



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

YAGO MACHADO PEREIRA DE MATOS

DESENVOLVIMENTO DE MODELOS DE PREVISÃO DO COMPORTAMENTO
CISALHANTE EM DESCONTINUIDADES SEM PREENCHIMENTO DE MACIÇOS
ROCHOSOS UTILIZANDO TÉCNICAS FUZZY E NEURO-FUZZY

FORTALEZA

2018

YAGO MACHADO PEREIRA DE MATOS

DESENVOLVIMENTO DE MODELOS DE PREVISÃO DO COMPORTAMENTO
CISALHANTE EM DESCONTINUIDADES SEM PREENCHIMENTO DE MACIÇOS
ROCHOSOS UTILIZANDO TÉCNICAS FUZZY E NEURO-FUZZY

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Geotecnia.

Orientador: Prof. Dr. Silvrano Adonias Dantas Neto.

Coorientador: Prof. Dr. Guilherme de Alencar Barreto.

FORTALEZA

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- M382d Matos, Yago Machado Pereira de.
Desenvolvimento de Modelos de Previsão do Comportamento Cisalhante em Descontinuidades Sem Preenchimento de Maciços Rochosos Utilizando Técnicas Fuzzy e Neuro-Fuzzy / Yago Machado Pereira de Matos. – 2018.
212 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Geotecnia, Fortaleza, 2018.
Orientação: Prof. Dr. Silvrano Adonias Dantas Neto.
Coorientação: Prof. Dr. Guilherme de Alencar Barreto.
1. Descontinuidades Sem Preenchimento. 2. Resistência ao Cisalhamento. 3. Dilatância. 4. Lógica Fuzzy. 5. Neuro-Fuzzy. I. Título.

CDD.624.15

YAGO MACHADO PEREIRA DE MATOS

DESENVOLVIMENTO DE MODELOS DE PREVISÃO DO COMPORTAMENTO
CISALHANTE EM DESCONTINUIDADES SEM PREENCHIMENTO DE MACIÇOS
ROCHOSOS UTILIZANDO TÉCNICAS FUZZY E NEURO-FUZZY

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Geotecnia.

Aprovada em: 27 / 02 / 2018.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Silvrano Adonias Dantas Neto (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Guilherme de Alencar Barreto (Coorientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Francisco Chagas da Silva Filho (Examinador Interno)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. André Pacheco de Assis (Examinador Externo)
Universidade de Brasília (UnB)

AGRADECIMENTOS

Agradeço, inicialmente, a Deus, sem ele nada é possível. A Ele devo tudo que sou e que tenho hoje, inclusive as notáveis pessoas que foram colocadas em minha vida.

Aos meus pais, Thales Veras e Virgínia Machado, os quais tenho como exemplo, pela dedicação cedida e por sempre terem proporcionado a mim as melhores oportunidades possíveis ao longo de minha vida. Saibam que tudo o que concretizo em minha carreira é motivado em trazer orgulho a vocês.

Aos meus irmãos, Thales Filho e Viviane Machado, por estarem sempre torcendo pelo meu sucesso, pelo companheirismo e pelos momentos inesquecíveis vivenciados em família.

À minha namorada, Nise Arruda, por tanto carinho, companheirismo, amizade e amor. Agradeço por estar sempre ao meu lado, ajudando a resolver todos os meus problemas, dando-me confiança para enfrentá-los e vencê-los.

Aos amigos de infância que sempre estiveram presentes em minha vida, pessoas de enorme valor, que compreenderam a minha ausência durante o período em que esse trabalho foi realizado.

Ao antigo parceiro de pesquisa, Fernando Monteiro, amigo que tive a imensa felicidade de conhecer durante o desenvolvimento de artigos e que, certamente, carregarei por toda vida.

Aos amigos que conquistei no mestrado pelo apoio, convívio e amizade.

A todos os admiráveis docentes do mestrado representados pelos professores Alfran Sampaio, Francisco Chagas, Anderson Borghetti e Adriano Frutuoso. Meus sinceros agradecimentos pela grande contribuição em minha formação.

Aos professores André Pacheco de Assis e Francisco Chagas agradeço pela gentileza de avaliarem este trabalho, contribuindo com suas valiosas considerações.

Agradeço, especialmente, aos professores Silvrano e Guilherme, os quais tive a honra de poder receber orientações sempre seguras e oportunas. Ao professor Silvrano agradeço pelas excelentes aulas ministradas, pelos grandes aprendizados proporcionados, pela incansável vontade de ajudar, pela dedicação e pelo incentivo. Ao professor Guilherme agradeço pela paciência, pelos ensinamentos concedidos e pela confiança depositada.

Por fim, gostaria de agradecer à Universidade Federal do Ceará por conceder a licença do *software* MATLAB e à Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico pelo apoio financeiro com a manutenção da bolsa de auxílio.

“All models are wrong, but some are useful. ”

George Edward Pelham Box

RESUMO

Um dos principais problemas envolvendo a análise e o dimensionamento de estruturas geotécnicas em rocha é a correta previsão do comportamento dos maciços rochosos. Isso se deve porque, normalmente, os maciços rochosos consistem em uma matriz intertravada de blocos discretos de rocha com diferentes graus de intemperismo e descontinuidades que podem se encontrar limpas ou preenchidas com algum tipo de material. Por isso, o desenvolvimento de modelos precisos e confiáveis para previsão da resistência das rochas e dos maciços rochosos é um dos interesses mais comuns entre os profissionais da engenharia e da geologia. Diversos estudos têm mostrado que o comportamento mecânico dos maciços rochosos está diretamente ligado ao comportamento cisalhante das suas descontinuidades. De uma forma geral, observa-se que o comportamento cisalhante das descontinuidades rochosas sem preenchimento é influenciado pelas suas condições de contorno (CNL e CNS), pelas características de rugosidade das descontinuidades, e pelas propriedades da rocha intacta. Estudos têm sido conduzidos, e um certo número de modelos analíticos que podem ser utilizados para a previsão do comportamento cisalhante das descontinuidades rochosas sem preenchimento tem sido desenvolvido. Entretanto, todos eles apresentam um caráter puramente determinístico, uma vez que as suas variáveis de entrada são definidas sem levar em consideração as incertezas inerentes ao processo de formação do maciço rochoso e da própria descontinuidade. Assim sendo, este trabalho tem por objetivo apresentar modelos de previsão da resistência ao cisalhamento e da dilatância em descontinuidades rochosas sem preenchimento que levem em consideração as incertezas nos valores das variáveis que governam o seu comportamento cisalhante utilizando controladores fuzzy e neuro-fuzzy. Para o desenvolvimento dos modelos, foram utilizados resultados de 44 ensaios de cisalhamento direto realizados em diferentes tipos de descontinuidades e condições de contorno. As variáveis de entrada dos modelos são a rigidez normal e a tensão normal inicial atuantes na descontinuidade, a sua rugosidade expressa pelo JRC, a resistência à compressão simples e o ângulo de atrito básico da rocha intacta, além do descolamento cisalhante imposto na descontinuidade sem preenchimento. Os resultados revelaram que, de uma maneira geral, os modelos fuzzy e neuro-fuzzy propostos apresentaram previsões satisfatórias do comportamento cisalhante de descontinuidades sem preenchimento.

Palavras-chave: Descontinuidades sem preenchimento. Resistência ao cisalhamento. Dilatância. Lógica fuzzy. Neuro-fuzzy.

ABSTRACT

One of the main problems involving the analysis and the design of geotechnical structures in rock is the correct prediction of the behavior of the rock masses. This is because rock masses usually consist of an interlocking matrix of discrete blocks with different degrees of weathering and discontinuities that may be clean or filled with some type of material. Therefore, the development of accurate and reliable models for predicting the strength of rocks and rock masses is one of the most common interests among engineers and geologists. Several studies have shown that the mechanical behavior of rock masses is directly related to the shear behavior of its discontinuities. In general, the shear behavior of unfilled rock joints is influenced by their boundary conditions (CNL and CNS), the roughness characteristics of the joints, and the properties of the intact rock. Studies have been conducted, and a number of analytical models that can be used to predict the shear behavior of unfilled rock joints have been developed. However, all of them present a purely deterministic nature, since their input variables are defined without taking into consideration the uncertainties inherent to the formation process of a rock mass and to the discontinuity itself. Therefore, the aim of this work is to present models to predict the shear strength and the dilation in unfilled rock joints that takes into account the uncertainties in the values of the variables that govern its shear behavior, using fuzzy and neuro-fuzzy controllers. To develop the models, the results of 44 direct shear tests performed on different types of joints and under different boundary conditions were used. The models input variables were the normal stiffness and initial normal stress acting on the joint, its roughness (expressed by the JRC), the simple compression strength and the basic friction angle of the intact rock, in addition to the shear displacement imposed to the unfilled joint. The results showed that, in general, the proposed fuzzy and neuro-fuzzy models presented satisfactory predictions of the shear behavior of unfilled rock joints.

Keywords: Unfilled rock joints. Shear strength. Dilation. Fuzzy logic. Neuro-fuzzy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Perfis típicos de rugosidade e valores correspondentes de JRC	24
Figura 2.2 – Influência da rugosidade no comportamento cisalhante de descontinuidades: (a) Resistência ao cisalhamento e (b) Dilatância	25
Figura 2.3 – Analogia do comportamento de uma descontinuidade para escavação subterrânea em maciço rochoso fraturado.....	27
Figura 2.4 – Influência da rigidez normal externa no comportamento cisalhante de descontinuidades segundo Skinas et al. (1990)	28
Figura 2.5 – Influência da rigidez normal externa no comportamento cisalhante de descontinuidades conforme Indraratna e Haque (2000)	29
Figura 2.6 – Efeito da tensão normal inicial na: (a) Resistência ao cisalhamento e (b) Dilatância	30
Figura 2.7 – Influência da tensão normal inicial no comportamento cisalhante de descontinuidades.....	31
Figura 2.8 – Influência da resistência à compressão da rocha no comportamento cisalhante de descontinuidades: (a) Ásperas e onduladas, (b) Lisas e onduladas e (c) Lisas e quase planas	34
Figura 2.9 – Modelo de plastificação contínua da descontinuidade.....	38
Figura 2.10 – Modelo adimensional para previsão da resistência ao cisalhamento	42
Figura 2.11 – Arquitetura do modelo neuronal para previsão de τ_h e δ_v	45
Figura 3.1 – Exemplos de funções de pertinência	49
Figura 3.2 – Diferença entre a Lógica Clássica bivalente e a Lógica Fuzzy multivalente.....	50
Figura 3.3 – Diferença entre Teoria das Probabilidades e Lógica Fuzzy	51
Figura 3.4 – Exemplo de regra de inferência utilizando números fuzzy	52
Figura 3.5 – Configuração de um controlador fuzzy	54
Figura 3.6 – Resumo do funcionamento do controlador fuzzy tipo Mamdani.....	56
Figura 3.7 – Funções de pertinência das variáveis de entrada do modelo Mamdani	60
Figura 3.8 – Funções de pertinência das variáveis de saída do modelo Mamdani.....	62
Figura 3.9 – Pontos de intersecção estabelecidos entre as funções de pertinência adjacentes de k_n para construção de suas regras de inferência fuzzy	63
Figura 3.10 – Modelo Mamdani: comparação da influência de k_n para $\sigma_{no} = 1,63$ MPa, $JRC = 4$, $\sigma_c = 12$ MPa e $\phi_b = 37,5$ graus.....	64
Figura 3.11 – Modelo Mamdani: comparação da influência de σ_{no} para $k_n = 0$ kPa/mm, $JRC = 4$, $\sigma_c = 12$ MPa e $\phi_b = 37,5$ graus.....	65
Figura 3.12 – Modelo Mamdani: comparação da influência de JRC para $k_n = 453$ kPa/mm, $\sigma_{no} = 1,63$ MPa, $\sigma_c = 20$ e 12 MPa e $\phi_b = 32$ e $37,5$ graus	66
Figura 3.13 – Modelo Mamdani: comparação da influência de σ_c e ϕ_b para $k_n = 453$ kPa/mm,	

$\sigma_{no} = 1,63$ MPa, JRC = 4 e 2	66
Figura 3.14 – Determinação dos limites de τ_h e δ_v pelos métodos do menor dos máximos (SOM) e do maior dos máximos (LOM) para $k_n = 0$ kPa/mm, $\sigma_{no} = 1,63$ MPa, JRC = 4 e $\sigma_c = 12$ e $\phi_b = 37,5$ graus	68
Figura 3.15 – Determinação dos limites de τ_h e δ_v pelos métodos do menor dos máximos (SOM) e do maior dos máximos (LOM) para $k_n = 453$ kPa/mm, $\sigma_{no} = 1,63$ MPa, JRC = 2 e $\sigma_c = 20$ e $\phi_b = 32$ graus	69
Figura 3.16 – Determinação dos limites de τ_h e δ_v utilizando o maior entre os menores dos máximos e o menor entre os maiores dos máximos para $k_n = 0$ kPa/mm, $\sigma_{no} = 1,63$ MPa, JRC = 4 e $\sigma_c = 12$ e $\phi_b = 37,5$ graus	70
Figura 3.17 – Determinação dos limites de τ_h e δ_v utilizando o maior entre os menores dos máximos e o menor entre os maiores dos máximos para $k_n = 453$ kPa/mm, $\sigma_{no} = 1,63$ MPa, JRC = 2 e $\sigma_c = 20$ e $\phi_b = 32$ graus	71
Figura 3.18 – Análise de sensibilidade da influência de k_n para $\sigma_{no} = 0,05$ MPa, JRC = 2, $\sigma_c = 3,5$ MPa e $\phi_b = 30$ graus	73
Figura 3.19 – Análise de sensibilidade da influência de σ_{no} para $k_n = 0$ kPa/mm, JRC = 2, $\sigma_c = 3,5$ MPa e $\phi_b = 30$ graus	73
Figura 3.20 – Análise de sensibilidade da influência de JRC para $k_n = 0$ kPa/mm, $\sigma_{no} = 0,05$ MPa, $\sigma_c = 3,5$ MPa e $\phi_b = 30$ graus	74
Figura 3.21 – Análise de sensibilidade da influência de σ_c para $k_n = 0$ kPa/mm, $\sigma_{no} = 0,05$ MPa, JRC = 2 e $\phi_b = 30$ graus	75
Figura 3.22 – Análise de sensibilidade da influência de ϕ_b para $k_n = 0$ kPa/mm, $\sigma_{no} = 0,05$ MPa, JRC = 2 e $\sigma_c = 3,5$ MPa	75
Figura 3.23 – Análise de sensibilidade da influência do tipo de função de pertinência em valores previstos de τ_h e δ_v para $k_n = 0$ e 453 kPa/mm, $\sigma_{no} = 1,63$ MPa, JRC = 4, $\sigma_c = 12$ MPa e $\phi_b = 37,5$ graus.....	77
Figura 3.24 – Análise de sensibilidade da influência do tipo de função de pertinência em valores previstos de τ_h e δ_v para $k_n = 0$ kPa/mm, $\sigma_{no} = 0,16$ e 2,43 MPa, JRC = 4, $\sigma_c = 12$ MPa e $\phi_b = 37,5$ graus.....	77
Figura 3.25 – Análise de sensibilidade da influência do tipo de função de pertinência em valores previstos de τ_h e δ_v para $k_n = 453$ kPa/mm, $\sigma_{no} = 1,63$ MPa, JRC = 2 e 13, $\sigma_c = 20$ e 12 MPa e $\phi_b = 32$ e 37,5 graus	78
Figura 3.26 – Análise de sensibilidade da influência do tipo de função de pertinência em valores previstos de τ_h e δ_v para $k_n = 453$ kPa/mm, $\sigma_{no} = 1,63$ MPa, JRC = 4 e 2, $\sigma_c = 12$ e 20 MPa e $\phi_b = 37,5$ e 32 graus	79
Figura 3.27 – Desvios do modelo fuzzy tipo Mamdani	80
Figura 3.28 – Correlação entre τ_h medido e calculado pelo modelo fuzzy tipo Mamdani.....	81
Figura 4.1 – Resumo do funcionamento do controlador fuzzy tipo Takagi-Sugeno	85
Figura 4.2 – Modelo Takagi-Sugeno ordem zero: comparação da influência de k_n para $\sigma_{no} = 1,63$ MPa, JRC = 4, $\sigma_c = 12$ MPa e $\phi_b = 37,5$ graus.....	88

Figura 4.3 – Modelo Takagi-Sugeno ordem zero: comparação da influência de σ_{no} para $k_n = 0$ kPa/mm, JRC = 4, $\sigma_c = 12$ MPa e $\phi_b = 37,5$ graus	88
Figura 4.4 – Modelo Takagi-Sugeno ordem zero: comparação da influência de JRC para $k_n = 453$ kPa/mm, $\sigma_{no} = 1,63$ MPa, $\sigma_c = 20$ e 12 MPa e $\phi_b = 32$ e $37,5$ graus	89
Figura 4.5 – Modelo Takagi-Sugeno ordem zero: comparação da influência de σ_c e ϕ_b para $k_n = 453$ kPa/mm, $\sigma_{no} = 1,63$ MPa, JRC = 4 e 2	89
Figura 4.6 – Modelo Takagi-Sugeno ordem um: comparação da influência de k_n para $\sigma_{no} = 1,63$ MPa, JRC = 4, $\sigma_c = 12$ MPa e $\phi_b = 37,5$ graus	90
Figura 4.7 – Modelo Takagi-Sugeno ordem um: comparação da influência de σ_{no} para $k_n = 0$ kPa/mm, JRC = 4, $\sigma_c = 12$ MPa e $\phi_b = 37,5$ graus	90
Figura 4.8 – Modelo Takagi-Sugeno ordem um: comparação da influência de JRC para $k_n = 453$ kPa/mm, $\sigma_{no} = 1,63$ MPa, $\sigma_c = 20$ e 12 MPa e $\phi_b = 32$ e $37,5$ graus	91
Figura 4.9 – Modelo Takagi-Sugeno ordem um: comparação da influência de σ_c e ϕ_b para $k_n = 453$ kPa/mm, $\sigma_{no} = 1,63$ MPa, JRC = 4 e 2.....	91
Figura 4.10 – Desvios do modelo fuzzy tipo Takagi-Sugeno de ordem zero.....	92
Figura 4.11 – Desvios do modelo fuzzy tipo Takagi-Sugeno de ordem um.....	92
Figura 4.12 – Correlação entre τ_h medido e calculado pelo modelo fuzzy tipo Takagi-Sugeno de ordem zero.....	93
Figura 4.13 – Correlação entre τ_h medido e calculado pelo modelo fuzzy tipo Takagi-Sugeno de ordem um	94
Figura 4.14 – Comparação entre previsões dos modelos fuzzy e dados experimentais.....	94
Figura 5.1 – ANFIS: (a) Esquema de funcionamento do controlador fuzzy Takagi-Sugeno e (b) Arquitetura da rede adaptativa equivalente (ANFIS tipo Takagi-Sugeno).....	100
Figura 5.2 – Funções de pertinência das variáveis de entrada do modelo ANFIS	106
Figura 5.3 – Modelo ANFIS: comparação da influência de k_n para $\sigma_{no} = 1,63$ MPa, JRC = 4, $\sigma_c = 12$ MPa e $\phi_b = 37,5$ graus	108
Figura 5.4 – Modelo ANFIS: comparação da influência de σ_{no} para $k_n = 0$ kPa/mm, JRC = 4, $\sigma_c = 12$ MPa e $\phi_b = 37,5$ graus	108
Figura 5.5 – Modelo ANFIS: comparação da influência de JRC entre valores observados e previstos de τ_h para $k_n = 453$ kPa/mm, $\sigma_{no} = 1,63$ MPa, $\sigma_c = 20$ e 12 MPa e $\phi_b = 32$ e $37,5$ graus	109
Figura 5.6 – Modelo ANFIS: comparação da influência de σ_c e ϕ_b para $k_n = 453$ kPa/mm, $\sigma_{no} = 1,63$ MPa, JRC = 4 e 2.....	109
Figura 5.7 – Desvios do modelo neuro-fuzzy tipo ANFIS	110
Figura 5.8 – Verificação do desempenho do ANFIS na previsão de $\square h$ e $\square v$ para as descontinuidades em rochas muito brandas dos ensaios de Papaliangas et al. (1993).....	111
Figura 5.9 – Correlação entre τ_h medido e calculado pelo modelo neuro-fuzzy tipo ANFIS	112
Figura 5.10 – Comparação entre dados experimentais e previsões dos modelos fuzzy e neuro-	

fuzzy.....	112
Figura 6.1 – Configuração geral para problemas de análise de estabilidade de taludes rochosos	116
Figura 6.2 – Fatores de segurança para o talude 1 em rocha branda definido com propriedades e condições de contorno dos ensaios de Indraratna e Haque (2000)	119
Figura 6.3 – Fatores de segurança para o talude 2 em rocha resistente definido com propriedades e condições de contorno dos ensaios de Skinas et al. (1990).....	120
Figura 6.4 – Fatores de segurança para o talude 3 com propriedades e condições de contorno definidas de acordo com Dantas Neto et al. (2017).....	121

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Contribuição de cada variável de entrada com os valores de τ_h e δ_v	46
Tabela 3.1 – Parâmetros das funções de pertinência do modelo Mamdani.....	60
Tabela 5.1 – Desvios absolutos médios obtidos por cada sistema de inferência fuzzy em relação aos dados de validação	105
Tabela 6.1 – Dados das descontinuidades, dos taludes e dos tirantes para as análises de estabilidade	118

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	16
1.1	Motivação da pesquisa.....	16
1.2	Objetivos.....	17
1.3	Metodologia.....	18
1.4	Escopo do trabalho.....	19
2	COMPORTAMENTO DAS DESCONTINUIDADES EM MACIÇOS ROCHOSOS..	21
2.1	Introdução.....	21
2.2	Rugosidade das descontinuidades.....	22
2.3	Rigidez normal do maciço circundante.....	26
2.4	Tensão normal inicial.....	29
2.5	Preenchimento das descontinuidades.....	31
2.6	Resistência à compressão simples da rocha intacta.....	32
2.7	Modelos para previsão do comportamento mecânico de descontinuidades sem preenchimento de maciços rochosos.....	35
2.7.1	<i>Patton (1966)</i>	36
2.7.2	<i>Skinas et al. (1990)</i>	36
2.7.3	<i>Barton e Choubey (1977)</i>	37
2.7.4	<i>Modelo de plastificação contínua da descontinuidade de Cundall e Hart (1984)</i>	38
2.7.5	<i>Barton e Bandis (1990)</i>	41
2.7.6	<i>Indraratna e Haque (2000)</i>	43
2.7.7	<i>Dantas Neto et al. (2017)</i>	44
3	MODELO FUZZY TIPO MAMDANI PARA PREVISÃO DO COMPORTAMENTO CISALHANTE DE DESCONTINUIDADES SEM PREENCHIMENTO EM MACIÇOS ROCHOSOS.....	47
3.1	Introdução.....	47
3.2	Lógica Fuzzy.....	48
3.2.1	<i>Regras de inferência fuzzy</i>	52
3.2.2	<i>Controladores fuzzy</i>	53
3.3	Controlador fuzzy tipo Mamdani.....	55
3.4	Metodologia empregada no desenvolvimento do modelo fuzzy Mamdani.....	58
3.5	Apresentação e discussão dos resultados.....	64
3.5.1	<i>Apresentação do modelo Mamdani</i>	64
3.5.2	<i>Avaliação de intervalos de previsão para τ_h e δ_v</i>	67
3.5.3	<i>Análises de sensibilidade do modelo Mamdani</i>	72
3.5.4	<i>Avaliação do desempenho do modelo Mamdani</i>	79
3.6	Conclusões parciais.....	81
4	MODELO FUZZY TIPO TAKAGI-SUGENO PARA PREVISÃO DO COMPORTAMENTO CISALHANTE DE DESCONTINUIDADES SEM PREENCHIMENTO EM MACIÇOS ROCHOSOS.....	84
4.1	Controlador fuzzy tipo Takagi-Sugeno.....	84
4.2	Metodologia empregada no desenvolvimento do modelo fuzzy Takagi-Sugeno.....	86

4.3	Apresentação e discussão dos resultados.....	87
4.4	Conclusões parciais.....	95
5	MODELO NEURO-FUZZY PARA PREVISÃO DO COMPORTAMENTO CISALHANTE DE DESCONTINUIDADES SEM PREENCHIMENTO EM MACIÇOS ROCHOSOS.....	98
5.1	Controlador neuro-fuzzy.....	98
5.2	Sistema neuro-fuzzy do tipo ANFIS.....	99
5.3	Metodologia empregada no desenvolvimento do modelo neuro-fuzzy ANFIS.....	103
5.4	Apresentação e discussão dos resultados.....	105
5.5	Conclusões parciais.....	113
6	APLICAÇÃO PRÁTICA DOS MODELOS EM ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDE ROCHOSO.....	115
6.1	Definição do problema.....	115
6.2	Apresentação e discussão dos resultados.....	117
7	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	123
7.1	Conclusões.....	123
7.2	Sugestões para pesquisas futuras.....	127
	REFERÊNCIAS.....	129
	APÊNDICE A.....	135
	APÊNDICE B.....	142
	APÊNDICE C.....	172
	APÊNDICE D.....	204

1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo, serão apresentadas a motivação da pesquisa, a descrição dos objetivos gerais e específicos da pesquisa, a metodologia empregada e a organização da dissertação.

