras A5 até A9).

Figura 4.10 – Resistência normalizada dos corpos de prova BNL

Sobre a deformação nos modelos BNL, observou-se que é influenciada pela tensão confinante e conseqüentemente, pelo modo de coalescência. Por esta razão, a maior deformação foi encontrada no corpo de prova B1L, sendo de 0,0096. Similarmente, o módulo de elasticidade deste corpo de prova foi o menor. O resultado destes ensaios é mostrado na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Resultados dos ensaios biaxiais BNL

Nome	JRC junta	$\alpha(^{\circ})$	$(\sigma_1 - \sigma_2)/\sigma_{cs}$	Média $(\sigma_1 - \sigma_2)/\sigma_{cs}$	ϵ	Média ϵ	E (GPa)	Média E (GPa)
B1L	0	90	0,488		0,0096		1,1477	
B2L	0	90	***		***		***	
B3L	0	90	0,565	0,529	0,0065	0,00660	1,6863	1,689
B4L	0	90	0,556		0,0045		2,0048	
B5L	0	90	0,577		0,0067		1,7238	
B6L	0	90	0,456		0,0057		1,8804	

4.5.3 Ensaios biaxiais CNX

Com base nos resultados obtidos nos ensaios ANL e BNL, sobre a influência da resistência da argamassa e do confinamento no modo de ruptura, optou-se realizar uma nova série de ensaios (CNX), fixando essas duas variáveis. Assim, a única variável que teria influência no modo de ruptura seria o valor de *JRC* da junta.

Para obter uma ruptura do tipo escalonada, nos ensaios CNX utilizou-se a seguinte distribuição geométrica: $b=60^{\circ}$, $a=54^{\circ}$, $L_j = L_b=50\text{mm}$, $d = 25\text{ mm}$ e *JRC* variável. Cada um dos blocos continha 15 juntas como mostrado na Figura 4.11. Acreditava-se que diminuindo o valor de *d* pela metade obter-se-ia uma ruptura de tipo escalonada sem ser influenciada pela tensão de confinamento (AGUIAR, 1998).

Como primeiro teste, no ensaio C1L a tensão de confinamento (s_2) utilizada foi de 0,7 MPa, não resultando o tipo de coalescência esperado. Assim, nos ensaios posteriores, o nível de confinamento (s_2) foi reduzido a 0,2MPa e desta forma, obteve-se sempre nos ensaios com junta lisa a ruptura do tipo escalonada.

Figura 4.11 – Configuração geométrica dos corpos de prova CNX

4.5.2.1 Ensaios Biaxiais CNL

Sobre o ângulo de início da propagação da fratura (h), nos corpos de prova foi observado que em média era de 64° para o lado esquerdo e de 65° para o lado direito da junta (Figura 4.12). Sendo este resultado coerente com o resultado de $h=70,5^\circ$ encontrado por ERDORGAN & SIH (1963). No valor médio de h para estas juntas, não foi quantificado os valores gerados pelo corpo de prova C1L, pois, a ruptura aconteceu entre juntas coplanares, sendo $h=0,0^\circ$ (Tabela 4.8).

Figura 4.12 – Ângulo de início da propagação da fratura (h) para os modelos CNL

Tabela 4.8 – Resultado dos ângulos de início da propagação da fratura nos modelos CNL

Nome	σ_2 (MPa)	Média h (°)		Média h (°)	
		Esquerda	Direita	Esquerda	Direita
C1L	0,705	0	0		
C2L	0,276	68	63		
C3L	0,240	59	63	64	65
C4L	0,220	65	69		

Sobre a coalescência entre juntas não coplanares (Figura 4.13), observou-se que o principal mecanismo atuante foi a tração. Isto comprovado com a revisão da superfície da fratura que se apresentou sem vestígios de cisalhamento, ou seja, a superfície estava rugosa e com mínima quantidade de material desprendido. Este tipo de coalescência também foi encontrado por WONG & CHAU (1998) e foi denominada como WI.

Figura 4.13 – Coalescência típica dos modelos CNL

Sobre a resistência nos corpos de prova CNL, obteve-se em média uma resistência normalizada (s_{nor}) de 0,523. Também, observou-se que um confinamento relativamente alto ($s_2=0,7$ MPa), mesmo com a configuração geométrica que garantia a coalescência (WANG, 1998), a ruptura aconteceu num plano de $h=60^\circ$. Sendo esta a razão pela qual manteve-se baixo o confinamento em todos os ensaios posteriores. No Apêndice A (Figuras A10 até A13) estão apresentadas as curvas de tensão-deformação dos corpos de prova CNL. Com relação à deformação e ao módulo de elasticidade no momento de máxima tensão dos corpos de prova, obtiveram-se em média de 0,00571 e 1,923GPa, respectivamente. Estes dados estão na Tabela 4.9, conjuntamente com os dados da resistência.

Tabela 4.9 – Resultados dos ensaios biaxiais CNL

Nome	JRC junta	$\alpha(^{\circ})$	$(\sigma_1 - \sigma_2)/\sigma_{cs}$	Média $(\sigma_1 - \sigma_2)/\sigma_{cs}$	ϵ	Média ϵ	E (GPa)	Média E (GPa)
C1L	0	54	0,461		0,0060		2,0922	
C2L	0	54	0,485	0,523	0,0054	0,00571	2,0569	1,923
C3L	0	54	0,579		0,0053		1,5826	
C4L	0	54	0,566		0,0061		1,9601	

4.5.2.2 Ensaios Biaxiais CNR

Nos ensaios CNR ($JRC=6,7$), o ângulo de início da propagação da fratura (h), foi em média de 40° para o lado esquerdo e de 48° para o lado direito da junta (Figura 4.14). Verificou-se que existe uma diferença entre ambos lados de 8° . Este comportamento provavelmente está relacionado ao valor de JRC , que localmente não é igual para ambas as pontas. Também, esta diferença entre ambos h pode estar relacionada a dilatação produzida pela rugosidade. Assim, esta diferença poderia ser atribuída a heterogeneidade da rugosidade. Os dados sobre os ângulos de início da fratura estão resumidos na Tabela 4.10.