1.1 Motivação da pesquisa

Um dos principais problemas envolvendo a análise e o dimensionamento de estruturas geotécnicas em rocha é a correta previsão do comportamento dos maciços rochosos.

Segundo Oliveira e Indraratna (2010), isso se deve porque, normalmente, os maciços rochosos consistem em uma matriz intertravada de blocos discretos de rocha com diferentes graus de intemperismo e descontinuidades que podem se encontrar limpas ou preenchidas com algum tipo de material.

Por isso, o desenvolvimento de modelos precisos e confiáveis para previsão da resistência das rochas e dos maciços rochosos é um dos interesses mais comuns entre os profissionais da engenharia e da geologia.

No entanto, a quebra de continuidade mecânica provocada pelas descontinuidades, além de fazer com que a resistência do maciço fraturado seja muito inferior à resistência da rocha intacta, prejudica a aplicação da Teoria da Mecânica dos Meios Contínuos, dificultando, assim, a modelagem do comportamento desses maciços anisotrópicos para projetos de estruturas geotécnicas em rocha.

Sabendo que a presença das descontinuidades em maciços rochosos com certo grau de fraturamento pode interferir, significativamente, no seu comportamento mecânico, diversos modelos analíticos foram desenvolvidos com o propósito de descrever a resposta das descontinuidades das rochas durante o processo de cisalhamento, Barton e Choubey (1977), Cundall e Hart (1984), Barton e Bandis (1990) e Indraratna e Haque (2000) são alguns deles.

Apesar do bom desempenho de alguns desses modelos para a previsão do comportamento cisalhante das descontinuidades rochosas sem preenchimento, observa-se que as respostas fornecidas por todos eles não levam em consideração as incertezas e as variações nos valores dos seus parâmetros de entrada ao longo de uma certa descontinuidade que existem devido ao processo de formação do maciço e da própria descontinuidade.

Desse modo, além da natureza complexa dos materiais geológicos, as incertezas e as dificuldades na avaliação de seus parâmetros tornam a determinação da resistência das descontinuidades uma tarefa difícil.

Isso se deve, porque a obtenção desses parâmetros envolve dois dos principais aspectos de imperfeição da informação, a imprecisão e a incerteza. Contudo, o tratamento de informações imprecisas e incertas pode ser feito pela Lógica Fuzzy, recurso que, segundo Ganoulis (1994) é, especialmente, útil quando o número de dados disponíveis não é suficiente para caracterizar a incerteza por meio da Teoria das Probabilidades.

Portanto, a utilização de metodologias fundamentadas na Lógica Fuzzy, como os controladores fuzzy e neuro-fuzzy que permitem considerar as incertezas envolvidas nos parâmetros, demonstra ter amplo potencial para aplicação em problemas relacionados com a Mecânica das Rochas, já que a realização de muitos ensaios de laboratório pode ser, em alguns casos, um trabalho difícil que exige equipamentos de grande porte com processos de amostragem complicados e com capacidade de representação das condições reais de contorno limitada.

Além disso, a modelagem por controladores fuzzy e neuro-fuzzy é recomendada para problemas que envolvem sistemas reais complexos, condição que, de acordo com Grima (2000), é característica própria de maciços rochosos e que, por esse motivo, raramente, possuem soluções exatas em virtude das incertezas existentes em seus parâmetros.

Diversas pesquisas relacionadas com a aplicação de controladores fuzzy e neuro-fuzzy em Mecânica das Rochas foram desenvolvidas, Grima e Babusika (1999), Gokceoglu (2002), Kayabasi et al. (2003), Nefeslioglu et al. (2003), Sonmez et al. (2003), Gokceoglu e Zorlu (2004), Sonmez et al. (2004), Daftaribesheli et al. (2011), Monjezi e Rezaei (2011), Akgun et al. (2012), Asadi (2016), Sari (2016), Grima et al. (2000), Gokceoglu et al. (2004), Singh e Singh (2006), Noorani et al. (2010), Jalalifar et al. (2011), Singh et al. (2012) e Yesiloglu-Gultekin et al. (2013). Entretanto, nenhuma delas verificou o comportamento cisalhante de descontinuidades sem preenchimento, fato que motivou o desenvolvimento do presente trabalho.

1.2 Objetivos

Esta pesquisa tem como objetivo geral desenvolver modelos baseados em técnicas fuzzy e neuro-fuzzy para previsão da resistência ao cisalhamento e da dilatação de

descontinuidades sem preenchimento de maciços rochosos.

Como objetivos específicos deste trabalho, podem ser citados:

- Estudar os fatores que governam o comportamento cisalhante de descontinuidades de maciços rochosos durante o processo de cisalhamento;
- Desenvolver os modelos fuzzy e neuro-fuzzy utilizando os principais fatores que governam o comportamento cisalhante de descontinuidades sem preenchimento;
- Avaliar o desempenho de cada um dos modelos propostos no presente trabalho;
- Realizar uma aplicação prática dos modelos desenvolvidos em problemas de estabilidade de taludes rochosos;
- Contribuir para o desenvolvimento de metodologias de cálculo da resistência ao cisalhamento em projetos que envolvam maciços rochosos com descontinuidades sem preenchimento.

1.3 Metodologia

Neste trabalho, inicialmente, foi realizada uma pesquisa bibliográfica buscando uma maior compreensão sobre o comportamento das descontinuidades de maciços rochosos durante o processo de cisalhamento.

Posteriormente, foram abordados os principais conceitos sobre a Lógica Fuzzy, enfatizando os aspectos relacionados com a utilização de controladores fuzzy na modelagem de sistemas, destacando-se as metodologias de Mamdani (1974) e Takagi e Sugeno (1983). No *software* MATLAB, os modelos baseados nas técnicas fuzzy para previsão da resistência cisalhante e da dilatância de descontinuidades sem preenchimento foram desenvolvidos com suas propriedades definidas a partir de 44 ensaios de cisalhamento direto apresentados na literatura.

Em seguida, alguns aspectos relativos às técnicas neuro-fuzzy foram comentados para introduzir os conceitos de funcionamento do controlador neuro-fuzzy proposto por Jang (1993). Por meio de um conjunto de dados robusto com 673 exemplos de entrada e saída, foram selecionados, aleatoriamente, os grupos empregados na fase de treinamento com 80% dos exemplos e na fase de validação com os 20% restantes. Utilizando-se o *software* MATLAB, realizou-se o treinamento e a validação dos diferentes modelos neuro-fuzzy propostos para previsão da resistência cisalhante e da dilatância de descontinuidades sem

preenchimento. Foi escolhido, então, o modelo neuro-fuzzy com o menor desvio absoluto médio em relação aos dados de validação. Seu desempenho foi avaliado a partir de análises de gráficos e de desvios referentes ao mesmo conjunto de dados de validação.

Por fim, foi realizada uma aplicação prática de cada um dos modelos desenvolvidos em problemas de estabilidade de taludes rochosos, considerando três taludes rochosos fictícios com superfícies de deslizamento planas definidas por descontinuidades sem preenchimento e buscando determinar os fatores de segurança para todos os cenários analisados. Seus resultados foram, então, comparados com outras metodologias de cálculo.

1.4 Escopo do trabalho

Esta dissertação é composta por sete capítulos. Após este primeiro capítulo introdutório, o segundo capítulo apresenta alguns dos aspectos mais relevantes sobre o comportamento mecânico das descontinuidades de maciços rochosos durante o processo de cisalhamento, enfatizando os principais fatores que controlam o comportamento cisalhante das descontinuidades. Os modelos considerados mais importantes para a previsão do comportamento cisalhante de descontinuidades sem preenchimento de maciços rochosos são, também, abordados neste capítulo.

No Capítulo 3, são apresentados os principais conceitos sobre a Lógica Fuzzy, os controladores fuzzy em geral e, especificamente, o funcionamento do controlador fuzzy proposto por Mamdani (1974). O capítulo descreve, também, todas as etapas adotadas no desenvolvimento do controlador fuzzy do tipo Mamdani para previsão do comportamento cisalhante de descontinuidades sem preenchimento e apresenta os resultados obtidos pelo modelo.

O Capítulo 4 trata sobre a teoria de funcionamento do controlador fuzzy proposto por Takagi e Sugeno (1983) e descreve todas as etapas envolvidas no desenvolvimento dos controladores fuzzy do tipo Takagi-Sugeno para previsão do comportamento cisalhante de descontinuidades sem preenchimento. Os resultados obtidos pelos modelos são apresentados neste capítulo.

O quinto capítulo descreve os aspectos gerais sobre os controladores neuro-fuzzy e os principais conceitos relacionados com a teoria de funcionamento do controlador neuro-fuzzy proposto por Jang (1993). Neste capítulo, são apresentadas, também, todas as etapas adotadas no desenvolvimento do controlador neuro-fuzzy para previsão do comportamento

cisalhante de descontinuidades sem preenchimento e os resultados obtidos pelo modelo.

No Capítulo 6, é realizada uma aplicação prática dos modelos fuzzy e neuro-fuzzy na análise de estabilidade de três taludes rochosos fictícios com superfícies de deslizamento definidas por descontinuidades sem preenchimento. Este capítulo apresenta, ainda, as previsões obtidas pelos modelos e a discussão sobre os resultados observados.

O Capítulo 7 se refere às conclusões da pesquisa e às sugestões para trabalhos futuros.

Por último, são apresentados as referências bibliográficas citadas no texto e os apêndices. As regras de inferência fuzzy do modelo Mamdani são retratadas no Apêndice A. O Apêndice B descreve os códigos do MATLAB para obtenção do intervalo de variação pelo modelo fuzzy do tipo Mamdani. As tabelas utilizadas para determinação dos desvios absolutos médios de cada um dos modelos desenvolvidos a partir dos dados de validação são exibidas no Apêndice C. O Apêndice D apresenta as regras de inferência fuzzy do modelo neuro-fuzzy do tipo ANFIS.

2 COMPORTAMENTO DAS DESCONTINUIDADES EM MACIÇOS ROCHOSOS

Neste capítulo, serão apresentados alguns dos aspectos mais relevantes sobre o comportamento mecânico das descontinuidades de maciços rochosos durante o processo de cisalhamento, permitindo a consolidação de uma base teórica sobre o assunto que possa facilitar a compreensão do desenvolvimento da metodologia, a análise dos resultados e as conclusões finais do presente trabalho. Desse modo, serão selecionados alguns dos principais agentes que controlam o comportamento cisalhante das descontinuidades dos maciços e as formas como esses fatores podem interferir na resposta dessas descontinuidades serão explicadas com detalhes. Em seguida, serão apresentados os modelos mais relevantes para a previsão do comportamento cisalhante de descontinuidades sem preenchimento de maciços rochosos.

2.1 Introdução

Um dos principais problemas envolvendo a análise e o dimensionamento de estruturas geotécnicas em rocha é a correta previsão do comportamento dos maciços rochosos. Segundo Oliveira e Indraratna (2010), isso se deve porque, normalmente, os maciços rochosos consistem em uma matriz intertravada de blocos discretos de rocha com diferentes graus de intemperismo e superfícies que podem se encontrar limpas ou preenchidas com algum tipo de material.

A presença de descontinuidades em maciços rochosos pode interferir, significativamente, em suas propriedades de deformação e resistência ao cisalhamento dependendo das condições de contorno que lhes são impostas. Essa quebra de continuidade mecânica, além de fazer com que a resistência do maciço fraturado seja muito inferior à resistência da rocha intacta, prejudica a aplicação da Teoria da Mecânica dos Meios Contínuos, dificultando, assim, a modelagem do comportamento mecânico desses maciços anisotrópicos para projetos de estruturas geotécnicas em rocha. Assim sendo, conclui-se que o conhecimento do comportamento mecânico de um maciço rochoso com certo grau de fraturamento está, diretamente, vinculado com as características de sua descontinuidade e a resposta da mesma às solicitações atuantes.

Diversas pesquisas, como a de Skinas et al. (1990), de Toledo e de Freitas (1993), Papaliangas et al. (1993), Indraratna et al. (1998), Indraratna et al. (1999), Indraratna et al.

(2010a), Indraratna et al. (2010b), Oliveira e Indraratna (2010), Indraratna et al. (2013) e Indraratna et al. (2014), investigaram os principais mecanismos que controlam o comportamento cisalhante das descontinuidades de maciços rochosos.

Oliveira e Indraratna (2010) afirmam que os deslocamentos vertical e horizontal e as rigidezes normal e cisalhante das descontinuidades podem controlar a distribuição de tensões e os deslocamentos dentro de um maciço rochoso fraturado.

Oliveira (2009), em seu trabalho o qual buscou desenvolver um modelo analítico mais generalizado para prever o comportamento cisalhante de descontinuidades preenchidas com solo, listou alguns dos principais fatores que podem influenciar a resposta das descontinuidades durante o cisalhamento. Eles são:

- Rugosidade das paredes das descontinuidades;
- Resistência e deformabilidade das asperezas;
- Ângulo de atrito básico da descontinuidade;
- Resistência à compressão da rocha nas proximidades das paredes das descontinuidades;
- Espessura, tipo e propriedades físicas do material de preenchimento, se houver;
- Rigidez imposta pelo maciço rochoso circundante;
- Magnitude da tensão normal que atua na descontinuidade;
- Condição de drenagem e pressão de água na descontinuidade.

Diante do exposto, serão apresentados, na sequência, alguns dos principais fatores que controlam o comportamento cisalhante das descontinuidades de maciços rochosos. Além disso, serão comentadas as formas como cada um desses fatores pode interferir na resposta das descontinuidades durante o processo de cisalhamento.

2.2 Rugosidade das descontinuidades

É evidente a importância das características da rugosidade das paredes de uma descontinuidade na resistência ao cisalhamento de maciços rochosos. Em descontinuidades limpas, a influência da rugosidade, combinação da ondulação e da aspereza da superfície, no processo de cisalhamento é ainda maior, já que não há interferência do material de preenchimento no contato entre as paredes das descontinuidades. Assim, alguns fenômenos que ocorrem durante o cisalhamento podem ser atribuídos à rugosidade, por exemplo, a dilatação das descontinuidades está relacionada com as ondulações enquanto a perda de

resistência ao longo do processo de cisalhamento pode ser causada pela quebra ou degradação das asperezas.

Oliveira (2009) afirma que a rugosidade das descontinuidades de rochas depende, basicamente, da sua forma de origem e da mineralogia da rocha. Em alguns casos, essas superfícies podem sofrer ação do intemperismo, afetando a rugosidade substancialmente.

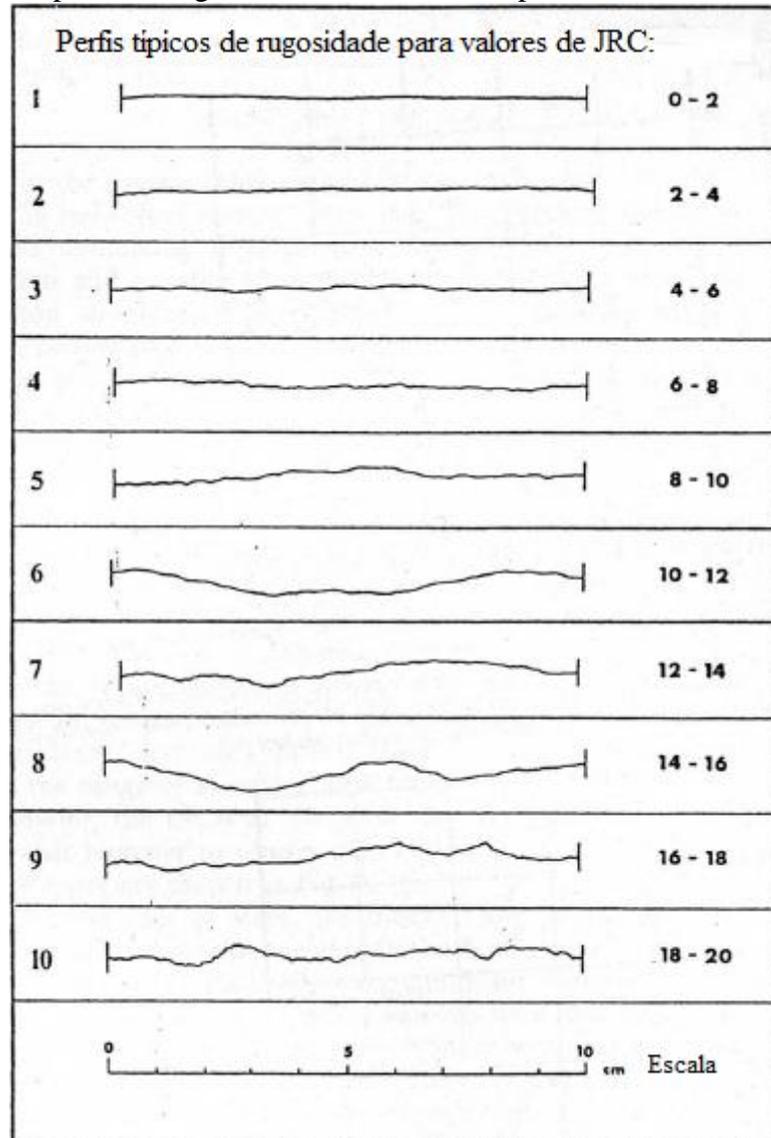
Diversas metodologias foram desenvolvidas para sua aferição, algumas se baseiam na geometria fractal (Seidel e Haberfield, 1995b) ou em séries de Fourier (Indraratna e Haque, 2000) para estimar seu valor, outras permitem obter suas dimensões reais por meio de um equipamento para medição das coordenadas da superfície das descontinuidades (Haque, 1999).

Hudson e Harrison (1997) ressaltaram, no entanto, que, entre todos os procedimentos para medição da rugosidade, é possível reconhecer que o mais completo, do ponto de vista prático, é o proposto por Barton (1973), o qual sugere uma escala de rugosidade que representa, simplesmente, a ondulação da descontinuidade (Figura 2.1). Seu índice é conhecido como coeficiente de rugosidade da descontinuidade – *Joint Roughness Coefficient* (JRC) – e seu valor pode variar de 0 a 20.

Apesar da sua fácil aplicação, dificuldades, como a subjetividade na definição do valor de JRC e o efeito de escala, isto é, as variações nos comprimentos das ondulações e nas alturas das asperezas ao longo da superfície das descontinuidades, podem comprometer a obtenção do seu valor real.

A estimativa do coeficiente JRC pode ser feita, de acordo com Barton e Bandis (1990), por meio de um ensaio de plano inclinado – *Tilt Test* – um método simples que consiste em colocar duas amostras de rocha em cima de uma superfície a qual vai sendo inclinada lentamente. O valor do JRC se relaciona com o ângulo de inclinação da superfície necessário para provocar o deslizamento de uma amostra sobre a outra, descontando-se o ângulo de atrito básico.

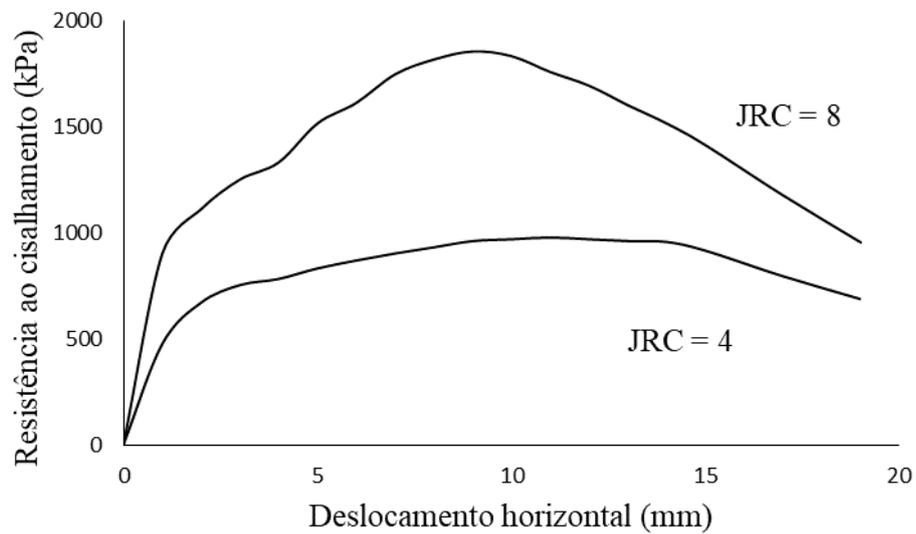
Figura 2.1 – Perfis típicos de rugosidade e valores correspondentes de JRC



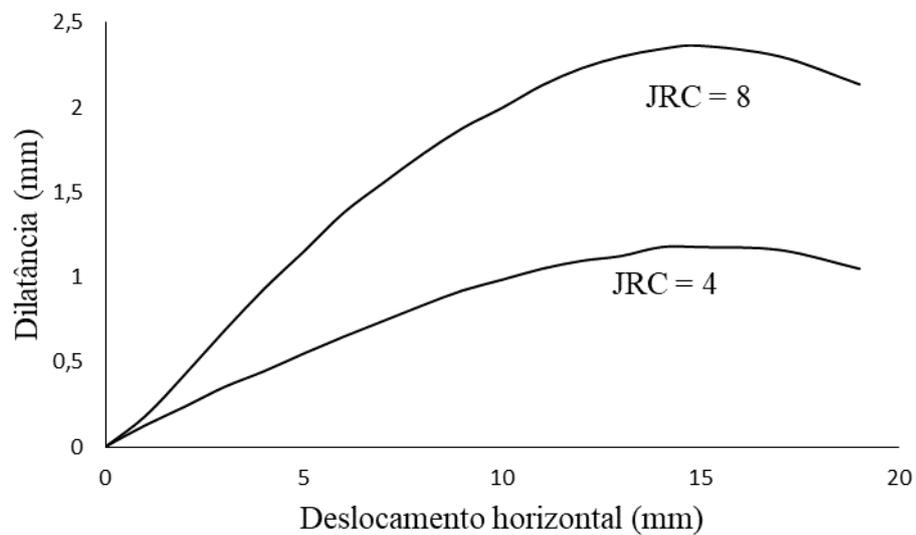
Fonte: Barton (1973).

A influência da rugosidade no comportamento cisalhante de discontinuidades pode ser vista na Figura 2.2 que apresenta os resultados experimentais de Indraratna e Haque (2000) em discontinuidades com valores de JRC diferentes.

Figura 2.2 – Influência da rugosidade no comportamento cisalhante de discontinuidades: (a) Resistência ao cisalhamento e (b) Dilatância



(a)



(b)

Fonte: Indraratna e Haque (2000).

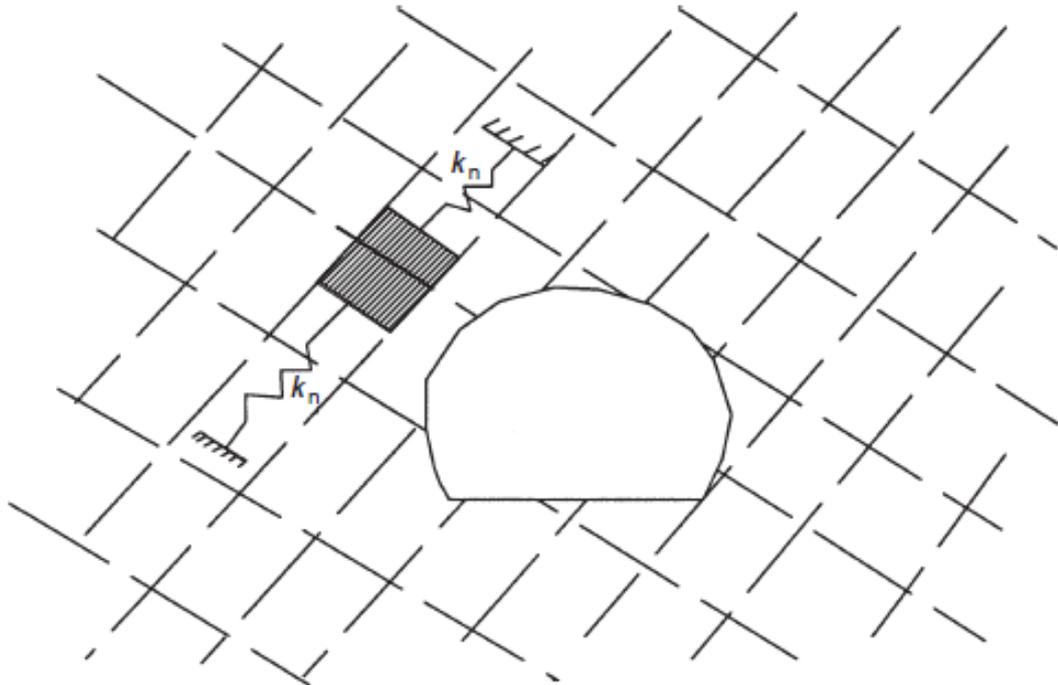
Observou-se que a rugosidade desempenha um papel importante no comportamento cisalhante das discontinuidades. Superfícies mais rugosas, além de resistências de pico maiores, tendem a apresentar maiores valores de dilatância que podem ocasionar um aumento na tensão normal durante o processo de cisalhamento.

2.3 Rigidez normal do maciço circundante

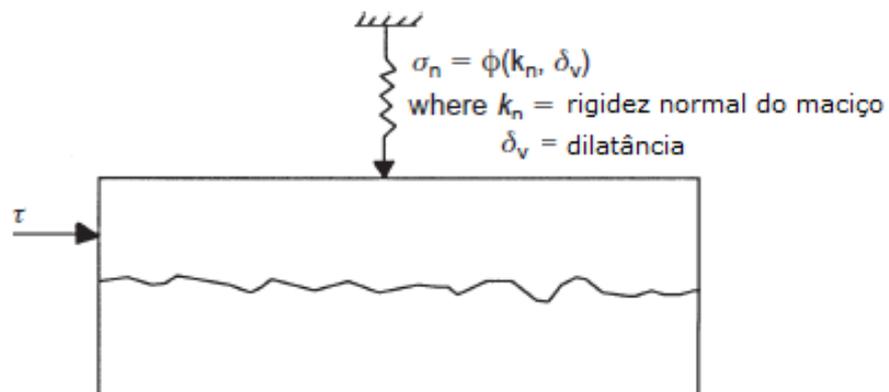
A rigidez normal do maciço circundante é a objeção oferecida pelos maciços rochosos aos deslocamentos normais das descontinuidades (dilatância) que podem ocorrer durante o seu processo de cisalhamento. Em alguns cenários, como taludes rochosos atirantados e escavações subterrâneas (Figura 2.3), o entendimento e a consideração dos efeitos dessa rigidez normal externa do maciço na resistência ao cisalhamento das descontinuidades são muito importantes. Isso porque, nesses casos, a presença da rigidez, que pode ser imposta pelo maciço ou pelo tirante, faz com que a carga normal atuante nas descontinuidades seja variável durante o processo de cisalhamento conforme se verifica a tendência dessas descontinuidades em dilatar. Dessa maneira, ensaios de laboratório realizados em condições de carga normal constante, ou rigidez nula, e que busquem representar as condições de contorno de campo podem conduzir a valores subestimados de resistência ao cisalhamento.

Em termos práticos, a medição *in situ* da rigidez normal do maciço circundante é uma tarefa difícil, mas pode ser feita por meio de qualquer procedimento que permita a aplicação de uma tensão normal à descontinuidade e a leitura do seu respectivo deslocamento vertical. Durante o cisalhamento da descontinuidade, quando não for possível a sua obtenção de forma direta, Skinas et al. (1990) recomendam uma maneira de estimar essa rigidez normal como uma função das propriedades elásticas do maciço rochoso circundante à descontinuidade e cuja utilização deve ser feita somente em último caso. Em outras situações, como as de taludes rochosos atirantados, sua estimativa pode ser feita considerando as propriedades elásticas dos elementos estruturais que limitam a movimentação das descontinuidades.

Figura 2.3 – Analogia do comportamento de uma descontinuidade para escavação subterrânea em maciço rochoso fraturado



(a) Escavação subterrânea em maciço rochoso fraturado



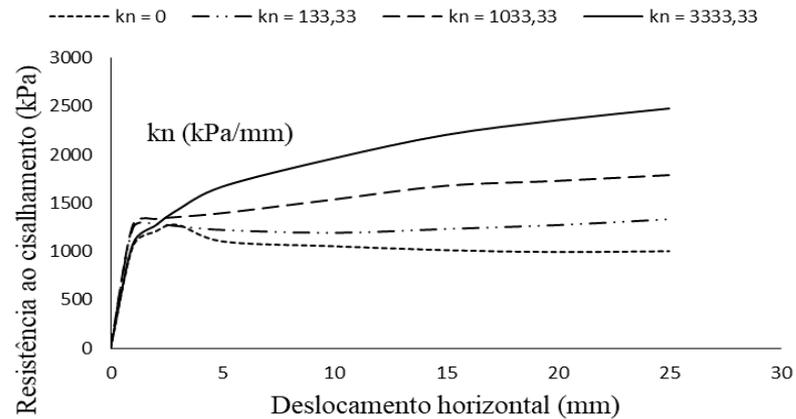
(b) Modelo equivalente para analogia do comportamento da descontinuidade

Fonte: Indraratna et al. (1999).

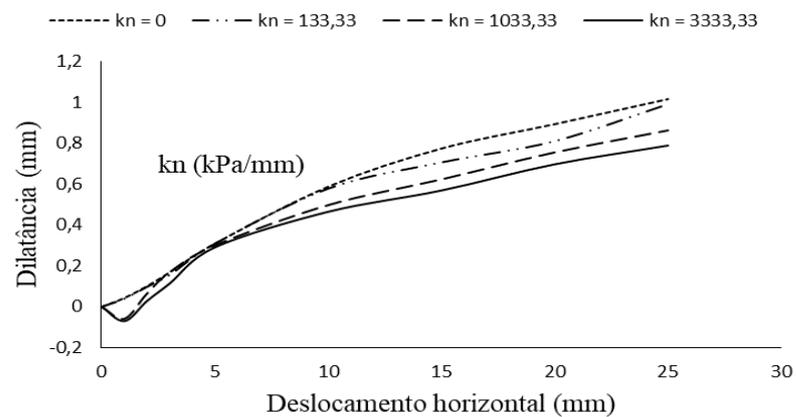
Por meio de observações de ensaios de cisalhamento direto com carga normal constante, *Constant Normal Loading* (CNL), e com rigidez normal constante, *Constant Normal Stiffness* (CNS), observou-se que a presença da rigidez normal ocasionou um aumento na tensão normal atuante. Esse acréscimo na tensão normal, por sua vez, provocou, dependendo da sua magnitude e da resistência das asperezas, um aumento significativo na resistência ao cisalhamento das descontinuidades e uma diminuição na dilatância conforme o

relatado por Skinas et al. (1990) e Indraratna e Haque (2000). As Figuras 2.4 e 2.5 resumem os processos mencionados através dos resultados dos ensaios obtidos por Skinas et al. (1990) e Indraratna e Haque (2000) respectivamente.

Figura 2.4 – Influência da rigidez normal externa no comportamento cisalhante de descontinuidades segundo Skinas et al. (1990)



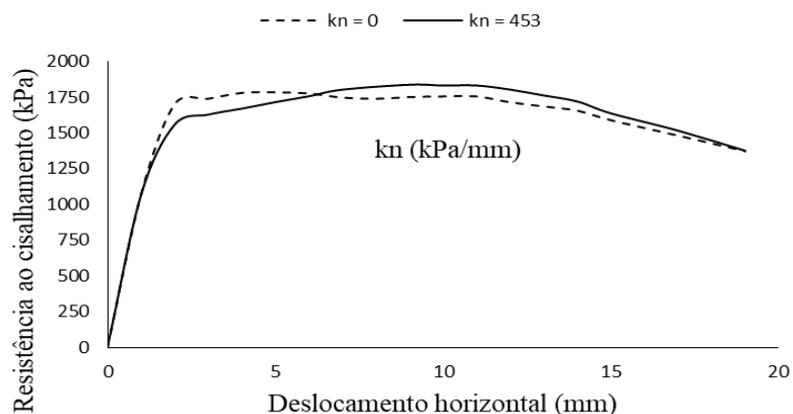
(a) Resistência ao cisalhamento



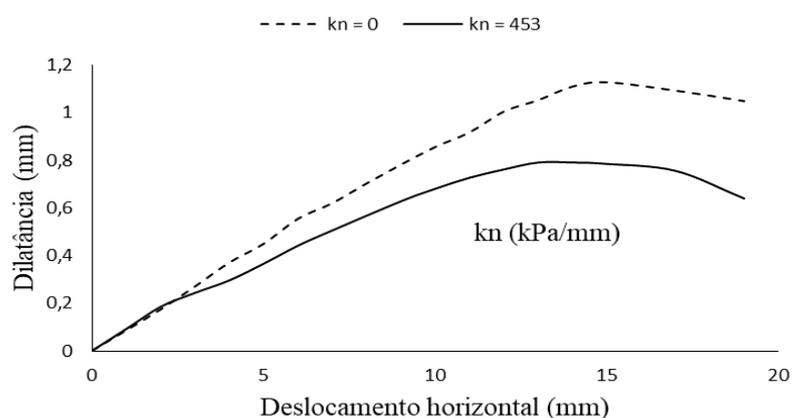
(b) Dilatância

Fonte: Skinas et al. (1990).

Figura 2.5 – Influência da rigidez normal externa no comportamento cisalhante de descontinuidades conforme Indraratna e Haque (2000)



(a) Resistência ao cisalhamento



(b) Dilatância

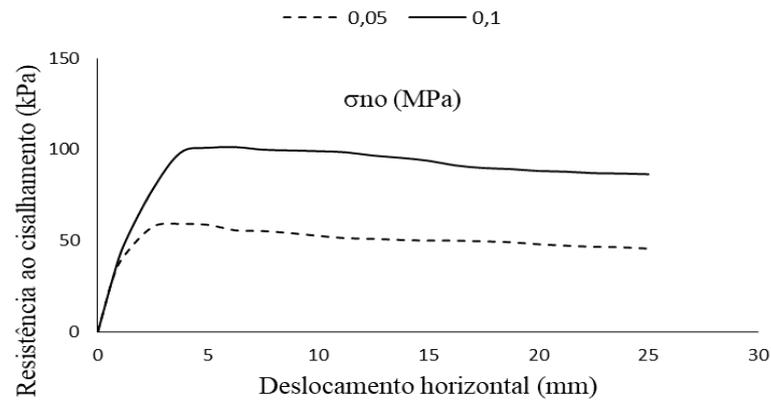
Fonte: Indraratna e Haque (2000).

Nos dois casos apresentados, ficou evidenciado que a rigidez do maciço circundante passou a controlar o comportamento cisalhante das descontinuidades.

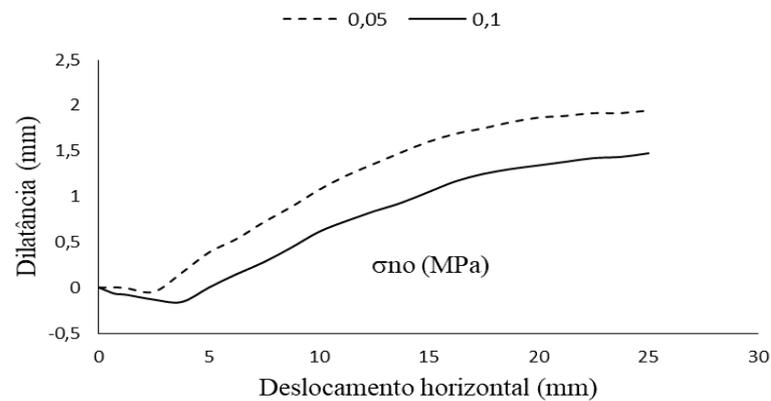
2.4 Tensão normal inicial

Skinas et al. (1990), Papaliangas et al. (1993), Indraratna et al. (1998), Indraratna et al. (1999) e Indraratna e Haque (2000) investigaram o efeito da tensão normal inicial no comportamento cisalhante das descontinuidades por meio da realização de ensaios de cisalhamento direto sob condições CNL e CNS. Os resultados experimentais de Papaliangas et al. (1993) ilustrados na Figura 2.6 indicam que o aumento da tensão normal inicial de ensaio acarreta o aumento da resistência e a redução da dilatância da descontinuidade.

Figura 2.6 – Efeito da tensão normal inicial na: (a) Resistência ao cisalhamento e (b) Dilatância



(a)

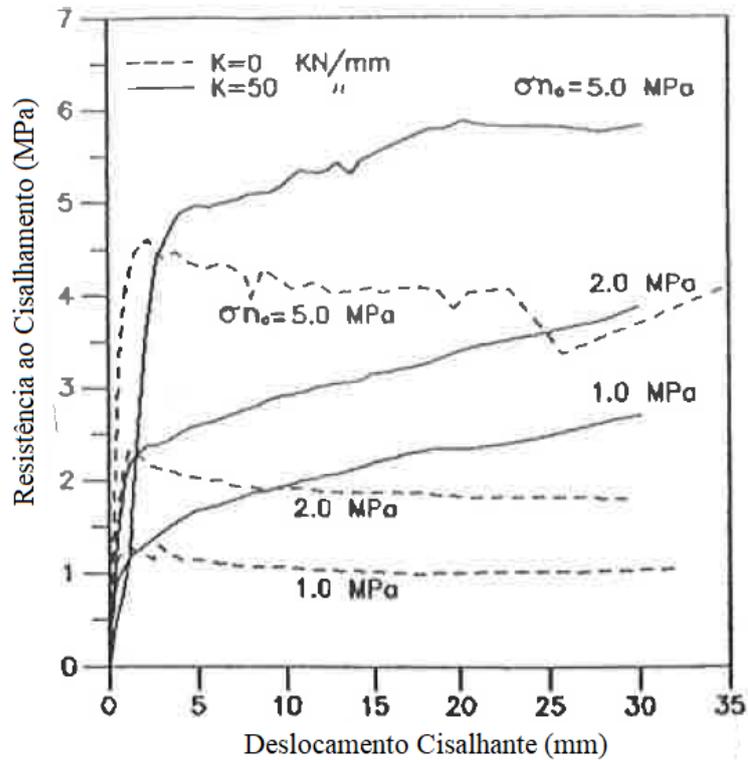


(b)

Fonte: Papaliangas et al. (1993).

Os autores constataram que, com o aumento da tensão normal inicial do ensaio, a influência da rigidez normal no cisalhamento diminuía, isto é, o aumento de resistência, normalmente verificado em ensaios CNS, era cada vez menor para tensões normais iniciais crescentes, como mostra a Figura 2.7. Tensões normais iniciais elevadas contribuem com a quebra das ondulações, condição que reduz ou até mesmo elimina a dilatância das descontinuidades, fenômeno responsável pelo aumento da resistência.

Figura 2.7 – Influência da tensão normal inicial no comportamento cisalhante de descontinuidades



Fonte: Skinas et al. (1990).

A confirmação desse fato dependerá da ocorrência da degradação das ondulações, pois, segundo Van Sint Jan (1990), se não houver essa degradação, a resposta da dilatação segue o formato das ondulações durante o processo de cisalhamento. Isso mostra que, possivelmente, a rigidez normal externa do maciço não afeta a resistência ao cisalhamento das descontinuidades caso não ocorra o fenômeno da dilatação.

2.5 Preenchimento das descontinuidades

Sabe-se que as propriedades mecânicas das descontinuidades dependem da presença de material preenchimento no seu interior. O efeito mais evidente desse preenchimento é separar as paredes da descontinuidade e reduzir o contato rocha-rocha.

Por meio de ensaios realizados em laboratório utilizando mica como material de preenchimento, Goodman (1976) constatou que à medida que a espessura da camada de mica aumentava, havia uma redução na tensão cisalhante, ou seja, quando a espessura da camada de mica superava a altura das ondulações da descontinuidade, a resistência ao cisalhamento da

descontinuidade passava a ser governada pelas características do material de preenchimento dessa descontinuidade.

Há décadas, Patton (1966) ressaltou que a resistência da interface solo-rocha pode ser menor que a do material de preenchimento sozinho. Isso se deve ao fato de a resistência ao cisalhamento poder ser afetada pelo tipo de material de preenchimento e pelas características das interfaces parede-preenchimento e foi comprovado, posteriormente, nos ensaios realizados por de Toledo e de Freitas (1993).

Haque (1999) afirma que a presença de material entre as paredes das descontinuidades faz com que suas propriedades de coesão e atrito dependam da natureza de suas superfícies (rugosa ou lisa), das características e da espessura do material de preenchimento e da quantidade de deslocamento esperada.

Além disso, parâmetros como o efeito de escala, a poropressão e a razão de sobreadensamento do material de preenchimento podem também, de acordo com Oliveira (2009), influenciar a resistência ao cisalhamento de descontinuidades preenchidas, mas seus efeitos ainda necessitam ser mais bem compreendidos.

Indraratna e Haque (2000) constataram que existe uma razão crítica entre a espessura do preenchimento e a altura da ondulação além da qual o material de preenchimento passa a governar o comportamento cisalhante da descontinuidade sozinho. Segundo de Toledo e de Freitas (1993), os mecanismos de ruptura de descontinuidades preenchidas podem ser divididos em casos onde a espessura do preenchimento é menor que a altura da ondulação e onde a espessura é maior. Dessa maneira, quanto maior a espessura do material de preenchimento, menor é a resistência ao cisalhamento da descontinuidade. Essa condição é verificada até certo valor limite quando a espessura do preenchimento se torna maior que a altura da ondulação e se aproxima do valor crítico.

2.6 Resistência à compressão simples da rocha intacta

Por ser considerado um meio descontínuo formado por porções de rocha intacta e descontinuidades que o atravessam, o comportamento de um maciço rochoso fraturado, dependendo da escala relativa entre o tamanho da obra e o padrão de faturamento, é governado pelas propriedades da rocha intacta e das descontinuidades.

É possível afirmar que, de uma forma geral, as discontinuidades comandam a resistência ao cisalhamento de maciços rochosos fraturados. Um mecanismo fundamental no comportamento cisalhante de maciços rochosos fraturados que ocorre durante o deslocamento de suas discontinuidades é o contato entre suas paredes.

Barton e Choubey (1977) comentam que a ocorrência ou não desse contato entre as paredes das discontinuidades pode resultar em valores de resistência ao cisalhamento e de deformação bem desiguais. Isso se deve, porque, no caso de discontinuidades limpas, a rugosidade e a resistência à compressão das paredes dessas discontinuidades têm papel fundamental no seu comportamento mecânico, enquanto que, para discontinuidades preenchidas, as propriedades físicas e mineralógicas do material que separa as paredes das discontinuidades devem ser avaliadas primeiro.

Ainda com relação ao contato entre as paredes das discontinuidades, Barton (1971) e Jaeger (1971) verificaram que sua área de contato é extremamente pequena e menor do que a área total utilizada convencionalmente em projetos. Consequentemente, as tensões normal e cisalhante que realmente atuam nas rugosidades devem ser muito maiores do que as tensões estimadas na prática, talvez até mil vezes maiores segundo Barton e Choubey (1977).

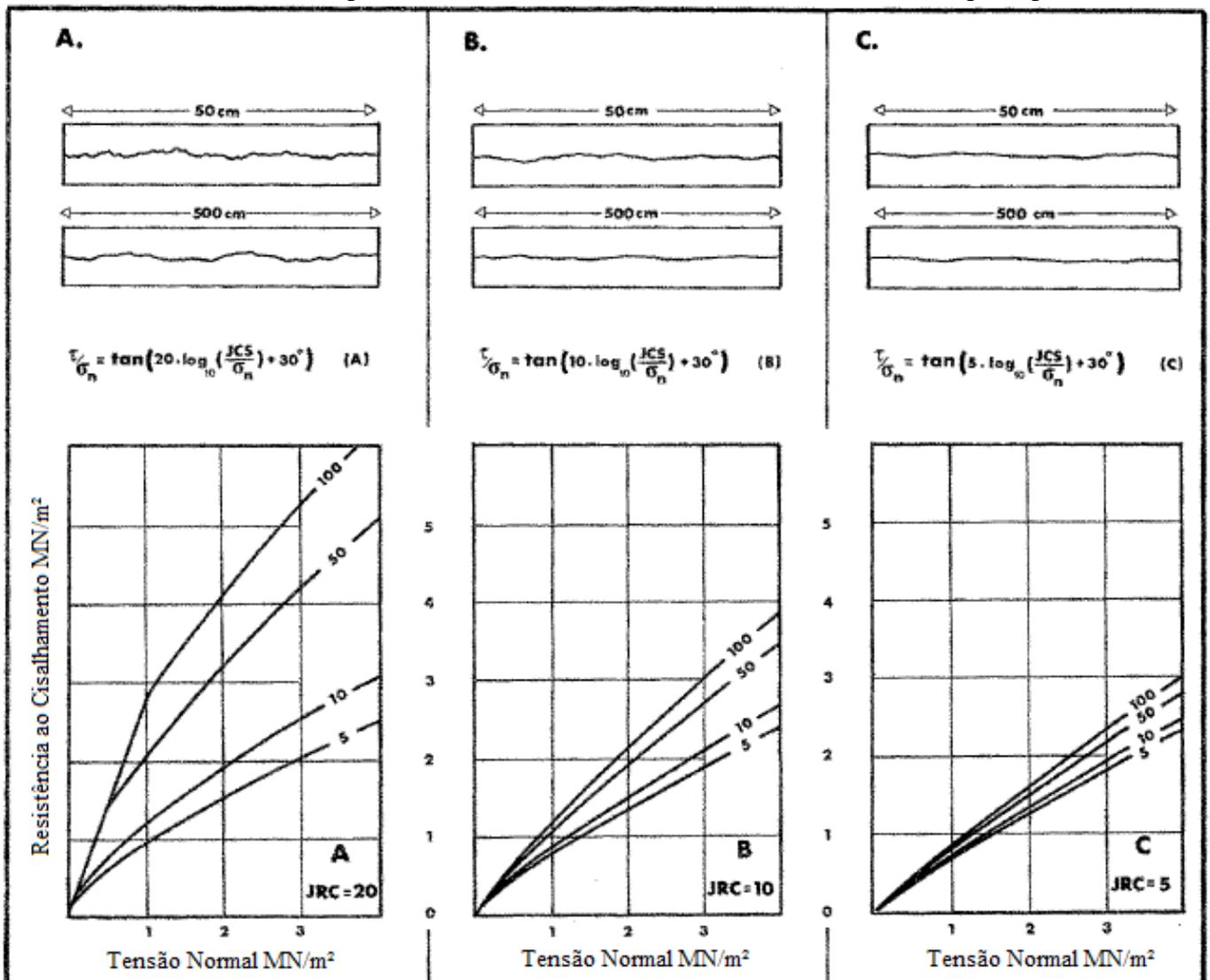
Desse modo, a resistência à compressão da rocha intacta tem grande influência no cisalhamento das asperezas e, portanto, interfere no comportamento mecânico das discontinuidades durante o processo de cisalhamento. Contudo, seu efeito deve ser menos significativo em discontinuidades com superfícies pouco rugosas.