Figura 4.14 – Ângulo de início da propagação da fratura (h) para os modelos CNR.

Tabela 4.10– Resultado dos ângulos de início da propagação da fratura nos modelos CNR

Nome	σ_2 (MPa)	Média h (°)		Média h (°)	
		Esquerda	Direita	Esquerda	Direita
C1R	0,244	22	20		
C2R	0,242	31	44	40	48
C3R	0,242	61	65		
C4R	0,238	46	61		

Na Coalescência nos ensaios CNR (Figura 4.15), observou-se que os mecanismos implícitos neste processo foram a tração e o cisalhamento. A tração foi observada no início das fraturas e o cisalhamento no meio do caminho de coalescência. Na superfície final da propagação de fratura (Figura 4.16) verificou-se que: no início da fratura a superfície apresentava-se muito rugosa e com pouco material desprendido e no meio da coalescência o material mostrava-se com muito material pulverizado.

Figura 4.15 – Coalescência típica de fraturas nos modelos CNR

Figura 4.16 – Mecanismos de coalescência típicos dos modelos CNR

O confinamento utilizado nos modelos CNR em média foi de 0,242 MPa e a resistência normalizada (s_{nor}) resultou em média de 0,540. Observa-se que com a mudança do valor de JRC houve um ganho de resistência, quando esta é comparada com a resistência dos modelos CNL. O resultado das resistências normalizadas é mostrado na Tabela 4.11 e no Apêndice A (Figuras A.14 até A.17) estão apresentadas as curvas de tensão-deformação.

Sobre a deformação e o módulo de elasticidade dos corpos de prova CNR, obtiveram-se respectivamente, em média, os valores de 0,00528 e 2,094 GPa. Comparados com os modelos CNL, os modelos CNR tiveram uma deformação média menor. Contrariamente, o valor médio de módulo de elasticidade foi maior. Este crescimento do valor médio do módulo de elasticidade e o decréscimo da média da deformação, demonstra uma tendência do corpo de prova de ser mais rígido quando se aumenta o valor de JRC . O resultado dos dados de deformação e o módulo de elasticidade estão sumarizados na Tabela 4.11.

Tabela 4.11– Resultados dos ensaios biaxiais CNR

Nome	JRC junta	$\alpha (^{\circ})$	$(\sigma_1 - \sigma_2) / \sigma_{cs}$	Média $(\sigma_1 - \sigma_2) / \sigma_{cs}$	ϵ	Média ϵ	E (GPa)	Média E (GPa)
C1R	6,96	54	0,441		0,0050		2,144054	
C2R	6,96	54	0,649	0,540	0,0063	0,00528	1,857929	2,094
C3R	6,96	54	0,539		0,0050		2,239068	
C4R	6,96	54	0,531		0,0049		2,136032	

4.5.2.3 Ensaios Biaxiais CNRR

Nos ensaios CNR ($JRC=12,3$), o ângulo de início da propagação da fratura (h), resultou em média de 5° e 20° , para o lado esquerdo e direito da junta respectivamente (Figura 4.17). Observa-se que novamente existe uma diferença no ângulo de início da fratura, desta vez com 15° . Assim, esta diferença deve ser atribuída a heterogeneidade da rugosidade, conseqüentemente ao valor de JRC e ao fenômeno da dilatância. Os dados sobre os ângulos de início da fratura estão apresentados na Tabela 4.12.

Figura 4.17 – Ângulo de início da propagação da fratura (h) para os modelos CNR

Tabela 4.12– Resultado dos ângulos de início da propagação da fratura nos modelos CNRR

Nome	σ_2 (MPa)	Média ângulo ($^{\circ}$)		Média ângulo ($^{\circ}$)	
		Esquerda	Direita	Esquerda	Direita
C1RR60	0,236	9	12		
C2RR60	0,237	2	5	5	20
C3RR60	0,232	0	28		
C4RR60	0,214	8	36		

Sobre a coalescência nos ensaios CNRR (Figura 4.18), observou-se que os mecanismos de tração e do cisalhamento controlam o processo. A tração foi observada no início das fraturas é o cisalhamento no meio do caminho de coalescência. Na superfície final da propagação de fratura (Figura 4.19) observou-se que no início da fratura a superfície apresentava-se muito rugosa e com pouco material desprendido e, no meio da coalescência o material mostrava-se com muito material pulverizado.

Figura 4.18 – coalescência típica das fraturas nos modelos CNRR

Figura 4.19 – Mecanismos de coalescência típicos dos modelos CNRR

Para os modelos CNRR o confinamento utilizado em média foi de 0,230 MPa e a resistência normalizada (s_{nor}) resultou em média de 0,593. Verifica-se que quando comparada a resistência dos modelos CNL e CNR com a resistência dos modelos CNRR, esta última apresenta-se maior. Isto pode ser atribuído à mudança do valor de JRC . O resumo das resistências normalizadas é mostrado na Tabela 4.13 e no Apêndice A (Figuras A.18 até A.21) estão apresentadas as curvas tensão-deformação.