Por meio de ensaios de cisalhamento direto em discontinuidades artificiais, Patton (1966) constatou que amostras com configurações de superfície idênticas, mas com resistências à compressão diferentes possuíam envoltórias de ruptura distintas. Essa diferença ocorria para tensões normais atuantes altas e as amostras com maiores resistências à compressão eram as que apresentavam maior resistência ao cisalhamento.

A Figura 2.8 ilustra a proposta de Barton (1973) a qual pode-se observar o efeito da resistência à compressão da rocha na resistência ao cisalhamento das discontinuidades. Para isso, foi definido o coeficiente JCS (*Joint Compressive Strength*) que permite avaliar a interferência do intemperismo da rocha intacta na resistência à compressão das paredes das discontinuidades. Em rochas que ainda não sofreram ação do intemperismo, o valor de JCS é igual à resistência à compressão simples da rocha intacta.

Analisando-se os resultados da Figura 2.8, torna-se evidente que a resistência à compressão da parede da descontinuidade é uma componente importante da resistência ao cisalhamento, e todo o processo que reduza essa resistência à compressão deve conduzir a uma resistência ao cisalhamento menor (Barton, 1976). Outro aspecto que deve ser percebido é a maior influência do valor de JCS na resistência cisalhante da descontinuidade conforme se aumenta a sua rugosidade.

Figura 2.8 – Influência da resistência à compressão da rocha no comportamento cisalhante de descontinuidades: (a) Ásperas e onduladas, (b) Lisas e onduladas e (c) Lisas e quase planas



Fonte: Barton (1976).

2.7 Modelos para previsão do comportamento mecânico de descontinuidades sem preenchimento de maciços rochosos

Conforme Itasca Consulting Group (2000), a modelagem numérica de problemas práticos pode levar as descontinuidades a condições de carregamento bastante complexas. Por outro lado, os modelos empíricos desenvolvidos para se adequarem aos ensaios de laboratório fornecem apenas soluções para situações de carregamento simples.

Bandis (1990) agrupou, em teóricos e empíricos, numerosos estudos relacionados com o comportamento cisalhante de descontinuidades de maciços rochosos. As abordagens teóricas, geralmente, utilizam métodos numéricos acoplados com leis constitutivas avançadas para modelar o comportamento das descontinuidades. Embora sejam matematicamente avançadas, essas leis constitutivas ainda são inspiradas nos resultados de ensaios de laboratório e de campo, e não modelam de forma explícita a cinemática do desenvolvimento do cisalhamento na descontinuidade. Diante disso, as abordagens teóricas somente devem ser empregadas, como ferramentas preditivas, em situações que são adequadamente representadas pelo conjunto de dados para o qual suas relações empíricas foram obtidas (Haberfield e Seidel, 1999).

Oliveira (2009) relata que a principal linha de abordagem adotada por vários pesquisadores para descrever o comportamento mecânico das descontinuidades de maciços rochosos foi a empírica. Nesse tipo de abordagem, dados experimentais obtidos em ensaios de laboratório eram analisados com o intuito de derivar correlações entre variáveis de influência e formular modelos de acordo com o comportamento observado. Esses ensaios de laboratório, realizados sob diferentes condições de contorno e em diversos tipos de descontinuidades, de rugosidades e de níveis de tensão aplicados, foram capazes de proporcionar conhecimento suficiente para o desenvolvimento de um grande número de modelos analíticos, como os de Patton (1966), Ladanyi e Archambault (1970), Barton (1973), Barton e Choubey (1977), Barton e Bandis (1990), Skinas et al. (1990) e Seidel e Haberfield (1995a). Na sequência, serão apresentados, de forma sucinta, os modelos de Patton (1966), Skinas et al. (1990), Barton e Choubey (1977), Cundall e Hart (1984), Barton e Bandis (1990), Indraratna e Haque (2000) e Dantas Neto et al. (2017) os quais são alguns dos principais métodos que podem ser utilizados para previsão do comportamento mecânico de descontinuidades limpas durante o cisalhamento.

2.7.1 Patton (1966)

Patton (1966) realizou uma série de ensaios de cisalhamento direto sob condições CNL em descontinuidades artificiais com seção transversal triangular. Patton (1966) verificou que, para tensões normais muito baixas, a inclinação da envoltória de resistência de pico é linear. A partir de um valor de tensão normal tido como crítico, as envoltórias de resistência ao cisalhamento poderiam ser ajustadas por duas retas, uma cuja expressão era governada pelo deslizamento entre as asperezas e outra que levava em consideração a degradação das asperezas. O deslizamento das asperezas ocorria em baixos níveis de tensão normal, mas após certa magnitude de tensão, esse deslizamento ficava inibido e as irregularidades começavam a ser cisalhadas, ocorrendo a degradação das asperezas. Apesar de muitas observações sobre a influência da rigidez normal externa no comportamento cisalhante das descontinuidades em seu estudo, o modelo de Patton (1966) permite determinar a tensão cisalhante de pico apenas sob condições de carga constante.

2.7.2 Skinas et al. (1990)

Outra metodologia que merece menção é a de Skinas et al. (1990) os quais afirmaram que a modelagem do comportamento completo da descontinuidade requer um método para prever as variações de dilatância sob mudanças de tensões normais e deslocamentos tangenciais. Por meio de alguns resultados de ensaios de laboratório, eles realizaram um estudo do comportamento das descontinuidades sob condições de rigidez normal de contorno constante (CNS). A metodologia proposta por Skinas et al. (1990) utiliza o conceito de dilatância mobilizada do modelo JRC-JCS de Barton et al. (1985). Segundo os autores, o modelo permite reproduzir o comportamento de qualquer tipo de descontinuidade submetida a certa rigidez normal de contorno. Skinas et al. (1990) constataram que o comportamento previsto pelo modelo e os resultados experimentais mostraram boa concordância. Entretanto, Indraratna e Haque (2000) declaram que o uso do modelo de Skinas et al. (1990) é complicado porque se baseia na ideia de JRC mobilizado, parâmetro de difícil obtenção.

2.7.3 Barton e Choubey (1977)

Baseado em observações e ensaios realizados em superfícies artificialmente rugosas, Barton e Choubey (1977) propuseram o uso da seguinte relação empírica (Equação 2.1), cuja origem foi descrita por Barton (1973).

$$\tau = \sigma_n \tan \left[\phi_b + JRC \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) \right] \quad (2.1)$$

Onde:

τ é a tensão cisalhante;

σ_n é a tensão normal aplicada;

ϕ_b é o ângulo de atrito básico;

JRC é o coeficiente de rugosidade da descontinuidade;

JCS é a resistência à compressão da parede da descontinuidade.

Essa expressão sugere que a resistência ao cisalhamento da descontinuidade pode ser dividida em três componentes, uma componente de atrito para a descontinuidade não rugosa avaliada pelo ϕ_b , uma componente geométrica responsável pelo esforço necessário para superar a rugosidade da superfície (JRC) e uma componente relativa à resistência das asperezas representada pela relação JCS/σ_n (Brady e Brown, 2005). Na realidade, as duas últimas componentes, por se multiplicarem, podem ser pensadas como uma só, o JRC mobilizado.

A magnitude da tensão normal que atua na descontinuidade é o principal fator externo que influencia a resistência ao cisalhamento. O valor de JRC pode ser calculado com auxílio da escala de rugosidade proposta por Barton (1973). No que diz respeito ao coeficiente JCS, se as paredes das descontinuidades estiverem intactas, JCS será igual à resistência à compressão da rocha intacta (σ_c) e seu valor poderá ser estimado por meio de ensaios de carga puntiforme (*point load tests*). Caso as descontinuidades possuam certo grau de intemperismo, JCS será menor que σ_c e sua medição poderá ser feita pela aplicação do esclerômetro de Schmidt nas paredes das descontinuidades (Barton e Choubey, 1977).

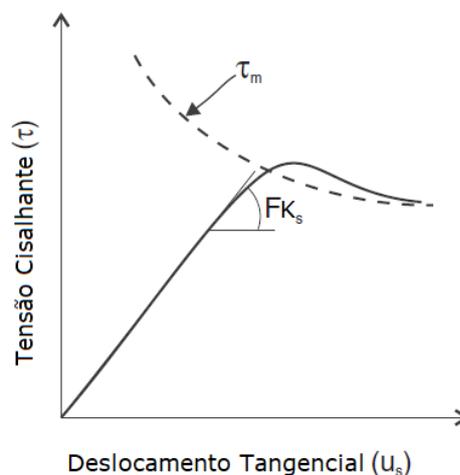
Segundo os autores, a Equação 2.1 pode ser usada para ajustar, extrapolar e prever dados experimentais. Porém, como originalmente os ensaios foram realizados com esforços normais extremamente pequenos e compatíveis com os esforços normais existentes em taludes rochosos, essa equação é mais apropriada para análises de estabilidade de taludes rochosos. O modelo de Barton e Choubey (1977) permite a previsão da resistência cisalhante de pico de discontinuidades sob condições CNL.

2.7.4 Modelo de plastificação contínua da descontinuidade de Cundall e Hart (1984)

Segundo Brady e Brown (2005), o modelo de plastificação contínua da descontinuidade (*Continuously Yielding Joint Model*) foi idealizado para fornecer um conjunto de hipóteses coerente e unificado para previsão da deformação e da resistência das descontinuidades. Proposto por Cundall e Hart (1984), esse modelo permite simular, de forma simples, o mecanismo interno de degradação progressiva das asperezas que pode ocorrer durante o processo de cisalhamento das descontinuidades (Itasca Consulting Group, 2000).

Ainda de acordo com Itasca Consulting Group (2000), nesse modelo, a curva dada pela tensão cisalhante e pelo deslocamento tangencial ($\tau \times u_s$) sempre tende para uma resistência ao cisalhamento "alvo" (τ_m) da descontinuidade (Figura 2.9).

Figura 2.9 – Modelo de plastificação contínua da descontinuidade



Fonte: Itasca Consulting Group (2000).

O conceito básico do modelo de plastificação contínua é que todo deslocamento tangencial (Δu_s) de uma descontinuidade qualquer tem um componente plástico irreversível (Δu_s^p). Esse deslocamento plástico causa uma redução progressiva na resistência ao cisalhamento da descontinuidade.

$$\Delta u_s^p = (1 - F)|\Delta u_s| \quad (2.2)$$

$$F = \frac{1 - \frac{\tau}{\tau_m}}{1 - r} \quad (2.3)$$

Em que:

F é um fator que depende da distância entre a tensão real atuante e a tensão “alvo”;

τ é a tensão de cisalhamento que atua na descontinuidade;

τ_m é a resistência ao cisalhamento da descontinuidade em um determinado deslocamento plástico;

r é um fator cujo valor inicial é zero e que se destina a restaurar F imediatamente após uma inversão de carga. No início de uma inversão de carga, r é ajustado para um valor τ / τ_m , tornando F igual a 1.

Desse modo, a resistência ao cisalhamento da descontinuidade é função do deslocamento plástico acumulado e diminui continuamente ao longo do processo de cisalhamento.

$$\tau_m = \sigma_n \tan(\varphi_m) \quad (2.4)$$

$$\Delta \varphi_m = - \frac{(\varphi_m - \varphi_b)}{\alpha} \Delta u_s^p \quad (2.5)$$

Onde:

σ_n é a tensão normal atuante na descontinuidade;

ϕ_m é o ângulo de atrito mobilizado que inclui o deslizamento e a degradação das asperezas;

$\Delta\phi_m$ é a variação do ângulo de atrito mobilizado, o qual é reduzido à medida que os danos nas asperezas se acumulam durante o cisalhamento;

ϕ_b é o ângulo de atrito básico da descontinuidade;

a é a amplitude da rugosidade da descontinuidade com dimensão de comprimento.

Os incrementos das tensões normal ($\Delta\sigma_n$) e cisalhante ($\Delta\tau$) podem ser calculados em função das rigidezes normal (K_n) e cisalhante (K_s) da descontinuidade e dos respectivos incrementos de deslocamentos normal (Δu_n) e tangencial (Δu_s).

$$\Delta\sigma_n = K_n \Delta u_n \quad (2.6)$$

$$\Delta\tau = F K_s \Delta u_s \quad (2.7)$$

A dilatância (i) pode ser obtida pela diferença entre o ângulo de atrito mobilizado e o ângulo de atrito básico, como mostra a Equação 2.8.

$$i = \tan^{-1} \left(\frac{|\tau|}{\sigma_n} \right) - \phi_b \quad (2.8)$$

Como pode ser observado, para estimar τ_m é necessário o conhecimento de F que está embutido na expressão de $\Delta\phi_m$. Por outro lado, F é função de τ_m . Assim, a solução pelo modelo de plastificação contínua não é exata e somente pode ser obtida por meio de algumas iterações até haver convergência dos resultados. A metodologia permite considerar o comportamento cisalhante de descontinuidades sob condições de rigidez normal de contorno constante (CNS).

2.7.5 Barton e Bandis (1990)

O modelo Barton-Bandis (1990) foi desenvolvido para ser uma estimativa empírica da resistência ao cisalhamento sem a necessidade de realização de ensaios, partindo apenas da caracterização mecânica das descontinuidades, como JRC, JCS e ϕ_b .

O modelo é fundamentado em uma série de relações empíricas apresentadas por Barton (1982) e Bandis et al. (1985), que descrevem os efeitos da rugosidade na deformação e na resistência ao cisalhamento das descontinuidades (Itasca Consulting Group, 2000). Nesse modelo, a resistência cisalhante de pico de uma descontinuidade limpa e rugosa pode ser determinada pela Equação 2.9.

$$\tau = \sigma_n \tan \left[\phi_b + JRC_n \log_{10} \left(\frac{JCS_n}{\sigma_n} \right) \right] \quad (2.9)$$

Em que:

JRC_n é o coeficiente de rugosidade da descontinuidade em escala de campo;

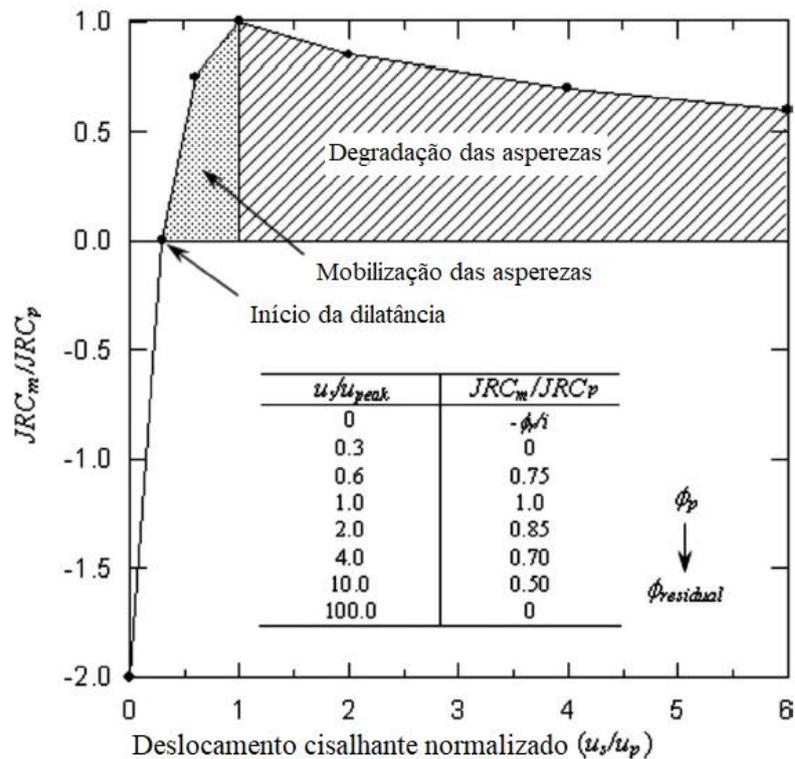
JCS_n é a resistência à compressão da parede da descontinuidade em escala de campo.

Para uma melhor previsão do comportamento cisalhante das descontinuidades, a Equação 2.2 foi modificada, adotando-se o conceito de rugosidade mobilizada da descontinuidade (JRC_{mob}), como mostra a Equação 2.10.

$$\tau = \sigma_n \tan \left[\phi_b + JRC_{mob} \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) \right] \quad (2.10)$$

A relação JRC_{mob}/JRC_p pode ser correlacionada com a razão entre o deslocamento tangencial em um determinado instante (u_s) e o deslocamento tangencial de pico (u_p). Oliveira e Indraratna (2010) afirmam que JRC_{mob} é empiricamente reduzido para contabilizar o cisalhamento e a degradação das asperezas em função do deslocamento normalizado u_s/u_p , conforme indica a Figura 2.10.

Figura 2.10 – Modelo adimensional para previsão da resistência ao cisalhamento



Fonte: Oliveira e Indraratna (2010).

Dessa maneira, fazendo uso da Figura 2.10 e do deslocamento tangencial, é possível estimar o JRC_{mob} pela razão u_s/u_p . O deslocamento de pico adotado pode ser o valor fornecido por ensaios ou o valor determinado, empiricamente, pela Equação 2.11.

$$u_p = \frac{L_n}{500} \left(\frac{JRC_n}{L_0} \right)^{0,33} \quad (2.11)$$

Onde:

L_0 é o comprimento da descontinuidade em escala de laboratório;

L_n é comprimento da descontinuidade em escala de campo.

Os incrementos na tensão cisalhante ($\Delta\tau$) e no deslocamento tangencial (Δu_s) são descritos pelas Equações 2.12 e 2.13. O acréscimo no deslocamento normal (Δu_n) é definido pela Equação 2.14. L é o comprimento da descontinuidade.

$$\Delta\tau = \Delta u_S \sigma_n \left[\frac{\tan(0,75 \varphi_b)}{0,2 u_p} \right] L \text{ para } \left(\frac{u_s}{u_p} \right) < 0,2 \quad (2.12)$$

$$\Delta\tau = \Delta u_S \sigma_n \left[\frac{\tan(0,25 \varphi_b)}{0,1 u_p} \right] L \text{ para } \left(\frac{u_s}{u_p} \right) > 0,2 \quad (2.13)$$

$$\Delta u_n = \Delta u_S \tan \left[0,5 JRC_{mob} \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) \right] \quad (2.14)$$

O modelo Barton-Bandis (1990) permite a previsão do comportamento tensão cisalhante x deslocamento tangencial apenas para descontinuidades sob condições CNL.

2.7.6 Indraratna e Haque (2000)

O modelo proposto por Indraratna e Haque (2000) é uma evolução de modelos anteriores apresentados por Patton (1966), Ladanyi e Archambault (1970) e Seidel e Haberfield (1995a) que permite a avaliação de todo o comportamento cisalhante da descontinuidade.

Indraratna e Haque (2000), com base em resultados de ensaios de cisalhamento direto do tipo CNL e CNS, propuseram que a dilatância da descontinuidade (δ_v), medida durante os ensaios, pudesse ser representada como uma função dos deslocamentos tangenciais (δ_h) por meio de uma série de Fourier.

$$\delta_v(\delta_h) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_n \cos \left(\frac{2\pi n \delta_h}{T} \right) + b_n \text{sen} \left(\frac{2\pi n \delta_h}{T} \right) \right] \quad (2.15)$$

Em que:

a_0 , a_n e b_n são coeficientes da série de Fourier;

n é o número de harmônicos;

T é o período da série de Fourier.

Os valores de a_0 , a_n , b_n e T são determinados por interpolação da curva da dilatância obtida pelos ensaios de cisalhamento direto seguindo as recomendações de Indraratna e Haque (2000). Portanto, o modelo permite que a tensão normal atuante na descontinuidade para determinado deslocamento tangencial (σ_{n,δ_h}) seja expressa em função da tensão normal inicial (σ_{n0}), da dilatância, da rigidez normal do maciço circundante (k_n) e da área da superfície da descontinuidade (A_j).

$$\sigma_{n,\delta_h} = \sigma_{n0} + \Delta\sigma_{n,\delta_h} = \sigma_{n0} + \frac{k_n \delta_v(\delta_h)}{A_j} \quad (2.16)$$

Finalmente, a Equação 2.17 apresenta o modelo analítico proposto por Indraratna e Haque (2000) para descontinuidades sem preenchimento que possibilita a determinação da tensão cisalhante para qualquer deslocamento horizontal considerado.

$$\tau_h = \left(\sigma_{n0} + \frac{k_n \delta_v(\delta_h)}{A_j} \right) \left(\frac{\tan(\phi_b) + \tan(i_0)}{1 - \tan(\phi_b) \tan(i_h)} \right) \quad (2.17)$$

Onde:

τ_h é a tensão de cisalhamento no deslocamento horizontal δ_h ;

ϕ_b é o ângulo de atrito básico da descontinuidade;

i_0 é o ângulo das asperezas inicial da descontinuidade;

i_h é o ângulo da dilatação no deslocamento horizontal δ_h .

Indraratna et al. (2005), Indraratna et al. (2010a), Indraratna et al. (2010b) e Oliveira e Indraratna (2010) demonstraram que o modelo de Indraratna e Haque (2000) consegue prever o comportamento cisalhante de descontinuidades limpas sob condições CNL e CNS, mas atentam para as dificuldades envolvidas na obtenção de seus parâmetros os quais também requerem resultados de ensaios de laboratório que podem não estar disponíveis.

Outro aspecto importante que deve ser notado é que os dados experimentais só podem representar o comportamento de campo se as condições de contorno impostas em laboratório forem comparáveis às condições de campo, fato que nem sempre é possível devido às limitações do equipamento de ensaio e do processo de amostragem (Dantas Neto et al., 2017).

2.7.7 Dantas Neto et al. (2017)

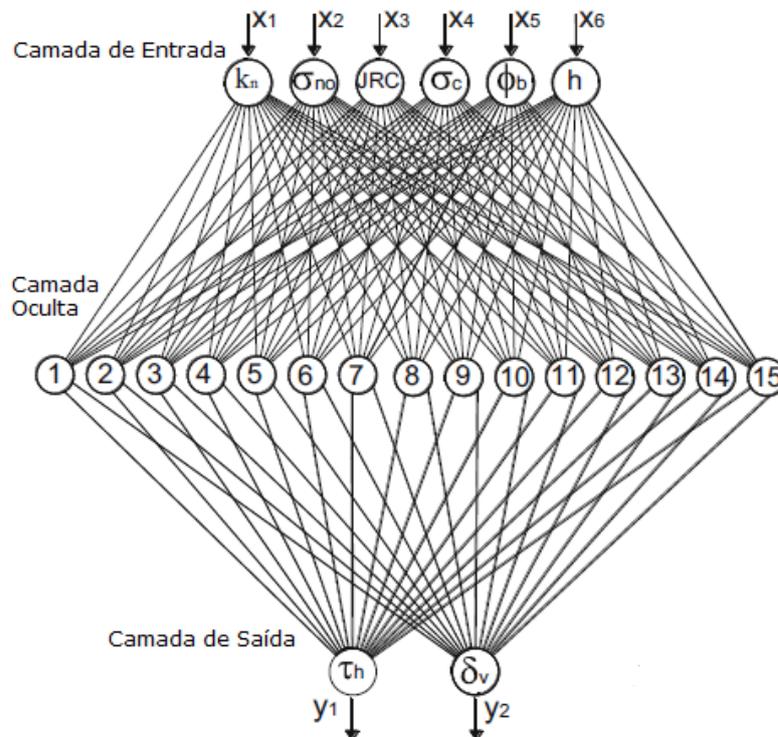
O modelo apresentado por Dantas Neto et al. (2017) utiliza as redes neurais artificiais e, segundo os autores, é uma alternativa aos modelos analíticos existentes que, por vezes, requerem determinados parâmetros obtidos a partir de ensaios de laboratório em grande escala, os quais nem sempre estão disponíveis. Estes autores empregaram um conjunto de dados robusto com 673 exemplos de entrada e saída de resultados de ensaios de cisalhamento

direto com diferentes condições de contorno e tipos de discontinuidades realizados por diversos autores para o desenvolvimento do modelo neuronal.

No modelo, são utilizados, como variáveis de entrada, a rigidez normal do maciço (k_n) em kPa/mm, a tensão normal inicial (σ_{no}) em MPa, o coeficiente de rugosidade da discontinuidade (JRC), a resistência à compressão uniaxial da rocha intacta (σ_c) em MPa, o ângulo de atrito básico (ϕ_b) em grau e o deslocamento horizontal (δ_h) em mm para prever a resistência ao cisalhamento atuante (τ_h) em kPa e a correspondente dilatância da discontinuidade (δ_v) em mm. O modelo neuronal proposto apresenta uma arquitetura (Figura 2.11) com seis nós na camada de entrada, quinze neurônios na única camada oculta e dois neurônios na camada de saída (A:6 - 15 - 2).

Dantas Neto et al. (2017) mostram que o modelo neuronal se ajusta melhor aos dados experimentais do que alguns modelos analíticos existentes, podendo inclusive descrever a influência dos parâmetros de entrada no comportamento cisalhante das discontinuidades limpas, como mostra a Tabela 2.1.

Figura 2.11 – Arquitetura do modelo neuronal para previsão de τ_h e δ_v



Fonte: Dantas Neto et al. (2017).

Tabela 2.1 – Contribuição de cada variável de entrada com os valores de τ_h e δ_v

Saída	k_n	σ_{n0}	JRC	σ_c	ϕ_b	δ_h
τ_h	24,3	18,9	15,3	24,8	7,4	9,3
δ_v	14,3	10,4	28,7	25,2	8,7	12,7

Fonte: Dantas Neto et al. (2017).

Diante do exposto, a resistência ao cisalhamento prevista foi mais afetada pela resistência à compressão uniaxial da rocha intacta, pela rigidez normal de contorno, pela tensão normal inicial e pela rugosidade da descontinuidade representada pelo JRC. Com relação à dilatância, a rugosidade da descontinuidade, a resistência à compressão uniaxial da rocha intacta, a rigidez normal de contorno e o deslocamento horizontal parecem ter papel mais importante na sua estimativa (Dantas Neto et al., 2017).

Entretanto, esses valores dizem respeito somente à influência de cada variável de entrada de forma isolada nos resultados das previsões e envolvem apenas o conjunto de dados adotado no desenvolvimento do modelo neuronal. Porém, alguns desses parâmetros podem interferir na magnitude dos efeitos provocados pelos outros em τ_h e δ_v . Por exemplo, em descontinuidades planas e lisas, isto é, com JRC próximo de zero, o efeito da rigidez normal do maciço circundante não é significativo na resistência cisalhante.

Uma das principais vantagens do modelo neuronal de Dantas Neto et al. (2017) é permitir a definição completa do comportamento cisalhante das descontinuidades sem preenchimento de forma simples, sem a necessidade da realização de ensaios de cisalhamento direto em grande escala. Todavia, os autores alertam que o modelo não oferece bons resultados para a estimativa da resistência ao cisalhamento de descontinuidades em rochas muito brandas.

Apesar do bom desempenho de alguns desses modelos para a previsão do comportamento cisalhante das descontinuidades rochosas sem preenchimento, observa-se que as respostas fornecidas por todos eles não levam em consideração as incertezas e as variações nos valores dos seus parâmetros de entrada ao longo de uma certa descontinuidade que existem devido ao processo de formação do maciço e da própria descontinuidade. Nesse cenário de incertezas, a Teoria dos Conjuntos Fuzzy (Zadeh, 1965) se apresenta como uma ferramenta útil a ser utilizada em situações que envolvem sistemas reais complexos e parâmetros com valores incertos, como aqueles observados em obras geotécnicas projetadas e executadas em maciços rochosos.

3 MODELO FUZZY TIPO MAMDANI PARA PREVISÃO DO COMPORTAMENTO CISALHANTE DE DESCONTINUIDADES SEM PREENCHIMENTO EM MACIÇOS ROCHOSOS

Neste capítulo, serão apresentados os aspectos mais relevantes sobre a Lógica Fuzzy que permitirão introduzir os conceitos que envolvem a modelagem de sistemas reais por meio de controladores fuzzy. O capítulo abordará também a teoria de funcionamento do controlador fuzzy proposto por Mamdani (1974) para, posteriormente, descrever todas as etapas adotadas na construção do controlador fuzzy do tipo Mamdani desenvolvido para previsão do comportamento cisalhante de descontinuidades sem preenchimento e apresentar os resultados obtidos pelo modelo. Por fim, serão feitas algumas conclusões parciais sobre o modelo fuzzy desenvolvido.

3.1 Introdução

O desenvolvimento de modelos precisos e confiáveis para previsão da resistência das rochas e dos maciços rochosos é um dos interesses mais comuns entre os profissionais da engenharia e da geologia. Sabendo que a presença das descontinuidades em maciços rochosos com certo grau de fraturamento pode interferir, significativamente, no seu comportamento mecânico, diversos modelos analíticos têm sido idealizados com o propósito de descrever o comportamento cisalhante das descontinuidades presentes nos maciços rochosos.

Devido à natureza complexa dos materiais geológicos, às incertezas e às dificuldades na avaliação de seus parâmetros, a previsão do comportamento cisalhante das descontinuidades sem preenchimento tem se tornado uma tarefa difícil.

Isso se deve, porque a obtenção desses parâmetros de entrada dos diversos modelos analíticos existentes envolve dois dos principais aspectos de imperfeição da informação, a imprecisão e a incerteza. Dubois e Pride (1988) explicam que a imprecisão se relaciona com o conteúdo ou o valor de certo item da informação enquanto a incerteza se relaciona com a veracidade desse conteúdo. Estas duas características são, intrinsecamente, ligadas e opostas entre si, pois, quanto maior a incerteza sobre o conteúdo de uma informação, mais preciso ele será.

Por exemplo, admitindo que um determinado valor de JRC de uma descontinuidade esteja entre 4 e 8. Apesar de ser certa, essa informação é imprecisa. Por outro

lado, se um único valor de JRC tiver que ser especificado para essa descontinuidade, a informação, agora, será precisa, mas sua veracidade será incerta. O exemplo é, meramente, didático, pois sabe-se que, em uma descontinuidade, o JRC pode assumir valores diversos.

O tratamento de informações imprecisas e incertas pode ser feito pela Teoria dos Conjuntos Fuzzy que permite considerar um conjunto de valores possíveis para a representação de uma grandeza. Ganoulis (1994) afirma que o uso da Teoria dos Conjuntos Fuzzy é, especialmente, útil quando o número de dados disponíveis não é suficiente para caracterizar a incerteza por meio da Teoria das Probabilidades com medidas estatísticas padrões que envolvem a estimativa de frequências, como média, desvio padrão e tipo de distribuição de frequência.

Desse modo, a Teoria dos Conjuntos Fuzzy demonstra ter amplo potencial para aplicação em problemas relacionados com a Mecânica das Rochas, já que a realização de muitos ensaios de laboratório pode ser um trabalho difícil que exige equipamentos de grande porte com processos de amostragem complicados e com capacidade de representação das condições reais de contorno limitada, inviabilizando soluções fundamentadas em abordagens probabilísticas do problema.

A modelagem pela Teoria dos Conjuntos Fuzzy é recomendada para situações que envolvem sistemas reais complexos com a presença de parâmetros incertos e utiliza implicações lógicas para descrever as relações entre as variáveis de controle e o fenômeno físico analisado. Alguns dos principais conceitos relacionados com a Lógica Fuzzy serão apresentados a seguir.

3.2 Lógica Fuzzy

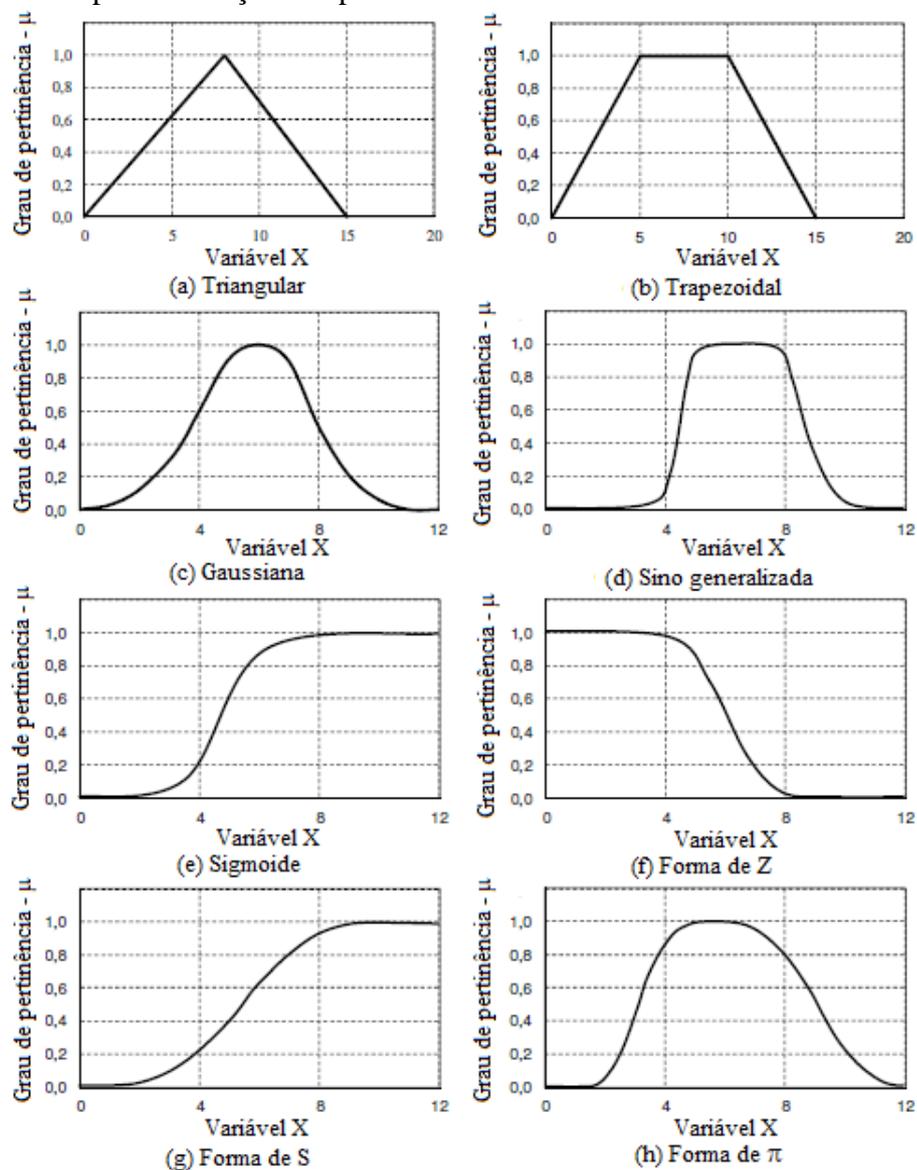
A Teoria dos Conjuntos Fuzzy concebida por Zadeh (1965) pode ser considerada um caso mais geral da Teoria Clássica dos Conjuntos, pois permite o tratamento do aspecto vago da informação, admitindo que uma certa grandeza pode assumir um conjunto de valores possíveis ao invés de um único valor pontual. A Lógica Fuzzy consiste, portanto, na utilização da Teoria dos Conjuntos Fuzzy em um contexto lógico para resolução de problemas práticos.

Conforme Zadeh (1965), um conjunto fuzzy empregado para representar uma determinada grandeza é caracterizado por uma função que atribui a cada valor dessa grandeza um grau de pertinência que varia entre zero e um. A função que estabelece essa relação entre

os valores de uma variável e seus respectivos graus de pertinência com relação a um determinado conjunto é conhecida como função de pertinência.

Existem vários tipos funções de pertinência, como ilustra a Figura 3.1. Normalmente, as funções apresentam uma parte onde o grau de pertinência é crescente e outra onde ele decresce com o aumento do valor da variável. Zadeh (1965) alerta para duas restrições importantes: o formato da função de pertinência deve ser convexo e o maior grau de pertinência possível (altura da função) de qualquer função deve ser um.

Figura 3.1 – Exemplos de funções de pertinência

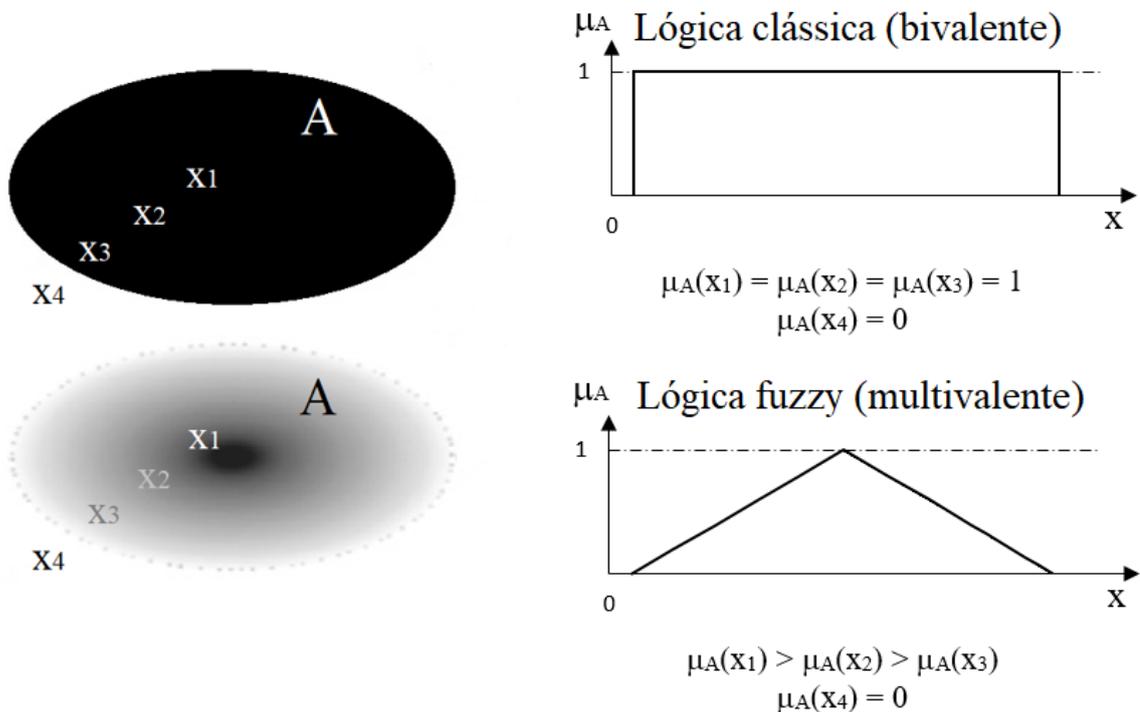


Fonte: Silva (2015).

A definição das funções de pertinência de uma variável qualquer pode ser feita por meio do conhecimento de um especialista ou através da análise de uma série conhecida de valores observados. A delimitação dessas funções é fundamental para o emprego das regras de inferência fuzzy.

Ao contrário da Teoria das Probabilidades que se baseia na Lógica Clássica e reconhece que as grandezas físicas podem assumir somente dois valores possíveis, isto é, algo é ou verdadeiro ou falso, ou preto ou branco, ou um ou zero etc., a Lógica Fuzzy expressa a incerteza na definição das grandezas e considera que, entre os extremos, existem outros valores intermediários, ou seja, entre o preto e o branco existem vários tons de cinza (Figura 3.2). Na Lógica Fuzzy, os conjuntos existentes não possuem limites precisos e o grau de pertinência (μ) de um elemento mede a possibilidade desse elemento pertencer a um determinado conjunto, podendo variar entre zero e um.

Figura 3.2 – Diferença entre a Lógica Clássica bivalente e a Lógica Fuzzy multivalente



Fonte: Jalalifar et al. (2011).

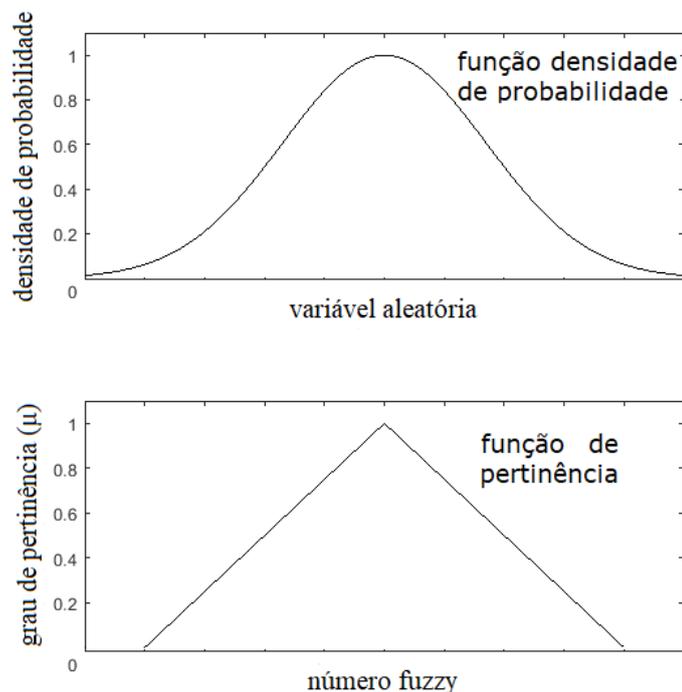
Analisando a Figura 3.2, enquanto que, pela Lógica Clássica, o elemento x_2 pertenceria ao conjunto A, com grau de pertinência igual a um ($\mu_A(x_2) = 1$), pela Lógica Fuzzy, o mesmo elemento, também, pertenceria ao conjunto A, mas com um grau de

pertinência menor que um ($0 < \mu_A(x_2) < 1$). Em contrapartida, o elemento x_4 não pertenceria ao conjunto por nenhuma das duas teorias.

Um fator curioso observado por Simões e Shaw (2007) é que a conceituação dos princípios da Lógica Fuzzy parece ser contrária às tradições e culturas que se baseiam em uma definição precisa e bivalente das grandezas, como a introduzida pela Teoria das Probabilidades. Todavia, estudos relacionados com a avaliação de risco de obras de engenharia, como os de Montoya (2013) e Silva et al. (2016), revelam a importância da Lógica Fuzzy como uma alternativa aos métodos probabilísticos.

Para Ganoulis (1994), comparando-se a Teoria dos Conjuntos Fuzzy com a Teoria das Probabilidades, os números fuzzy são equivalentes às variáveis aleatórias e as funções de pertinência correspondem às funções de densidade de probabilidade (Figura 3.3). No entanto, as regras básicas da aritmética dos conjuntos fuzzy são diferentes das regras da Teoria das Probabilidades. A probabilidade expressa a chance de um elemento ser membro de um conjunto. A Lógica Fuzzy determina o grau que esse elemento pertence ao conjunto.

Figura 3.3 – Diferença entre Teoria das Probabilidades e Lógica Fuzzy



Fonte: elaborada pelo autor.

3.2.1 Regras de inferência fuzzy

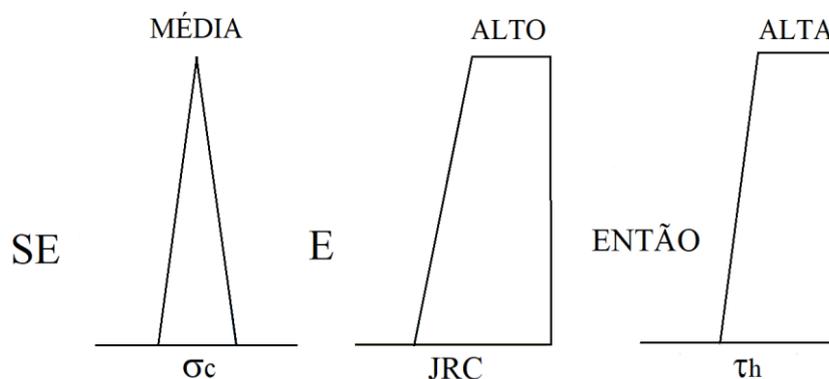
Além de permitir a modelagem de fenômenos na forma de equações matemáticas, a Lógica Fuzzy admite, também, a adoção da heurística para explicar problemas reais. O método heurístico consiste em se determinar a solução de um determinado problema de acordo com a experiência prévia de um especialista ou por meio de regras práticas utilizadas frequentemente. Uma regra heurística ou regra de inferência é uma implicação lógica que associa condições (ou antecedentes) com conclusões (ou conseqüências):

SE <condição> ENTÃO <conseqüência>

Simões e Shaw (2007) comentam que o método heurístico permite que seja estabelecida uma relação direta entre as variáveis de entrada e as saídas. A principal vantagem dessa metodologia está em sua habilidade de possibilitar a construção de um sistema de regras capaz de descrever problemas complexos com a presença de parâmetros incertos e desconhecidos.

É possível, então, utilizar os conjuntos fuzzy para descrever essas variáveis de entrada e saída. Dessa forma, no lugar de um valor exato para as variáveis, seriam adotados conjuntos de valores possíveis, como pode ser visto na Figura 3.4 que relaciona σ_c e JRC com τ_h .

Figura 3.4 – Exemplo de regra de inferência utilizando números fuzzy



Fonte: elaborada pelo autor.

Assim, essas regras de inferência fuzzy podem fornecer implicações afirmativas ou negativas sobre as variáveis de saída com base, por exemplo, na experiência de um

especialista. O especialista pode definir as regras que controlam determinado fenômeno através da sua própria experiência ou por meio da análise de conjunto de dados de entrada e saída que permitam um melhor entendimento sobre o comportamento do sistema analisado.

Se σ_c é ALTA e JRC é ALTO Então τ_h é ALTA (afirmativo)

Se σ_c é NÃO ALTA e JRC é NÃO ALTO Então τ_h é NÃO ALTA (negativo)

A utilização das regras de inferência fuzzy pode ser feita por sistemas especialistas para fornecer, de acordo com Grima (2000), soluções de problemas complexos de engenharia sem recorrer a modelos matemáticos. Esses sistemas especialistas são conhecidos como controladores fuzzy e empregam as experiências passadas e o conhecimento teórico sobre o fenômeno investigado para determinar as regras de inferência fuzzy que fornecerão as soluções do problema.

3.2.2 Controladores fuzzy

Uma modelagem equivale a uma representação simplificada de um sistema físico real que se deseja analisar. Alternativa interessante à modelagem matemática para descrever problemas complexos de engenharia por meio da Lógica Fuzzy é utilizar os controladores fuzzy.

Um controlador fuzzy consiste em um sistema composto de um conjunto de regras de inferência do tipo “SE ... ENTÃO” que definem ações de controle em função das diversas faixas de valores que as variáveis de estado do problema podem assumir. Essas faixas de valores, usualmente mal definidas, são modeladas por conjuntos fuzzy. O uso de sistemas construídos dessa maneira é interessante quando o modelo matemático está sujeito a incertezas, por exemplo determinar o valor do JRC de uma descontinuidade.

Ao contrário dos controladores convencionais em que o controle é descrito, analiticamente, através de um modelo matemático, os controladores fuzzy utilizam regras lógicas com a intenção de descrever a experiência humana e a intuição para controlar um processo. Berenji (1993) esclarece que o controlador fuzzy não necessita de um modelo analítico completo do processo, já que ele calcula as suas ações em função de uma base de

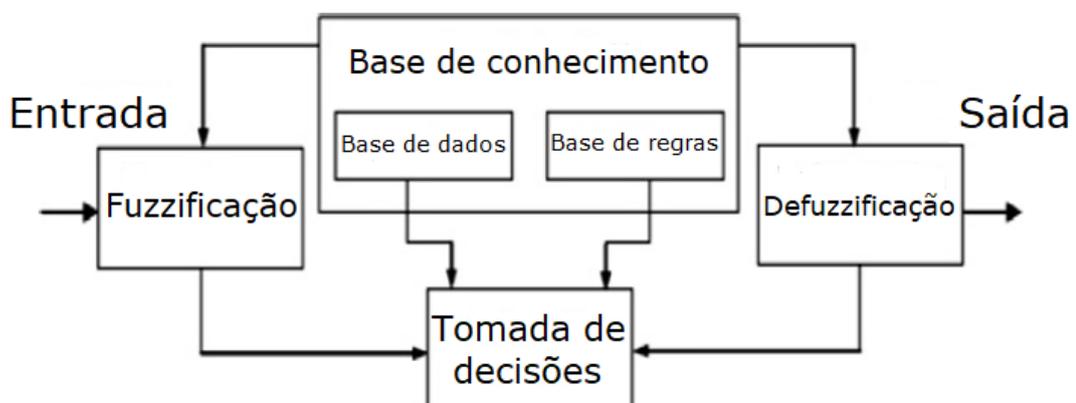
conhecimento heurística de como se deve controlar um determinado processo que, por sua vez, pode ser complexo, pouco conhecido e incerto.