Tabela 4.13– Resultado dos ensaios biaxiais CNRR

Nome	JRC junta	$\alpha(^{\circ})$	$(\sigma_1 - \sigma_2)/\sigma_{cs}$	Média $(\sigma_1 - \sigma_2)/\sigma_{cs}$	ϵ	Média ϵ	E (GPa)	Média E (GPa)
C1RR	12,25	54	0,664	0,593	0,0046	0,00450	2,29452	2,185
C2RR	12,25	54	0,552		0,0042		2,257427	
C3RR	12,25	54	0,544		0,0040		2,170527	
C4RR	12,25	54	0,612		0,0052		2,016663	

A média da deformação obtida nos corpos de prova CNRR resultou de 0,00450. O módulo de elasticidade dos corpos de prova, em média foi de 2,185GPa. Observou-se que os modelos CNRR tiveram a menor média de deformação dos ensaios denominados CNX e inversamente, o valor médio de módulo de elasticidade foi o maior de todos. Assim, verificou-se que existe uma tendência do corpo de prova ser mais rígido quando se aumenta o valor de JRC . O resumo dados de deformação e o módulo de elasticidade estão resumidos na Tabela 4.13.

4.5.2.4 Resultado das análises dos Ensaios Biaxiais CNX

O ângulo de início da propagação de fratura (h) obtido nos CNL foi de 64° no lado esquerdo e de 65° no lado direito. Para os modelos CNR o ângulo h obteve-se de 40° no lado esquerdo e de 48° no lado direito. Nos ensaios CNRR o ângulo de início da propagação da fratura, resultou de 5° e de 20° , para o lado esquerdo e direito, respectivamente. Comparando os dados anteriores, observa-se uma clara relação de decréscimo do ângulo h quando se aumenta o valor de JRC . Uma tendência similar foi encontrada por WONG & CHAU (1998), com a diferença que nos modelos utilizados pelos autores não se mudava o JRC , senão, o valor do atrito interno da junta (m). O resumo dos ensaios CNX é apresentado na Tabela 4.14.

Sobre a coalescência, observou-se que esta também é influenciada pelo valor do JRC . Esta influência é mais perceptível nos mecanismos atuantes na propagação da fratura, passando desde mecanismos puramente de tração para valores baixos de JRC ($JRC=0$), até uma combinação de tração e cisalhamento para valores maiores de JRC ($JRC= 6,7$ e $JRC= 12,3$). Este comportamento também foi observado por WONG & CHAU (1998) e SHEN (1995) quando aumentaram o valor do atrito na junta (m). O resultado dos modos de coalescência para os modelos CNX é apresentado na Tabela 4.14.

Tabela 4.14 – Resultado do ângulo de propagação da fratura e modos de coalescência nos ensaios CNX

Nome	JRC junta	Média ângulo (h°)		Esquema do caminho de propagação da fratura	Descrição da coalescência	Mecanismo de coalescência
		Esquerda	Direita			
CNL	0	64	65		A coalescência se iniciou nas pontas das juntas e cresceu até coalescer no centro. A superfície de ruptura apresentou-se limpa e rugosa.	Tração
CNR	6,7	40	48		A coalescência se iniciou nas pontas das juntas e cresceu até coalescer no centro. A superfície de ruptura apresentou-se com material pulverizado.	Tração+ Cisalhamento
CNRR	12,3	5	20		A coalescência se iniciou nas pontas das juntas e cresceu até coalescer no centro. A superfície de ruptura apresentou-se com material pulverizado.	Tração+ Cisalhamento

A média da resistência à compressão normalizada (s_{nor}) obtida para os ensaios CNL foi de 0,523. já para os ensaios CNR este valor mudou para 0,540 e para os ensaios CNRR se obteve um valor de 0,593. Desta forma, observa-se que a resistência dos corpos de prova é influenciada pelo JRC . Sendo que s_{nor} aumenta com o acréscimo de JRC . Na Figura 4.20 ilustra-se a tendência antes mencionada, observando-se que a envoltória de limite superior representa um corpo de prova sem nenhuma junta e a envoltória de limite inferior representa um corpo de prova com uma junta persistente com inclinação b . Na Tabela 4.15 estão os dados da compressão normalizada dos ensaios CNX.

Figura 4.20 – Curva de Resistência Normalizada (s_{nor}) x JRC , modelos CNX

Nos corpos de prova denominados CNL a média de deformação (e) e o módulo de elasticidade (E) resultaram de: 0,0057 e 1,923GPa, respectivamente. Já para os corpos de prova CNR estas médias foram de: 0,0053 e 2,094GPa. No caso dos ensaios CNRR obteve-se em média e igual a 0,0045 e E igual a 2,185 GPa. Observa-se que existe uma relação inversa entre o valor de JRC e a deformação, quando medida no momento da ruptura. Inversamente, o módulo de elasticidade apresenta-se crescente quando se aumenta o valor de JRC . Nas Figuras 4.21 ilustra-se esta tendência e no Apêndice C (Figura C.1) mostra-se a curva da deformação em relação ao JRC . Na Tabela 4.15 estão sumarizados os valores de s_{nor} , e , e E dos corpos de prova CNX.

Tabela 4.15– Resultado da resposta mecânica dos ensaios CNX

Nome	JRC junta	Média $(\sigma_1 - \sigma_2) / \sigma_{cs}$	Média ϵ	Média E (GPa)
CNL	0	0,52	0,0057	1,923
CNR	6,7	0,54	0,0053	2,094
CNRR	12,3	0,59	0,0045	2,185

Figura 4.21 – Curva de Módulo de Elasticidade x JRC, modelos CNX

4.5.4 Resultados das análises dos ensaios biaxiais.

Vários ângulos de início da propagação da fratura como vários modos de coalescência foram encontrados nos distintos ensaios biaxiais. Observou-se que estes dependem tanto da configuração geométrica das juntas como dos estados de confinamento nos corpos de prova. Os resultados do ângulo de início da propagação da fratura e o modo de coalescência de todos os ensaios biaxiais estão sumarizados na Tabela 4.16.

Tabela 4.16 – Sumário dos ângulos h e a coalescência dos ensaios biaxiais.

Nome	L_j (mm)	L_b (mm)	d (mm)	b (°)	a (°)	s_2 (MPa)	JRC junta	Média ângulo (h °)		Esquema do caminho de propagação da fratura	Descrição da coalescência	Mecanismo de coalescência
								Esquerda	Direita			
ANL	50	50	56,5	60	132	0,2	0	--	--	-----	Sem coalescência	---
B1L	50	50	56,5	60	90	0,2	0	132	48		A coalescência se iniciou nas pontas das juntas e cresceu até coalescer com a outra ponta. A superfície de ruptura apresentou-se com material pulverizado	Cisalhamento
BNL	50	50	56,5	60	90	0,5 e 1,0	0	0	0		A coalescência se iniciou nas pontas das juntas e cresceu até coalescer com a outra ponta. A superfície de ruptura apresentou-se com material pulverizado	Cisalhamento
CNL	50	50	25	60	54	0,2	0	64	65		A coalescência se iniciou nas pontas das juntas e cresceu até coalescer no centro. A superfície de ruptura apresentou-se limpa e rugosa.	Tração
CNR	50	50	25	60	54	0,2	6,7	40	48		A coalescência se iniciou nas pontas das juntas e cresceu até coalescer no centro. A superfície de ruptura apresentou-se com material pulverizado.	Tração + Cisalhamento
CNRR	50	50	25	60	54	0,2	12,3	5	20		A coalescência se iniciou nas pontas das juntas e cresceu até coalescer no centro. A superfície de ruptura apresentou-se com material pulverizado.	Tração + Cisalhamento

Sobre a resistência à compressão normalizada nos ensaios BNL houve um acréscimo de s_{nor} quando se incrementa o confinamento, mas aparentemente ao atingir um certo valor de s_2/s_{cs} esta tendência deixa de existir e s_{nor} começa a ser constante ou decresce. Nos modelos CNX existe um acréscimo na resistência à compressão normalizada quando se aumenta o valor de JRC . Os resultados de todos os ensaios biaxiais é mostrado na Tabela 4.17.

A deformação e o módulo de elasticidade dos ensaios biaxiais, estão relacionados com o valor de JRC presente na junta. Assim, para os modelos CNX a deformação tem uma tendência a diminuir quando se aumenta o valor de JRC . Contrariamente, o módulo de elasticidade cresce quando se aumenta o valor de JRC (Tabela 4.17).

Tabela 4.17 – Resumo da resistência à compressão normalizada, deformação e o módulo de elasticidade dos ensaios biaxiais.

Nome	JRC junta	α (°)	Média ($s_1 - s_2$)/ s_{cs}	Média ϵ	Média E (GPa)
ANL	0	132	0,319	0,00692	2,082
BNL	0	90	0,529	0,00660	1,689
CNL	0	54	0,523	0,00571	1,923
CNR	6,7	54	0,540	0,00528	2,094
CNRR	12,3	54	0,593	0,00450	2,185

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

“E quando cheguei à praça do mercado, um garoto trepado no telhado de uma casa gritou: “É um louco!” Olhei para cima, para vê-lo. O sol beijou minha face nua pela primeira vez. Pela primeira vez, o sol beijava minha face nua, e minha alma inflamou-se de amor pelo sol, e não desejei mais minhas máscaras. E, como num transe, gritei: Benditos, benditos os ladrões que roubaram minhas máscaras! Assim me tornei louco...”

O Louco, Gibran Khalil Gibran.

5.1 Modelagem física.

- A argamassa como material de modelagem foi satisfatória. Com este material pode-se controlar as características de heterogeneidade, resistência e forma geométrica desejada, e ao mesmo tempo, permite a colocação de juntas não-persistentes.
- O papel de poliéster de 0,05mm utilizado para criar as juntas funcionou da forma esperada. Este papel tem a propriedade de copiar a rugosidade de uma rocha natural, não somente nele, como também na argamassa. Além disso, é de fácil fixação nas fôrmas de aço bem como, manter sua geometria no processo de enchimento da argamassa. Ainda, o papel de poliéster apresenta a vantagem de ter um baixo custo, de ser de fácil manuseio e não apresentar aderência à argamassa.

- O processo de criação das juntas rugosas apresentou-se repetitivo e confiável, podendo transferir a rugosidade natural de uma rocha à lâmina de poliéster. Neste processo o cuidado que se deve ter é na temperatura das peças de rocha, pois se a temperatura for superior a 100 C° o papel de poliéster se danifica e se for inferior a 75 C° não se conseguia copiar a rugosidade.