Segundo Campos e Saito (2004), o controlador fuzzy é, na realidade, uma função não-linear entre as variáveis de entrada e de saída, que reflete os conhecimentos que os especialistas possuem sobre certo fenômeno.

A configuração básica de um controlador fuzzy (Figura 3.5) equivale a:

- Interface de fuzzificação: as entradas do sistema (números reais) são convertidas em conjuntos fuzzy em seus domínios, formulando as funções de pertinência de cada conjunto fuzzy envolvido no processo;
- Base de conhecimento: consiste de uma base de dados que permite definir as funções de pertinência que serão utilizadas e de uma base de regras que caracteriza a estratégia de controle e as suas metas. É importante que, em um controlador fuzzy, existam tantas regras quantas forem necessárias para mapear, totalmente, as combinações dos termos das variáveis;
- Lógica de tomada de decisões: incorporada na estrutura de inferência da base de regras, essa etapa do controlador fornece as saídas fuzzy de cada regra (consequentes) inferidas a partir do conjunto de condições de entrada (antecedentes);
- Interface de defuzzificação: processo responsável por representar os valores fuzzy de saída obtidos por um único valor discreto.

Figura 3.5 – Configuração de um controlador fuzzy



Fonte: Jang (1993).

Simões e Shaw (2007) afirmam que essa estrutura de controlador representa a transformação que ocorre do domínio real para o domínio fuzzy (fuzzificação), onde um conjunto de regras de inferência fuzzy é usado para as tomadas de decisões (lógica de tomada de decisões) que fornecerão saídas fuzzy. No final do processo, essas saídas deverão ser transformadas em números reais (defuzzificação).

Os controladores fuzzy podem diferir quanto aos operadores utilizados para sua implementação e quanto à representação das saídas fuzzy de cada regra. Os tipos de controladores fuzzy mais comuns na literatura são o modelo clássico de Mamdani (1974) e o modelo de interpolação de Takagi e Sugeno (1983).

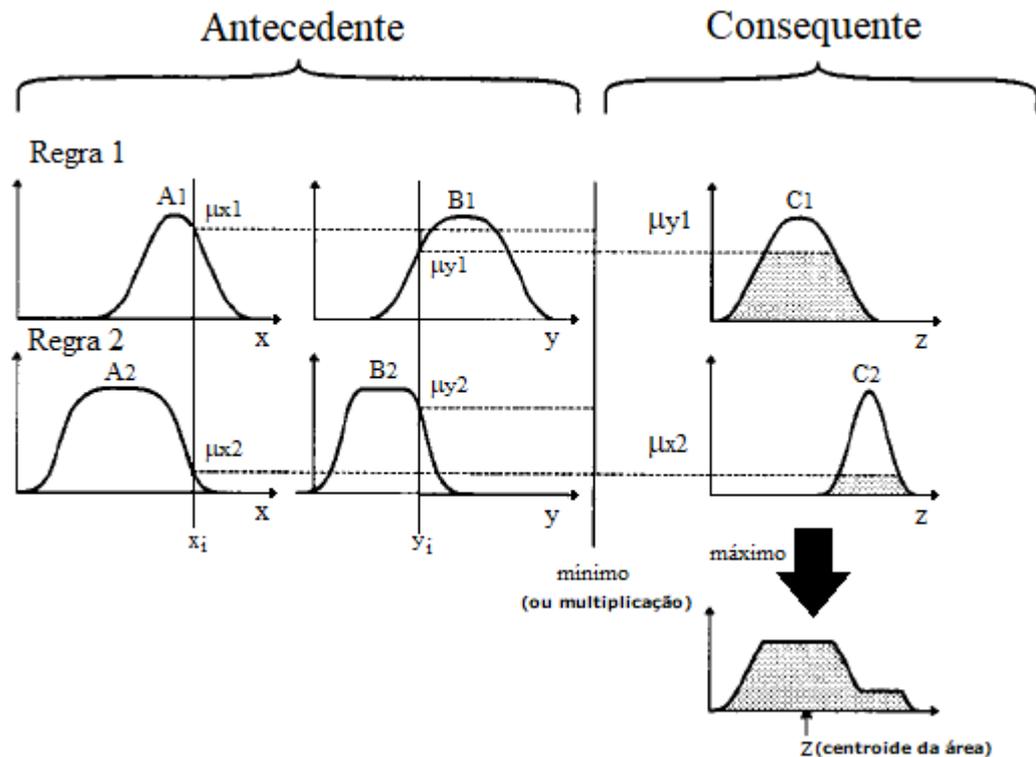
Andrade e Jacques (2008) relatam que os controladores Mamdani e Takagi-Sugeno sofreram aprimoramentos ao longo do tempo e estão disponíveis em pacotes computacionais com diferentes recursos para implementação dos seus componentes, facilitando a solução de diferentes problemas a partir da seleção de um desses tipos básicos de controladores fuzzy.

Detalhes sobre o modelo clássico de Mamdani serão abordados a seguir. O controlador fuzzy tipo Takagi-Sugeno será tratado no Capítulo 4 do presente trabalho.

3.3 Controlador fuzzy tipo Mamdani

Baseado no trabalho pioneiro de Mamdani (1973), o funcionamento do controlador fuzzy tipo Mamdani está resumido na Figura 3.6. No exemplo, o controlador Mamdani possui duas variáveis de entrada (x e y) e utiliza duas regras de inferência fuzzy para descrever a única saída (z). Cada regra é formada por uma parte antecedente responsável pela causa do fenômeno e composta pelas variáveis de entrada e por uma parte consequente relacionada com a consequência e constituída pela variável de saída. As entradas x e y são definidas, respectivamente, pelos conjuntos fuzzy A e B enquanto os conjuntos C permitem delimitar o intervalo de variação de z .

Figura 3.6 – Resumo do funcionamento do controlador fuzzy tipo Mamdani



Fonte: Jang (1993).

Inicialmente, com as funções de pertinências já definidas para cada variável e as duas regras de inferência determinadas, por exemplo, com base no julgamento de especialistas, é realizada a fuzzificação das variáveis de entrada.

Essa fuzzificação é feita considerando o valor da variável de entrada e o seu respectivo grau de pertinência definido pelos limites dos conjuntos fuzzy. Na Regra 1, adotando-se x_i e y_i para as duas entradas, observou-se que x_i pertence ao conjunto A_1 com grau de pertinência μ_{x1} , e y_i pertence ao conjunto B_1 com grau de pertinência μ_{y1} .

Na etapa seguinte que consiste na ativação das regras, os conjuntos fuzzy das entradas são relacionados através dos operadores lógicos “E” e “OU”. O operador “E” deve ser empregado quando houver necessidade de ocorrência concomitante das entradas para refletir algo na saída e equivale a uma operação de intersecção entre seus conjuntos fuzzy. Já o operador “OU” é recomendado para situações onde a ocorrência das entradas não necessita

ser simultânea para provocar algum efeito na saída e corresponde a uma operação de união entre os conjuntos fuzzy. É comum considerar o menor grau de pertinência para o operador “E” entre as funções das entradas. Para o operador “OU”, pode-se adotar o maior grau de pertinência. Pela Regra 1, empregando o conector “E” para relacionar as variáveis x e y , selecionou-se o menor grau de pertinência entre μ_{x1} e μ_{y1} . Na Figura 3.6, observou-se que y apresentou grau de pertinência menor.

Posteriormente, o menor grau de pertinência obtido entre as duas entradas (μ_x e μ_y) é comparado com os graus de pertinência do conjunto fuzzy da saída. Nessa etapa, conhecida como etapa de implicação, a função de implicação de cada regra é definida pelo valor mínimo entre grau de pertinência fornecido na etapa de ativação das regras e o conjunto fuzzy definido para a variável de saída. Assim, a função de implicação da Regra 1 é o conjunto fuzzy C_1 da saída limitado pelo grau de pertinência μ_{y1} .

Após cada regra fornecer sua respectiva função de implicação, os maiores valores de grau de pertinência são agregados e formam uma única função para a variável de saída correspondente. Essa etapa corresponde à agregação das regras.

Por fim, a função de agregação de saída, que é um conjunto fuzzy, deve ser transformada em um valor numérico discreto, etapa esta que corresponde à defuzzificação. Talvez o método de defuzzificação mais popular seja, segundo Mathworks (2006), o método do centróide, que retorna a medida do centro da área da função de saída. Existem outras quatro metodologias que merecem, também, ser mencionadas, os métodos da bissetriz, da média dos máximos (média dos valores com o maior grau de pertinência do conjunto de saída), do maior dos máximos e do menor dos máximos. Usualmente, diferentes metodologias fornecem diferentes resultados para as saídas. Simões e Shaw (2007) fazem recomendações sobre o tipo de método de defuzzificação que pode ser empregado para diversas formas de aplicação do controlador Mamdani.

As diferentes possibilidades para a implementação dos conectores das regras, das funções de implicação e do processo de defuzzificação são, amplamente, discutidas na literatura de acordo com Andrade e Jacques (2008).

Simões e Shaw (2007) afirmam que, apesar de exigirem muitas iterações com os dados de entrada e de saída para a realização de algum ajuste eventual, os controladores fuzzy do tipo Mamdani têm um grande número de vantagens práticas. Para Mathworks (2006),

esses sistemas fuzzy são intuitivos e mais recomendados para implementar o conhecimento de um especialista por seu funcionamento não possibilitar a perda da formulação linguística de suas saídas.

Aplicações de controladores fuzzy do tipo Mamdani na Mecânica das Rochas foram feitas por muitos pesquisadores, como Gokceoglu (2002), Kayabasi et al. (2003), Nefeslioglu et al. (2003), Sonmez et al. (2003), Gokceoglu e Zorlu (2004), Sonmez et al. (2004), Daftaribesheli et al. (2011), Monjezi e Rezaei (2011), Akgun et al. (2012), Asadi (2016) e Sari (2016). Alguns buscaram determinar as propriedades dos maciços rochosos. Outros investigaram os parâmetros das rochas intactas. Porém, nenhum deles verificou o comportamento cisalhante de descontinuidades sem preenchimento. Fato que motivou o desenvolvimento do presente trabalho.

3.4 Metodologia empregada no desenvolvimento do modelo fuzzy Mamdani

Sabendo que o êxito de um modelo de previsão fundamentado em Lógica Fuzzy depende de um conjunto de dados de entrada e saída, preferencialmente, amplo, abrangente e confiável, e do julgamento adequado de um especialista que seja capaz de estabelecer as regras que governam o funcionamento do fenômeno físico. A utilização de exemplos e de regras que não representem com proximidade a realidade do fenômeno estudado pode levar a previsões equivocadas.

O modelo proposto foi definido com base em estudos anteriores que identificaram os principais fatores que governam o comportamento cisalhante de descontinuidades limpas representados pela rigidez normal de contorno (k_n) em kPa/mm, pela tensão normal inicial (σ_{no}) em MPa, pelo coeficiente de rugosidade da descontinuidade (JRC), pela resistência à compressão uniaxial da rocha intacta (σ_c) em MPa, pelo ângulo de atrito básico (ϕ_b) em grau e pelo deslocamento horizontal (δ_h) em mm que foram utilizados como variáveis de entrada na previsão da resistência cisalhante (τ_h) em kPa e da dilatação sofrida pela descontinuidade (δ_v) em mm.

Diante disso, o banco de dados utilizado para desenvolver o modelo fuzzy do tipo Mamdani e prever o comportamento cisalhante das descontinuidades sem preenchimento se baseia em 44 ensaios de cisalhamento direto apresentados por Benmokrane e Ballivy (1989), Skinas et al. (1990), Papaliangas et al. (1993), Indraratna e Haque (2000) e Indraratna et al.

(2010a). Esses ensaios foram realizados em diferentes tipos de descontinuidades e sob diferentes condições de contorno. Esse fato resultou em um conjunto de dados de entrada e saída robusto com 673 exemplos para serem usados na definição das regras do sistema fuzzy.

A implementação do modelo foi feita no *software* MATLAB e considerou o método de inferência proposto por Mamdani (1974). Inicialmente, para o desenvolvimento do modelo, foi necessário definir as propriedades de todas as funções de pertinência de cada variável de entrada do modelo, isto é, tipo de função e os respectivos parâmetros que definem essa função. Entre os tipos de funções disponíveis, optou-se por funções trapezoidais nas extremidades dos intervalos de cada variável e, quando oportuno, por funções triangulares para preencher o restante de valores não contemplados pelas funções trapezoidais.

Os parâmetros das funções de pertinência foram definidos levando em consideração alguns valores fornecidos pela literatura quando disponíveis, os resultados dos ensaios de cisalhamento direto e o julgamento do especialista. Para as variáveis de entrada JRC, σ_c e ϕ_b , foram avaliadas, respectivamente, as sugestões de Barton e Choubey (1977), Bieniawski (1984) e Barton (1973) para a divisão dos intervalos das funções de pertinência. Devido à ausência de dados na literatura sobre as demais variáveis, os parâmetros das funções de pertinência de k_n , σ_{no} , δ_h , τ_h e δ_v foram estabelecidos com base, apenas, nos resultados dos ensaios de cisalhamento direto e na experiência do especialista.

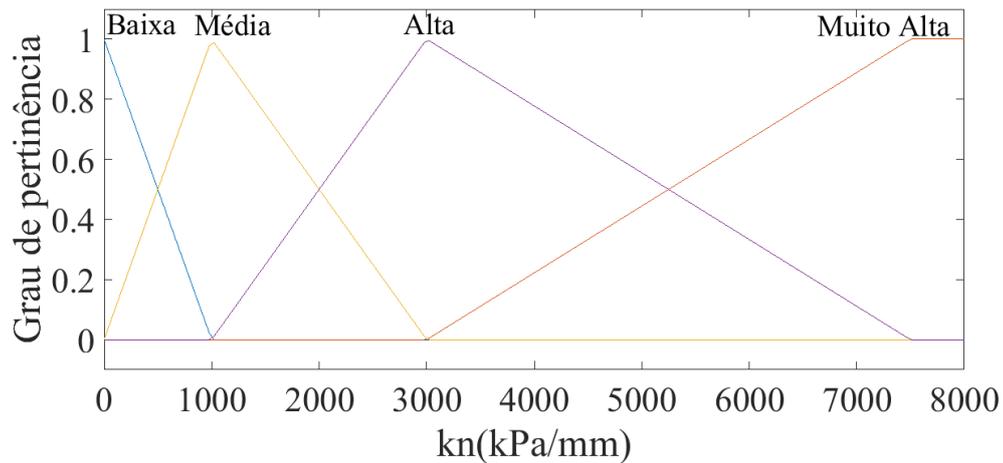
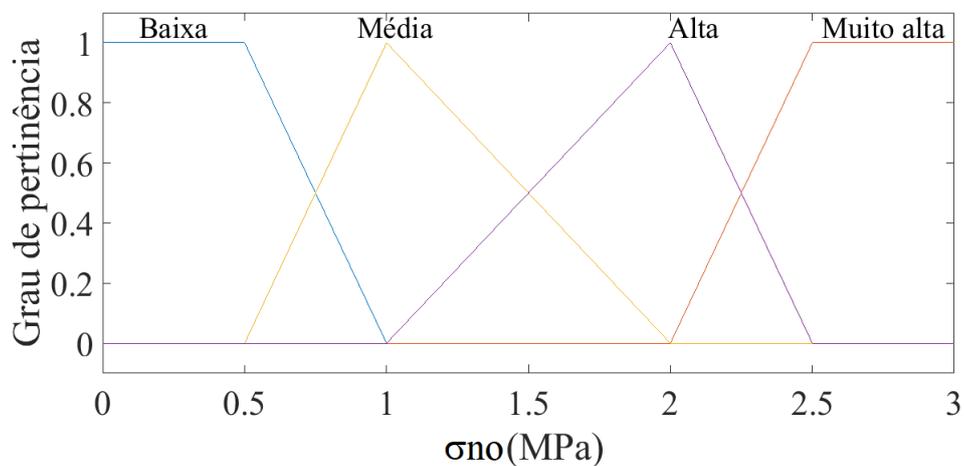
A Tabela 3.1 descreve as funções de pertinência de cada variável com mais detalhes. Os números dentro dos colchetes representam os parâmetros das funções de pertinência das variáveis, a função triangular é definida por três parâmetros e a função trapezoidal por quatro. Os valores extremos dentro dos colchetes representam as medidas com grau de pertinência zero da função e os valores centralizados são as medidas com grau de pertinência um da função. As Figuras 3.7 e 3.8 apresentam, respectivamente, as funções de pertinência das variáveis de entrada e de saída com todas as suas propriedades já definidas.

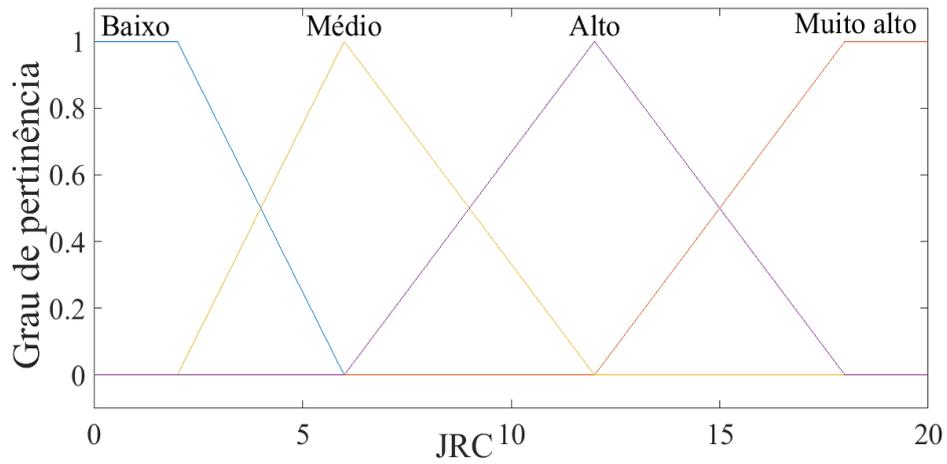
Tabela 3.1 – Parâmetros das funções de pertinência do modelo Mamdani

k_n (kPa/mm)	σ_{no} (MPa)	JRC	σ_c (MPa)	ϕ_b (grau)	δh (mm)	τ_h (kPa)	δv (mm)
Baixa (trapezoidal) [0 0 0 1000]	Baixa (trapezoidal) [0 0 0.5 1]	Baixo (trapezoidal) [0 0 2 6]	Baixa (trapezoidal) [0 0 10 30]	Baixo (trapezoidal) [0 20 27 34]	Baixo (trapezoidal) [0 0 5 25]	Baixa (trapezoidal) [0 0 500 1000]	Compressão (trapezoidal) [-6 -5 -0.5 0.5]
Média (triangular) [0 1000 3000]	Média (triangular) [0.5 1 2]	Médio (triangular) [2 6 12]	Média (triangular) [10 30 60]	Médio (triangular) [27 34 40]	Alto (trapezoidal) [5 25 30 50]	Média (triangular) [500 1000 2000]	Dilatação (trapezoidal) [-0.5 0.5 5 6]
Alta (triangular) [1000 3000 7500]	Alta (triangular) [1 2 2.5]	Alto (triangular) [6 12 18]	Alta (triangular) [30 60 120]	Alto (triangular) [34 40 40 46]	-	Alta (triangular) [1000 2000 4000]	-
Muito alta (trapezoidal) [3000 7500 8000 13000]	Muito alta (trapezoidal) [2 2.5 3 3.5]	Muito alto (trapezoidal) [12 18 20 26]	Muito alta (trapezoidal) [60 120 120 180]	-	-	Muito alta (trapezoidal) [2000 4000 7000 9000]	-

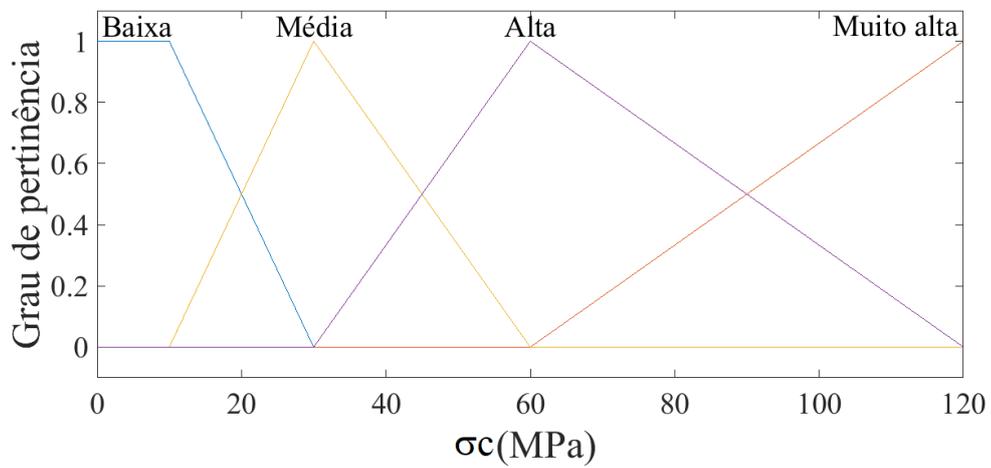
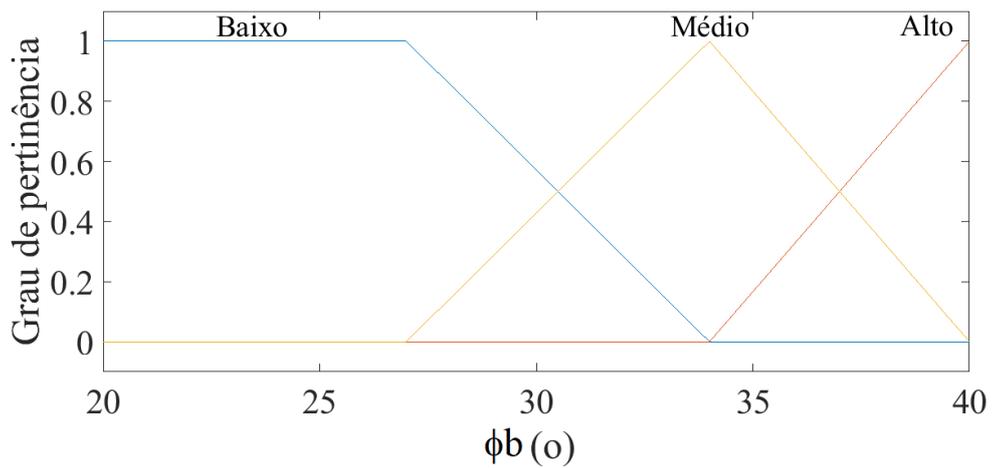
Fonte: elaborada pelo autor.