5.2 Ensaios de compressão simples e triaxial.

- Os ensaios de compressão simples e triaxial permitiram determinar a resistência e a envoltória não linear da argamassa, aos níveis de confinamento em que os ensaios dos corpos de prova prismáticos estavam submetidos.
- Com o equipamento utilizado para os ensaios de compressão triaxial, somente trabalhou-se em baixos níveis de confinamento. Mostrando que, para estas tensões, o comportamento da argamassa é altamente não linear. A envoltória proposta para esta argamassa utiliza o critério de HOEK *et al.* (2002) tendo as variáveis de $m_b = 23,454$ e $s = 1$.

5.3 Caracterização e quantificação da superfície rugosa.

- A caracterização da superfície rugosa por meio do perfilômetro, apresentou-se como excelente método para esta finalidade. O perfilômetro com ponta arredonda funcionou melhor na rugosidade menor ($JRC=6,7$) e o perfilômetro com ponta afiada na rugosidade com $JRC=12,3$.
- O método visual de estimação do JRC , mesmo sendo um método subjetivo e grandemente influenciado pela experiência da pessoa que estima a medida, nesta pesquisa somente variou em -2 unidades de JRC , quando comparado com o método de cisalhamento com tensão normal variável.
- O método estatístico, foi o método que mais subestimou os valores de JRC . Isso provavelmente está relacionado a susceptibilidade do termo Z_2 quanto ao espaçamento em que é realizada a medida das seções da superfície.
- O ensaio de inclinação mostrou-se inadequado para determinar o JRC para a forma geométrica dos corpos de prova utilizados. Obtendo-se valores de JRC similares para ambas rugosidades, $JRC=5,165$ na primeira rugosidade e $JRC=5,405$ na segunda.

- Comparado com os outros métodos de obtenção do JRC , o métodos de cisalhamento com confinamento variável resultou ser o mais adequado, embora, a rugosidade média apresentou um alto grau de variabilidade.
- Vários métodos têm sido propostos para estimar o valor de JRC , mas de qualquer forma, nenhum deles apresenta suficiente grau de precisão. Isto ocorre em razão da heterogeneidade da rugosidade, que não permite, ainda, ser quantificada por um parâmetro único, mais pesquisa neste sentido deve ser realizada.

5.4 Ensaios de compressão biaxial

5.4.1 Ângulo de início da propagação da fratura (h)

- O ângulo de início da propagação da fratura ($h = \pm 65^\circ$) no caso das juntas lisas, apresenta-se coerente com o valor de $h = 70,5^\circ$ estimado por ERDORGAN & SIH (1963).
- No caso das juntas rugosas existe um decréscimo do ângulo de início da propagação da fratura quando se aumenta o valor do JRC . Desde um valor de $h = \pm 65^\circ$ para as juntas lisas ($JRC=0$), passando por $h = 40^\circ$ no lado esquerdo e $h = 48^\circ$ no lado direito para a junta com $JRC=6,7$; até o valor de $h = 5^\circ$ para o lado esquerdo e $h = 20^\circ$ para o lado direito da junta com $JRC = 12,3$. Este tipo de comportamento deve estar relacionado à dilatação e aumento do atrito na junta no momento de ocorrência da fratura, pois, cria-se um real estado de modo misto de propagação da fratura. Maiores pesquisas neste sentido são sugeridas.
- O ângulo da início da propagação da fratura (h) da mesma junta pode variar entre um lado e outro. Encontrou-se que para a junta com $JRC=0$ este ângulo quase não apresenta diferença entre um lado ou outro, variando somente 1° . Já para as juntas com $JRC=6,7$ esta diferença começa ser perceptível, sendo esta variação de 8° ; e para as juntas com $JRC=12,3$ a variação é evidente, se apresentando de 15° . Este fenômeno está relacionado com a heterogeneidade da superfície da junta, que resulta em valores locais distintos de JRC para as pontas da junta.
- As tensões de confinamento também têm um papel importante no valor inicial do ângulo h . Este ângulo pode ser alterado sem necessidade de modificar

nenhuma variável de distribuição geométrica das juntas, somente mudando o s_2 . Isto aconteceu claramente com os modelos CNX, onde com $s_2=0,7$ MPa o ângulo h foi igual a 0° e, para $s_2=0,2$ MPa o ângulo h passou a ser influenciado pela rugosidade da junta, ou seja, pelo valor de JRC .

5.4.2 Coalescência da fratura

- Para os corpos de prova ANL não foi possível definir o tipo de coalescência pois a fratura ocorreu pelo material intacto.
- No caso dos corpos de prova BNL a coalescência ocorreu entre juntas coplanares, quando o nível de confinamento foi alto ($s_2=0,5; 1,0$ MPa). Quando o nível de confinamento era baixo ($s_2=0,2$ MPa) a coalescência ocorreu entre juntas não coplanares. Sendo que em ambos tipos de coalescência o principal mecanismo de propagação da fratura foi o cisalhamento.
- Para os corpos de prova CNX a coalescência sempre aconteceu de forma escalonada, ou seja, entre juntas não coplanares, excetuando o corpo de prova C1L onde a coalescência aconteceu entre juntas coplanares. A diferença entre o corpo de prova C1L e os demais desta série foi o confinamento, sendo de 0,7 e 0,2 MPa, respectivamente.
- Com os corpos de prova CNL a coalescência ocorreu entre juntas não coplanares e mecanismo de propagação da fratura foi a tração. No caso dos corpos de prova CNR e CNRR os mecanismos envolvidos na coalescência foram a tração e o cisalhamento. Assim, a coalescência está influenciada pelo valor de JRC da junta.
- Com a redução do espaçamento “ d ” segundo AGUIAR (1998), obter-se-ia uma ruptura do tipo escalonada, já para JAMIL (1992) este espaçamento não determina o modo de coalescência. No caso do presente estudo uma combinação de s_2 e d gerou a coalescência do tipo escalonada entre as juntas.

5.4.3 Resistência à compressão normalizada (s_{nor})

- No caso dos modelos BNL existe um acréscimo de s_{nor} quando se incrementa o confinamento, mas aparentemente ao atingir a um certo valor de s_2/s_{cs} esta tendência deixa de existir e s_{nor} começa a ser constante ou decresce (Figura 4.10).

- Nos modelos CNX observou-se que existe um acréscimo na resistência à compressão normalizada quando se aumenta o valor de JRC . Esta tendência é claramente visível na Figura 4.20.
- Na Figura 4.20 observa-se que a ruptura destes corpos de prova tem a parcela de resistência da junta e da ponte rochosa. Como nos ensaios CNX a única variável permitida foi o valor de JRC este incremento da resistência pode ser atribuído a este índice. Neste sentido, maiores pesquisas são recomendadas para poder encontrar algum critério que consiga determinar analiticamente este acréscimo.

5.4.4 Deformação (ϵ) e o Módulo de elasticidade (E).

- Com os ensaios CNX mostrou-se que existe uma relação entre a deformação e o valor da rugosidade da junta (JRC). Esta relação apresenta-se inversa, quando o valor de JRC cresce a deformação no momento da ruptura diminui.
- O módulo de elasticidade nos ensaios CNX cresce quando se aumenta o valor de JRC (Figura 4.21). Esta relação adicionada a o decréscimo de ϵ e ao aumento de s_{nor} indica que os corpos de prova com juntas não-persistentes rugosas, aumentam sua rigidez ao aumentar JRC .

5.5 Recomendações

- Para pesquisas futuras recomenda-se reforçar as fôrmas de aço para evitar o abaulamento dos lados mais compridos dos corpos de prova.
- O tamanho dos corpos de prova pode ser mudado para menores dimensões o que facilitaria sua manipulação.
- Deve-se estudar a possibilidade de empregar o método de criação das juntas rugosas num corpo de prova contendo uma junta não-persistente. Isto permitiria analisar mais variáveis em relação ao *JRC*.
- Percebe-se a importância do estudo da mudança do valor de *JRC* nas juntas de um maciço rochoso. Assim, recomendam-se mais pesquisas com as quais possam-se mudar mais de duas variáveis.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUIAR, C. C. (1998) *Ensaaios Biaxiais em Modelos de Maciços com Fraturamento Não-persistente*. Dissertação de Mestrado. EESC/USP.São Carlos–SP.
- BANDIS, S. C. (1990). *Mechanical properties of rock joints*. Proceeding of the International Symposium of Rock Joints. Loen/Norway 4-6 June. Rock Joints. Edited by Barton, N. & Stephansson, O. p 125-140. Balkema
- BARTON, N (1976). *The Shear Strength of Rock and Rock Joints*. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. V. 13, pp. 255-279. Pergamon.
- BARTON N. & CHOUBEY V. (1977). *The shear strength of rock joints in the theory and practice*. Rock Mechanics & Rock Engineering, V.10, p. 1- 54. Springer-Verlag.
- BORTOLUCCI, A. A. (1993) *Modelo de ruptura em compressão de materiais frágeis baseado na mecânica da fratura e aplicado ao efeito escala*. Tese de Doutorado. EESC/Universidade de São Paulo.São Carlos.

- CHAE, B.G.; ICHIKAWA, Y.; JEONG, G.C.; SEO Y.S. & KIM, B.C. (2004). *Roughness measurement of rock discontinuities using a confocal laser scanning microscope and the Fourier spectral analysis*. Engineering Geology, V.72, pp. 181-199. Elsevier.
- CHEN G., KEMENY J. M. & HARPALANI S. (1992) *Fracture propagation and coalescence in marble plates with pre-cut notches under compression*. Proceeding of the Conference on Fractured and Jointed Rock Masses. Lake Tahoe/ California/ USA / 3-5 June 1992. Fractured and Jointed Rock Masses. Edited by Myer, L. R., Tsang, C. F., Cook N. G. W. & Goodman R. E. 1995 p. 435-439. Balkema
- DEVELI, K.; BABADAGLI, T. & COMLEKCI, C. (2001) *A new computer-controlled surface-scanning device for measurement of fracture surface roughness*. Computers and Geosciences, V.27, pp. 265-277. Pergamon
- ERDOGAN, F. & SIH G. C. (1963) *On the crack extension in plates under plane loading and transverse shear*. Journal of Basic Engineering, December, p. 519-527. ASME
- GAITÁN V.H.; BORTOLUCCI, A.A. & CELESTINO, T.B. (2004). *Fracture propagation in mortar models with rough non-persistent joints*. Eurock 2004. & Geomechanics Colloquium. Edited by Wulf Schubert, p. 521-524. VGE.
- GRASSELLI, G. (2001). *Shear Strength of Rock Joints Based on Quantified Surface Description*. Tese de doutorado. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- GRIFFITH, A. A. (1921) *The phenomena of rupture and flow in solids*. Philosophical Transactions Royal Society, London, Vol A221, p 163-198.
- HAN S. (1992) *Equivalent mechanical effect of joint under wave load*. Proceeding of the Conference on Fractured and Jointed Rock Masses. - Lake Tahoe/ California/ USA / 3-5 June. Fractured and Jointed Rock Masses. Edited by Myer, L. R.; Tsang, C. F.; Cook N. G. W. & Goodman R. E. 1995 p 335- 340.