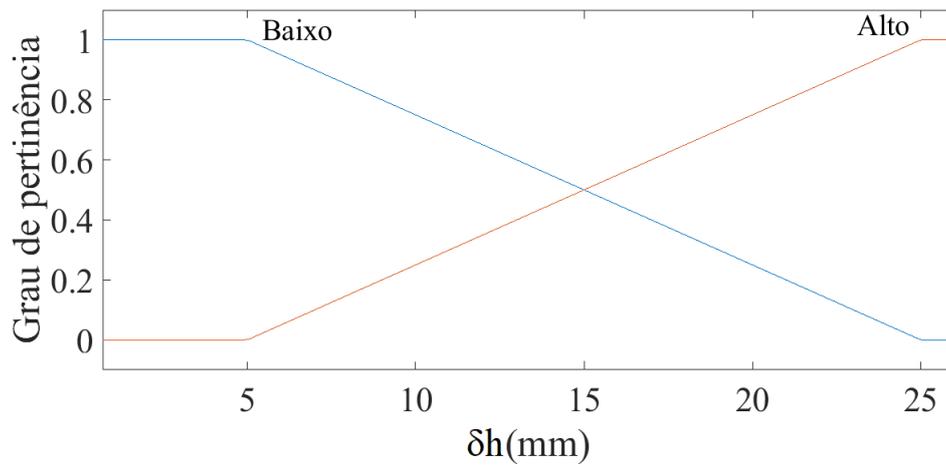
Figura 3.7 – Funções de pertinência das variáveis de entrada do modelo Mamdani

(a) Rigidez normal de contorno (k_n)(b) Tensão normal inicial (σ_{no})



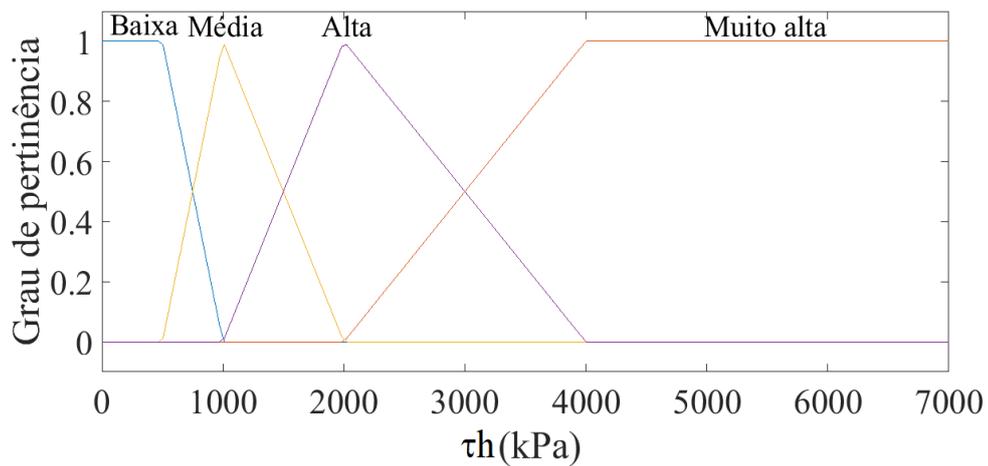
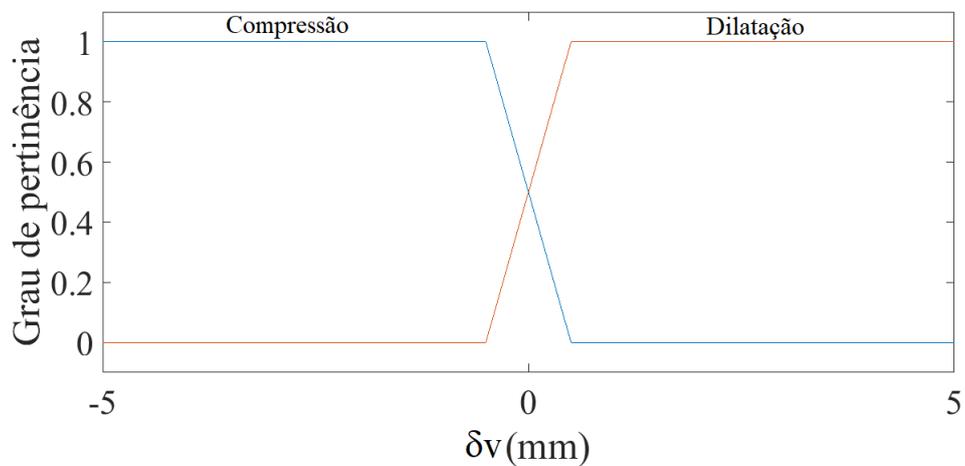
(c) Coeficiente de rugosidade (JRC)

(d) Resistência à compressão da rocha (σ_c)(e) Ângulo de atrito básico (ϕ_b)

(f) Deslocamento horizontal (δ_h)

Fonte: elaborada pelo autor.

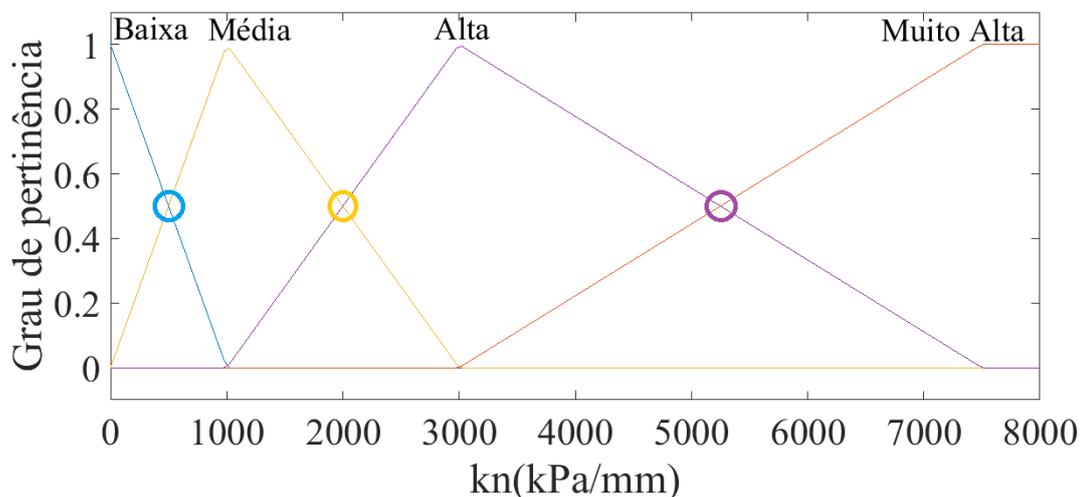
Figura 3.8 – Funções de pertinência das variáveis de saída do modelo Mamdani

(a) Resistência ao cisalhamento (τ_h)(b) Dilatância da descontinuidade (δ_v)

Fonte: elaborada pelo autor.

Vale mencionar que a inclusão das funções foi feita com o intuito de cobrir todo o domínio apresentado pelo valor da variável dentro do conjunto contendo todos os dados experimentais e evitar a redundância entre funções de pertinência. As regras de inferência foram feitas com o auxílio de um programa de planilha eletrônica utilizando filtros e funções lógicas e observando as relações fornecidas nos ensaios, os intervalos definidos para as funções de pertinência e os pontos de intersecção estabelecidos entre as funções de pertinência adjacentes, como pode ser observado na Figura 3.9 para a rigidez normal de contorno (k_n).

Figura 3.9 – Pontos de intersecção estabelecidos entre as funções de pertinência adjacentes de k_n para construção de suas regras de inferência fuzzy



Fonte: elaborada pelo autor.

Dessa maneira, as funções lógicas permitiram definir o conjunto fuzzy de cada variável dos dados experimentais avaliados. Já os filtros viabilizaram a realização de todas as combinações possíveis entre os conjuntos das variáveis. Por exemplo, para k_n , foram utilizadas as seguintes funções lógicas:

SE $k_n \leq 500$ ENTÃO $k_n =$ Baixa

SE $500 < k_n \leq 2000$ ENTÃO $k_n =$ Média

SE $2000 < k_n \leq 5250$ ENTÃO $k_n =$ Alta

SE $k_n > 5250$ ENTÃO $k_n =$ Muito alta

Nesse caso, para o conjunto de dados analisado, qualquer valor de k_n que seja menor ou igual a 500 kPa/mm pertencerá a “Baixa”. O filtro foi, então, utilizado para fornecer as diversas combinações possíveis de “Baixa” com as outras variáveis pelos dados

experimentais. O mesmo procedimento foi realizado para o restante das variáveis, permitindo definir, ao final do processo, todas as regras de inferência fuzzy do modelo.

As regras foram adotadas na forma de dois sistemas MISO (*Multiple Input Single Output*), ou seja, com 6 variáveis de entrada cada um e uma única saída, τ_h ou δ_v . Ao final da definição das regras de inferência fuzzy, os modelos fuzzy para previsão de τ_h e δ_v apresentaram, nessa ordem, 57 e 39 regras as quais estão apresentadas no Apêndice A.

Finalmente, com os dois conjuntos de regras de inferência concluídos, foi realizada uma análise sensibilidade do modelo a fim de verificar a sua acurácia em relação aos dados dos ensaios e a influência das variáveis de entrada e dos tipos de função de pertinência nos resultados da previsão.

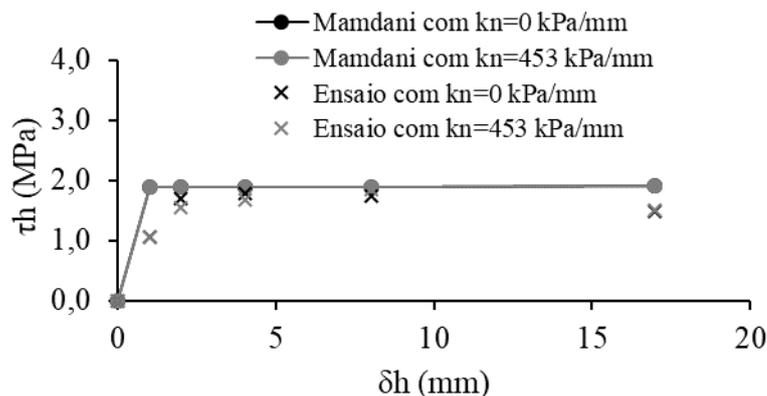
3.5 Apresentação e discussão dos resultados

3.5.1 Apresentação do modelo Mamdani

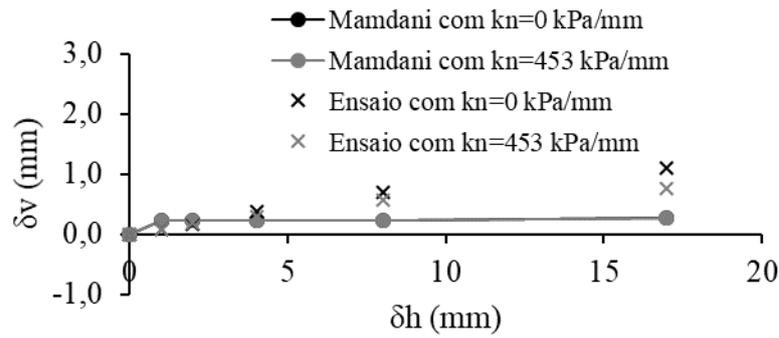
As Figuras 3.10 a 3.13 apresentam uma comparação entre previsões do comportamento cisalhante das discontinuidades pelo modelo fuzzy tipo Mamdani e medições dos ensaios de cisalhamento direto para uma dada combinação de valores das variáveis de entrada, buscando verificar a concordância na resposta do modelo com relação ao efeito da variação de cada parâmetro.

É válido ressaltar que, devido à limitação de dados dos ensaios, não foi possível, em alguns casos, isolar a influência de apenas uma variável na resistência ao cisalhamento e na dilatância.

Figura 3.10 – Modelo Mamdani: comparação da influência de k_n para $\sigma_{no} = 1,63$ MPa, $JRC = 4$, $\sigma_c = 12$ MPa e $\phi_b = 37,5$ graus

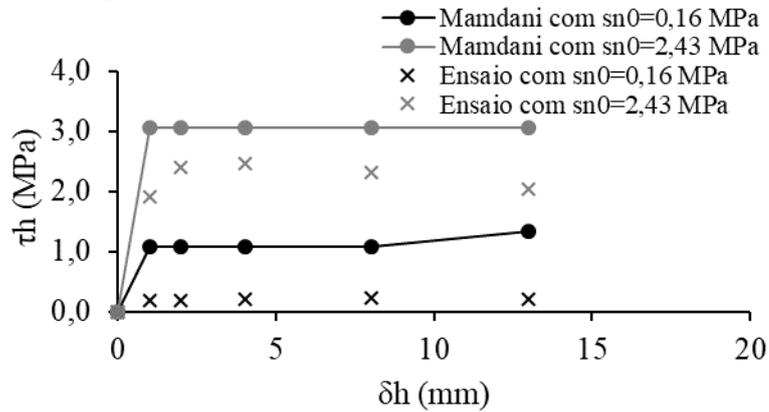
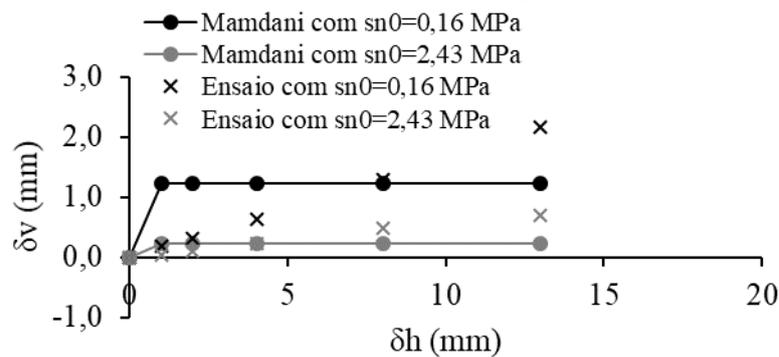


(a) Valores observados e previstos de τ_h

(b) Valores observados e previstos de δv

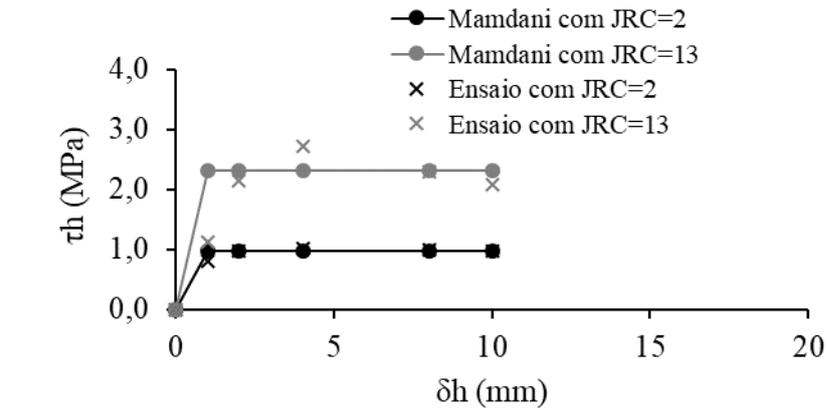
Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 3.11 – Modelo Mamdani: comparação da influência de σ_{no} para $k_n = 0$ kPa/mm, $JRC = 4$, $\sigma_c = 12$ MPa e $\phi_b = 37,5$ graus

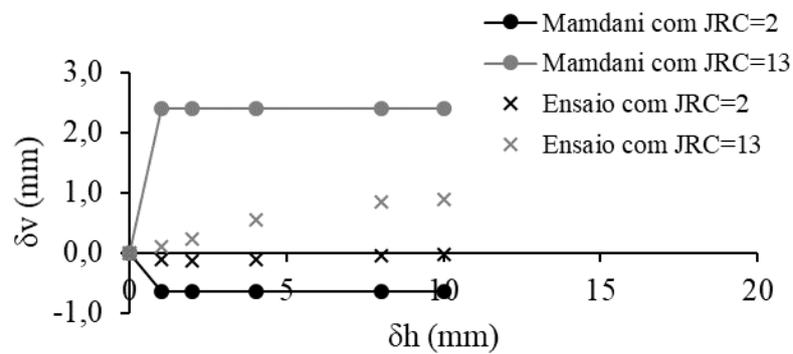
(a) Valores observados e previstos de τ_h (b) Valores observados e previstos de δv

Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 3.12 – Modelo Mamdani: comparação da influência de JRC para $k_n = 453$ kPa/mm, $\sigma_{no} = 1,63$ MPa, $\sigma_c = 20$ e 12 MPa e $\phi_b = 32$ e $37,5$ graus



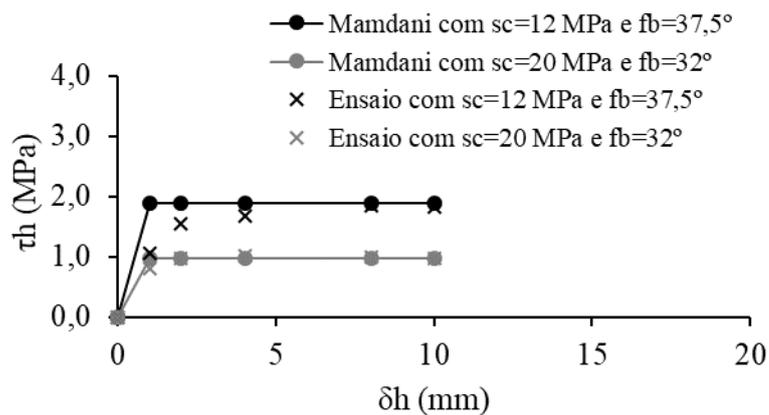
(a) Valores observados e previstos de τ_h



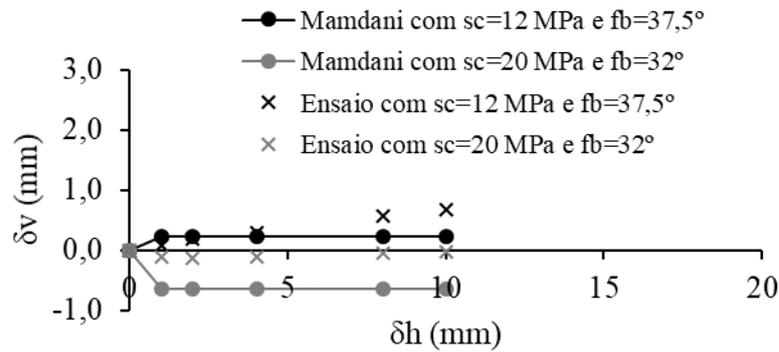
(b) Valores observados e previstos de δv

Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 3.13 – Modelo Mamdani: comparação da influência de σ_c e ϕ_b para $k_n = 453$ kPa/mm, $\sigma_{no} = 1,63$ MPa, JRC = 4 e 2



(a) Valores observados e previstos de τ_h

(b) Valores observados e previstos de δ_v

Fonte: elaborada pelo autor.

Observou-se que, de uma forma geral, o sistema fuzzy se mostrou, relativamente, próximo quanto ao comportamento e à ordem de grandeza das medições dos ensaios. Porém, para alguns cenários, o modelo se desviou dos valores medidos nos ensaios. Situação observada nas Figuras 3.11a e 3.12b por exemplo.

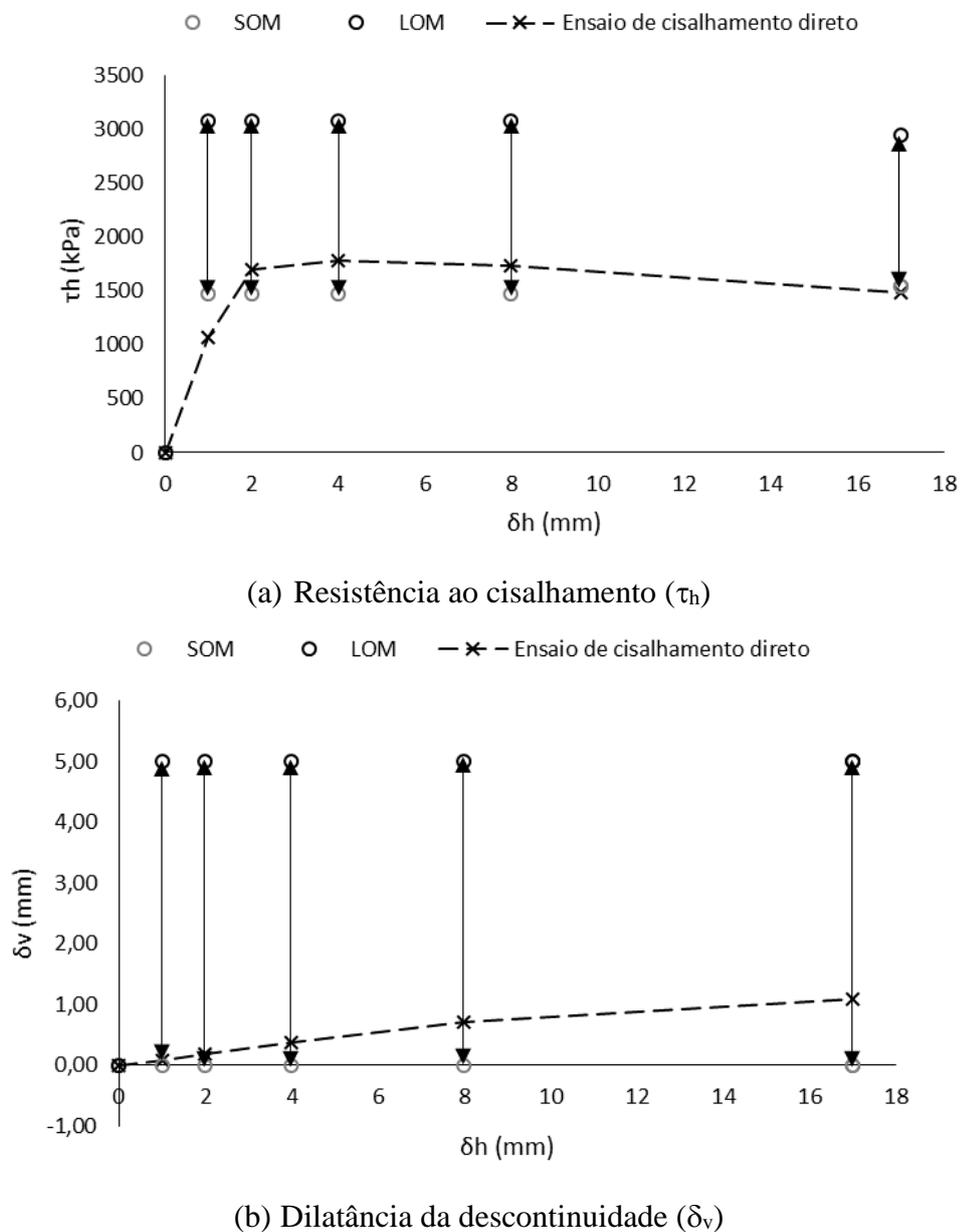
3.5.2 Avaliação de intervalos de previsão para τ_h e δ_v

Devido à particularidade da metodologia de inferência sugerida por Mamdani (1974), foi possível desenvolver códigos no MATLAB que permitissem definir, com base nos valores das entradas, um intervalo de variação para τ_h e δ_v . Para a definição dessas margens de variação, foram adotadas duas metodologias. A primeira metodologia considera que os valores experimentais de τ_h e δ_v estão entre os limites estabelecidos pelo menor dos valores com o maior grau de pertinência da função de agregação – *Smallest Of Maximum* (SOM) – e pelo maior dos valores com o maior grau de pertinência – *Largest Of Maximum* (LOM). Dessa maneira, o limite inferior é delimitado pelo menor dos máximos e o limite superior pelo maior dos máximos. Uma descrição mais detalhada sobre esses processos pode ser encontrada em Mathworks (2006) e Simões e Shaw (2007).