- HOEK, E. & BROWN, E. T. (1980) *Underground excavations in rock*. The Institute of Mining and Metallurgy, London, p. 527.
- HOEK, E.; CARRANZA-TORRES C. & CORKUM B. (2002). *Hoek & Brown failure criterion*. Disponível em: <<http://www.rocsience.com>>.
- HORII, H. & NEMAT-NASSER, S. (1986) *Brittle failure in compression: Splitting, Faulting and Brittle-Ductile Transition*. Philosophical Transactions Royal Society, London, Vol A319, p 337-374.
- JAMIL, S. M. (1992) *Strength of non-persistent rock joints*. Tese de Doutorado, University of Illinois at Urbana-Champaign.
- KABEYA, K. K. & LEGGE, T. F. H. (1996). *Influence of particle size on the shear behavior of rock joints*. Eurock 96. Predictions and performance in rock mechanics and rock engineering. Edited by Giovanni Barla, p. 151-158. Balkema.
- KANEKO K. & SHIBA T. (1990). *Equivalent volume defect model for estimation of deformation behavior of jointed rock*. Proceeding of the International Conference on Mechanics of Jointed and faulted Rock. Institute of Mechanics/Technical University of Vienna/ Austria /18-20 April. Mechanics of Jointed and faulted Rock. Edited by H. P. Rossmanith . 1990 p.277 - 284. Balkema
- KESHAN, Z.; DONGYAN, L. & JINGWEI F. (1990) *Strength properties of rock mass with bidirectional intermittent cross joints*. Proceeding International Symposium of Rock Joints. Loen/Norway 4-6 June. Rock Joints. Edited by Barton, N. & Stephansson, O. p. 791-795. Balkema
- KULATILAKE, P. H. S. W.; UCPIRTI, H.; WANG S.; RADBERG, G. & STEPHANSSON, O. (1992) *Use of the distinct element method to perform stress analysis in rock with non-*

persistent joints and to study the effect of joint geometry parameters on the strength and deformability of rock masses. Rock Mechanics and Rock Engineering, v.25 (4), p. 253-274. Springer – Verlag .

MUGHIEDA, O. S. (1997) *Failure mechanisms and strength of non-persistent rock joints.* Tese de Doutorado, University of Illinois at Urbana-Champaign.

MAKSIMOVIC M. (1992). *New description of the shear strength for rock joints.* Rock Mechanics and Rock Engineering, v.25 (4), p. 275-284. Springer – Verlag .

PATTON, F. D. (1966). *Multiples Modes of Shear Failure in Rock and Related Material.* Tese de Doutorado, University of Illinois at Urbana.

POLLARD, D. D., SEGALL, P. & DELANEY, P. T. (1982) *Formation and interpretation of dilatant echelon crack.* Geological Society of American Bulletin, v.93, pp. 1291-1303.

SAVILAHTI T.; NORDLUND, E. & STEPHANSSON, O. (1990) *Shear box testing and modeling of joint bridges.* Proceeding International Symposium of Rock Joints. Loen/Norway 4-6 June. Rock Joints. Edited by Barton, N. & Stephansson, O. p. 295-300. Balkema

SCAVIA C. (1990) *Numerical simulation of opening and closing cracks.* Proceeding of the International Conference on Mechanics of Jointed and faulted Rock. Institute of Mechanics/Technical University of Vienna/ Austria /18-20 April. Mechanics of Jointed and faulted Rock. Edited by H. P. Rossmanith . 1990 p.537 - 541. Balkema

SCAVIA, C. & CASTELLI, M. (1996) *Analysis of the propagation of natural discontinuities in rock bridges.* Eurock 96. Predictions and performance in rock mechanics and rock engineering. Edited by Giovanni Barla, p. 445-451. Balkema.

- SHEN, B. (1995) *The mechanism of fracture coalescence in compression, experimental study and numerical simulation*. Engineering Fractures Mechanics, V.51, p. 73-85. Pergamon.
- SHEN, B & STEPHANSSON, O. (1990) *Cyclic loading characteristics of joint and rock bridges in a jointed rock specimen*. Proceeding International Symposium of Rock Joints. Loen/Norway 4-6 June. Rock Joints. Edited by Barton, N. & Stephansson, O. p. 725-729. Balkema
- SHEN, B & STEPHANSSON, O. (1992) *Deformation and propagation of finite points in rock masses*. Proceeding of the Conference on Fractured and Jointed Rock Masses. Lake Tahoe/ California/ USA / 3-5 June. Fractured and Jointed Rock Masses. Edited by Myer, L. R.; Tsang, C. F.; Cook N. G. W. & Goodman R. E. 1995 p. 303-309. Balkema
- SHEOREY, P.R. (1990) *Empirical Failure criteria*. pp. 176. Balkema
- SUNG-OONG, C. (2000) *A numerical Study of Hydraulic Fractures Propagation with Rock Bridges*. Tunnel & Underground, J. of Korean Society for Rock Mechanics. V. 10, pp. 447-456.
- SWOBODA, G.; STUMVOLL, M. & BEICHUAN H. (1990) *Damage tensor theory and its application to tunneling*. Proceeding of the International Conference on Mechanics of Jointed and faulted Rock. Institute of Mechanics/Technical University of Vienna/ Austria /18-20 April. Mechanics of Jointed and faulted Rock. Edited by H. P. Rossmanith . 1990 p.51 - 58. Balkema
- TANG, C. A. (1997) *Numerical simulation of progressive rock failure and associated seismicity*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, V.34, (2), p. 249 – 261. Pergamon.

- TANG, C. A. & KOU, S. Q. (1998) *Crack propagation and coalescence in brittle materials under compression*. Engineering Fractures Mechanics, V.61, p. 311-324. Pergamon.
- TSE, R. & CRUDEN (1979). *Estimating joint roughness coefficients*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanical Abstracts, V.16, p.303–307. Pergamon.
- TSIDZI K. E. N. (1990) *Compressive strength anisotropy of foliated rock*. Proceeding of the International Conference on Mechanics of Jointed and faulted Rock. Institute of Mechanics/Technical University of Vienna/ Austria /18-20 April. Mechanics of Jointed and faulted Rock. Edited by H. P. Rossmanith . 1990 p.421 - 428. Balkema
- WAKABAYASHI N. & FUKUSHIGE I. (1992) *Experimental study on the relation between fractal dimension and shear strength*. Proceeding of the Conference on Fractured and Jointed Rock Masses. Lake Tahoe/ California/ USA / 3-5 June. Fractured and Jointed Rock Masses. Edited by Myer, L. R., Tsang, C. F., Cook N. G. W. & Goodman R. E. 1995 p. 119-124. Balkema.
- WANG, C. (1998) *Mecânica da fratura aplicada à resistência ao cisalhamento de maciços rochosos com juntas não-persistentes*. Relatório de projeto de pesquisa. Departamento de Geotecnia/ EESC/ Universidade de São Paulo, Brasil. (Processo No. 301361/95-6)
- WONG, R. H. C., & CHAU, K. T. (1998) *Crack coalescence in a rock like material containing two cracks*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, V.35, (2), p. 147 – 164. Pergamon
- WONG, R. H. C.; LIN, P.; TANG, C. A. & CHAU, K. T. (2002) *Creeping damage around an opening in rock-like material containing non-persistent joints*. Engineering Fractures Mechanics, V.69, p. 2015-2027. Pergamon.

- WONG R. H. C.; TANG C. A.; CHAU K. T. & LIN P. (2002,b) *Splitting failure in brittle rocks containing pre-existing flaws under uniaxial compression*. Engineering Fractures Mechanics, V.69, p. 1853-1871. Pergamon.
- WU F.-Q. & WANG S. J. (2001) *A stress strain relation for jointed rock masses*. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. v. 38 (2001), nota tecnica p. 591. – 598. Pergamon.
- YU, X. & VAYSSADE, B. (1990) *Joint profiles and their roughness parameters*. Proceeding International Symposium of Rock Joints. Loen/Norway 4-6 June. Rock Joints. Edited by Barton, N. & Stephansson, O. p. 781-785. Balkema.

APÊNDICE

Contém as curvas de tensão-deformação dos ensaios biaxiais, o procedimento para determinar S_1 e S_2 a partir da envoltória de BARTON (1976) e as curvas relacionando o valor da deformação com o JRC .

APÊNDICE A. Curvas de Tensão x Deformação dos ensaios biaxiais.

Figura A.1 –Curva Tensão x Deformação A1L

Figura A.2 – Curva Tensão x Deformação A2L

Figura A.3 – Curva Tensão x Deformação A3L

Curva Tensão x Deformação A4L

Figura A4 – Curva Tensão x Deformação A4L

Figura A.5 – Curva Tensão x Deformação B1L

Figura A.6 – Curva Tensão x Deformação B3L

Figura A.7 – Curva Tensão x Deformação B4L

Figura A.8 – Curva Tensão x Deformação B5L

Figura A.9 – Curva Tensão x Deformação B6L

Curva Tensão x Deformação C1L

Figura A.10– Curva de Tensão x Deformação C1L

Figura A.11 – Curva Tensão x Deformação C2L

Curva Tensão x Deformação C3L

Figura A.12 – Curva Tensão x Deformação C3L

Curva Tensão x Deformação C4L

Figura A.13 – Curva Tensão x Deformação C4L

Curva Tensão x Deformação C1R

Figura A.14– Curva Tensão x Deformação C1R

Figura A.15– Curva Tensão x Deformação C2R

Figura A.16 – Curva Tensão x Deformação C3R

Figura A.17 – Curva Tensão x Deformação C4R

Curva Tensão x Deformação C1RR

Figura A.18 – Curva Tensão x Deformação C1RR

Figura A.19 – Curva Tensão x Deformação C2RR

Curva Tensão x Deformação C3RR

Figura A.20 – Curva Tensão x Deformação C3RR

Curva Tensão x Deformação C4RR

Figura A.21 – Curva Tensão x Deformação C4RR

APÊNDICE B. Procedimento para determinar as tensões principais a partir da equação de BARTON (1976).

O procedimento utilizado para transformar as tensões de cisalhamento (t) e de compressão normal (s_n) na junta é um processo geométrico. Este procedimento, utiliza a envoltória gerada a partir da Equação 4.6 (Figura B.1) e por meio das relações geométricas descritas pelas Equações B.1 e B.2, se determinam as tensões principais (s_1 e s_2) relativas a uma coordenada (s_n ; t).

$$s_2 = s_n - \frac{t}{\tan(b)} \quad (B.1)$$

$$s_1 = \frac{\sqrt{t^2 + (s_n - s_2)^2}}{\cos(b)} + s_2 \quad (B.2)$$

Figura B.1 – Relação das tensões principais com a equação de BARTON (1976)

APÊNDICE C. Curvas de deformação e do trabalho em relação ao *JRC*.

Curva Deformação x *JRC*
modelos CNX

Figura C.1 – Relação da deformação com o *JRC*. Modelos CNX