Outra alternativa é assumir que os valores experimentais de τ_h e δ_v estejam dentro da margem definida pelo maior dos menores limites inferiores e pelo menor dos maiores limites superiores. Para isso, cada regra é defuzzificada duas vezes pelos métodos LOM e SOM gerando uma margem de variação por regra. São selecionados, então, o maior entre os menores dos máximos para ser o limite inferior do intervalo e o menor entre os maiores dos máximos para ser o limite superior do intervalo. A definição das margens de variação dos

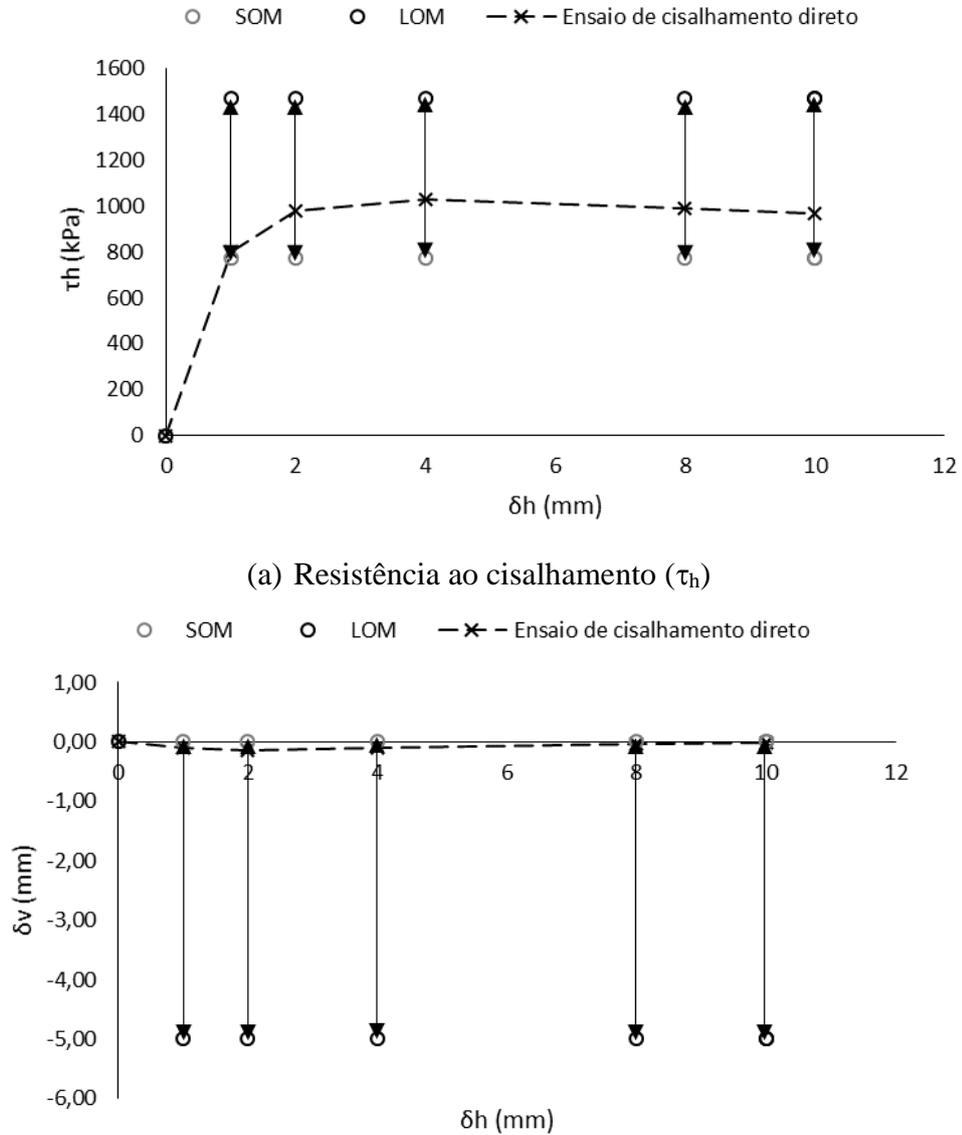
valores experimentais de τ_h e δ_v pode ser bastante proveitosa para o julgamento do engenheiro geotécnico durante a análise de problemas práticos. As Figuras 3.14 a 3.17 apresentam os resultados de ensaios de cisalhamento direto com as margens de variação de τ_h e δ_v estimadas por suas respectivas metodologias com o intuito de selecionar a melhor alternativa entre as duas. No Apêndice B, são exibidos os códigos no MATLAB para obtenção dos limites superior e inferior de cada uma das metodologias mencionadas.

Figura 3.14 – Determinação dos limites de τ_h e δ_v pelos métodos do menor dos máximos (SOM) e do maior dos máximos (LOM) para $k_n = 0$ kPa/mm, $\sigma_{no} = 1,63$ MPa, $JRC = 4$ e $\sigma_c = 12$ e $\phi_b = 37,5$ graus



Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 3.15 – Determinação dos limites de τ_h e δ_v pelos métodos do menor dos máximos (SOM) e do maior dos máximos (LOM) para $k_n = 453$ kPa/mm, $\sigma_{no} = 1,63$ MPa, $JRC = 2$ e $\sigma_c = 20$ e $\phi_b = 32$ graus

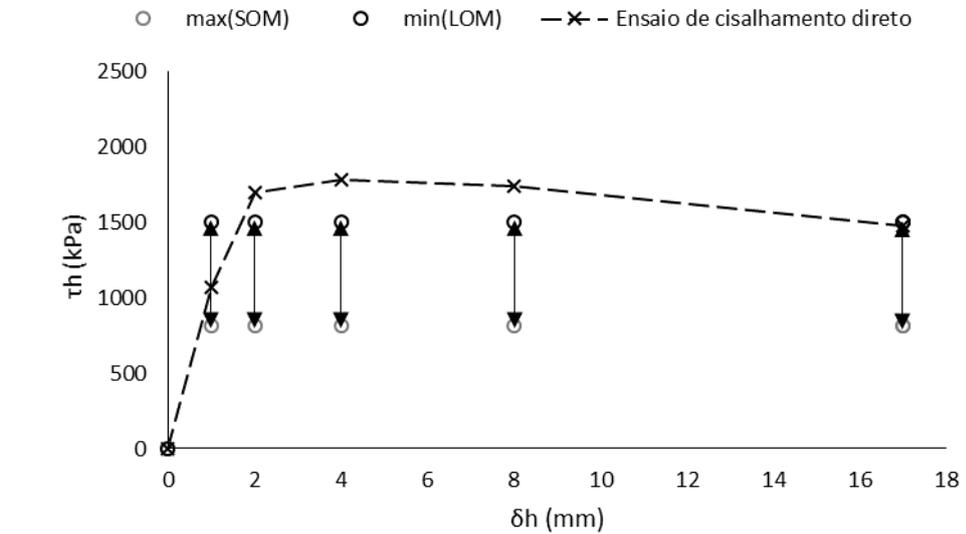


(a) Resistência ao cisalhamento (τ_h)

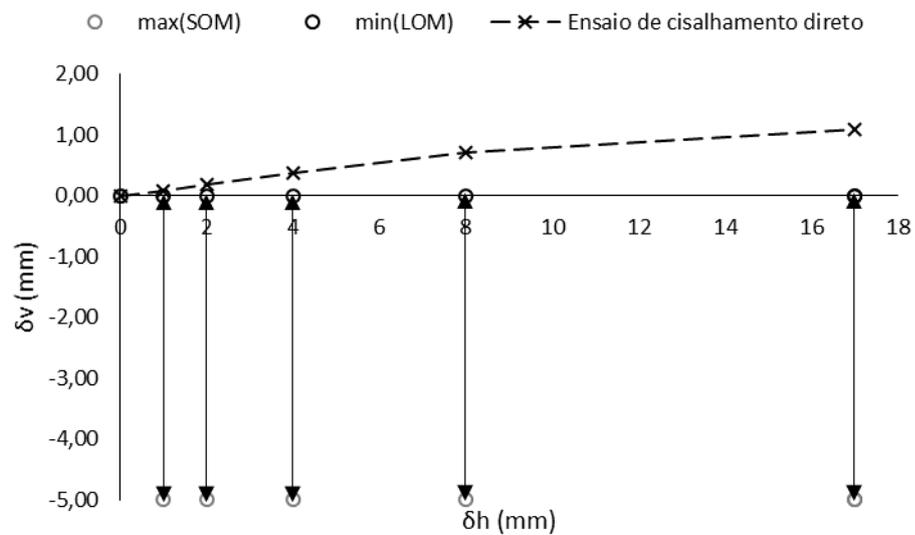
(b) Dilatância da descontinuidade (δ_v)

Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 3.16 – Determinação dos limites de τ_h e δ_v utilizando o maior entre os menores dos máximos e o menor entre os maiores dos máximos para $k_n = 0$ kPa/mm, $\sigma_{no} = 1,63$ MPa, $JRC = 4$ e $\sigma_c = 12$ e $\phi_b = 37,5$ graus



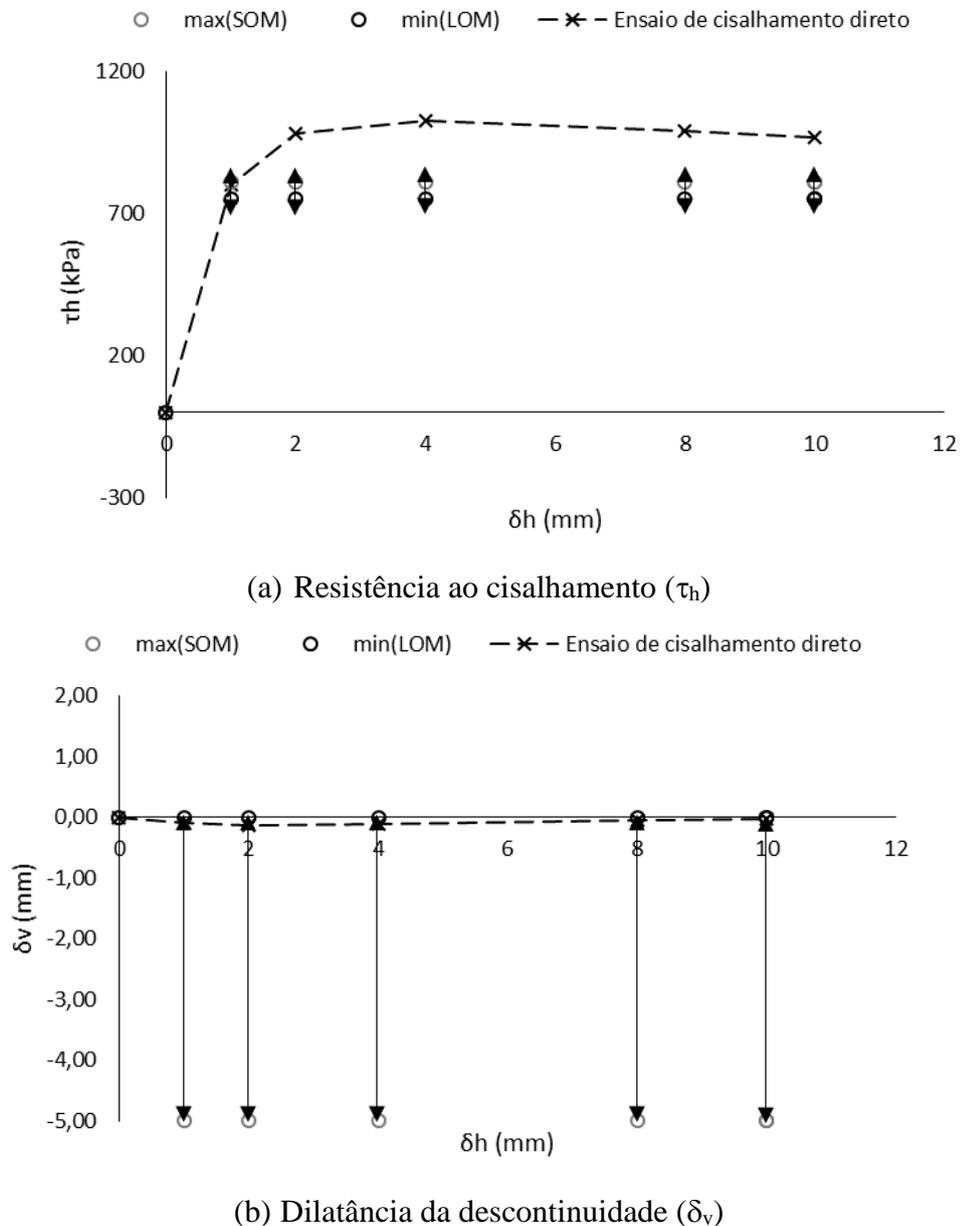
(a) Resistência ao cisalhamento (τ_h)



(b) Dilatância da descontinuidade (δ_v)

Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 3.17 – Determinação dos limites de τ_h e δ_v utilizando o maior entre os menores dos máximos e o menor entre os maiores dos máximos para $k_n = 453$ kPa/mm, $\sigma_{no} = 1,63$ MPa, $JRC = 2$ e $\sigma_c = 20$ e $\phi_b = 32$ graus



Fonte: elaborada pelo autor.

Ficou evidenciado que o procedimento utilizando o método do menor dos máximos (SOM) e o método do maior dos máximos (LOM) mostrou resultados mais satisfatórios, pois os valores experimentais de τ_h e δ_v se encontraram dentro do intervalo definido em todas as análises realizadas, apesar de as diferenças entre os limites superior e inferior serem relativamente elevadas. Para τ_h , por exemplo, a diferença chegou a ser próxima do dobro e os valores experimentais estavam mais próximos do limite inferior. Além disso, o intervalo de variação não se mostrou proveitoso na estimativa da resistência ao cisalhamento

para deslocamentos horizontais menores que 2 mm. Entretanto, do ponto de vista prático, o modelo permitiu definir o menor valor de resistência cisalhante que pode ser adotado diante das incertezas envolvidas.

No que diz respeito à δ_v , as margens de variação foram relevantes apenas para confirmar a ocorrência de dilatação ou compressão das descontinuidades durante o processo de cisalhamento, já que todas as análises exibiram a mesma diferença entre os limites máximo e mínimo de 5 mm em módulo.

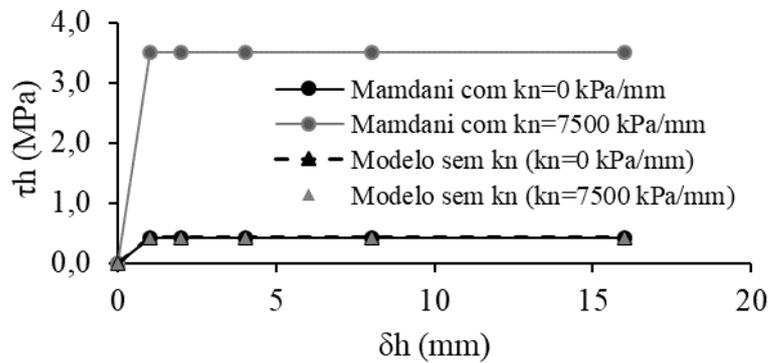
No capítulo 6 desta dissertação, onde será feita uma aplicação prática do modelo fuzzy Mamdani, essa metodologia poderá se mostrar como uma alternativa bastante útil para o julgamento do engenheiro geotécnico durante as previsões de τ_h e δ_v .

3.5.3 Análises de sensibilidade do modelo Mamdani

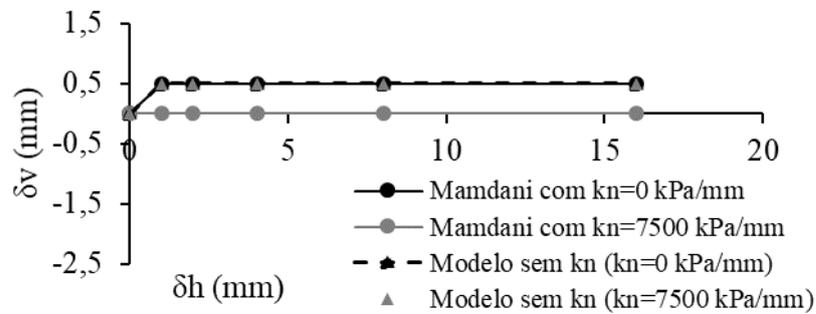
Visando analisar a sensibilidade do modelo fuzzy à variação de seus parâmetros de entrada, outros 5 modelos foram criados a partir do modelo fuzzy original. Cada um desses modelos foi obtido removendo-se uma das variáveis de entrada do sistema completo com exceção do deslocamento horizontal (δ_h).

Assim, as previsões dos modelos incompletos foram confrontadas com os resultados do modelo original levando em consideração a máxima variação possível dos parâmetros de entrada de forma a cobrir todo o seu domínio estabelecido. As Figuras 3.18 a 3.22 ilustram as respostas dos modelos ao efeito da variação de cada uma das entradas.

Figura 3.18 – Análise de sensibilidade da influência de k_n para $\sigma_{no} = 0,05$ MPa, $JRC = 2$, $\sigma_c = 3,5$ MPa e $\phi_b = 30$ graus



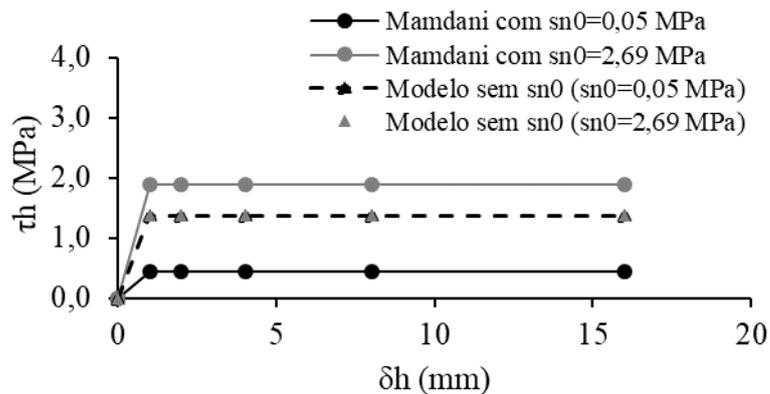
(a) Valores previstos de τ_h



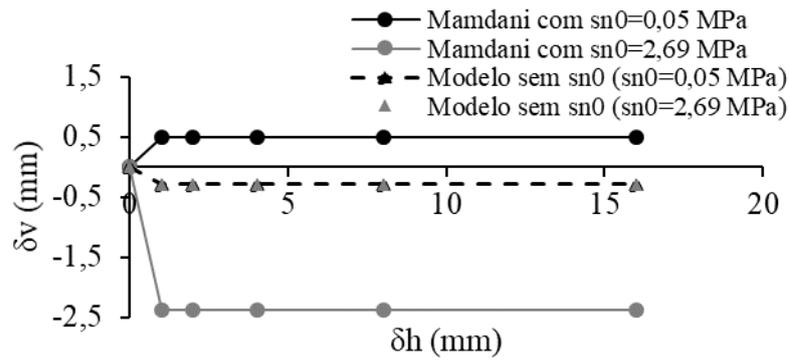
(b) Valores previstos de δv

Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 3.19 – Análise de sensibilidade da influência de σ_{no} para $k_n = 0$ kPa/mm, $JRC = 2$, $\sigma_c = 3,5$ MPa e $\phi_b = 30$ graus

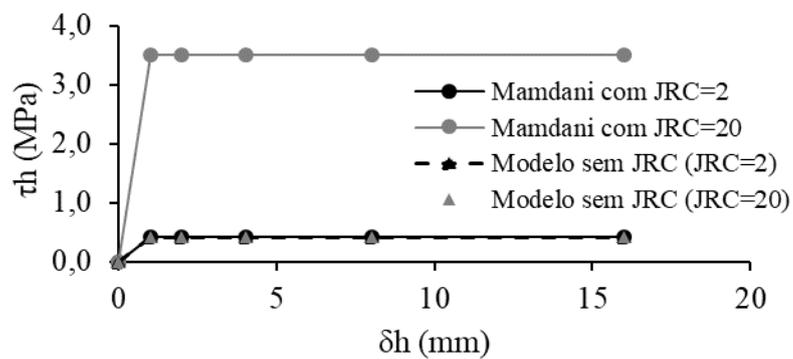
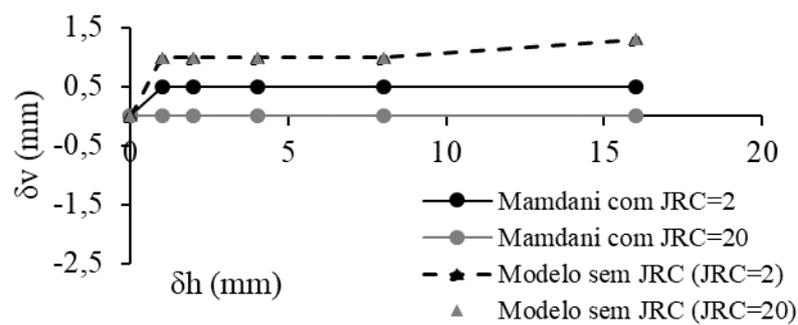


(a) Valores previstos de τ_h

(b) Valores previstos de δv

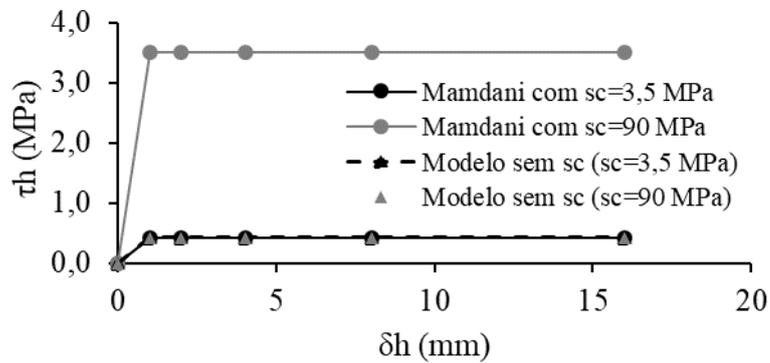
Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 3.20 – Análise de sensibilidade da influência de JRC para $k_n = 0$ kPa/mm, $\sigma_{no} = 0,05$ MPa, $\sigma_c = 3,5$ MPa e $\phi_b = 30$ graus

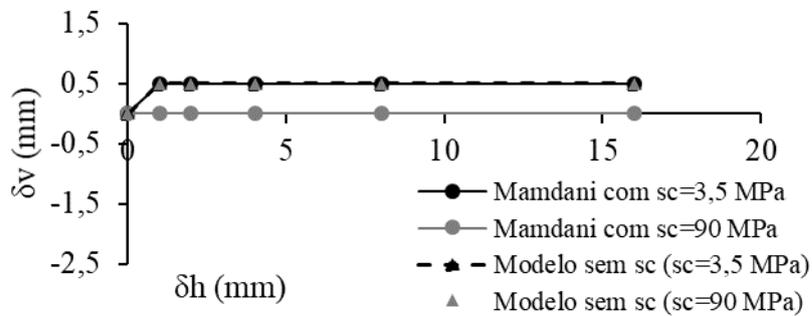
(a) Valores previstos de τ_h (b) Valores previstos de δv

Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 3.21 – Análise de sensibilidade da influência de σ_c para $k_n = 0$ kPa/mm, $\sigma_{no} = 0,05$ MPa, $JRC = 2$ e $\phi_b = 30$ graus



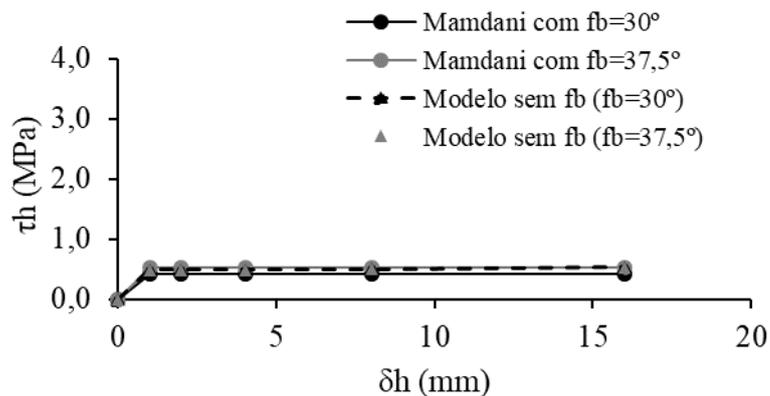
(a) Valores previstos de τ_h



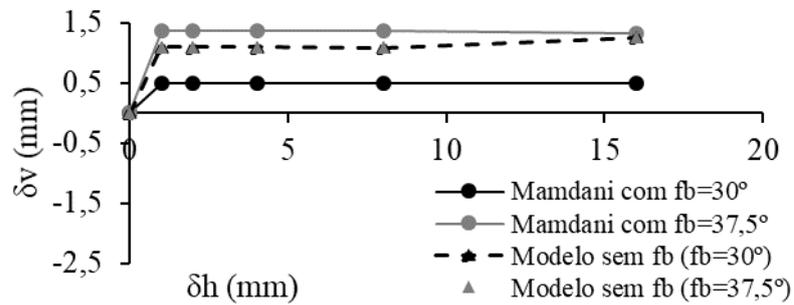
(b) Valores previstos de δ_v

Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 3.22 – Análise de sensibilidade da influência de ϕ_b para $k_n = 0$ kPa/mm, $\sigma_{no} = 0,05$ MPa, $JRC = 2$ e $\sigma_c = 3,5$ MPa



(a) Valores previstos de τ_h

(b) Valores previstos de δ_v

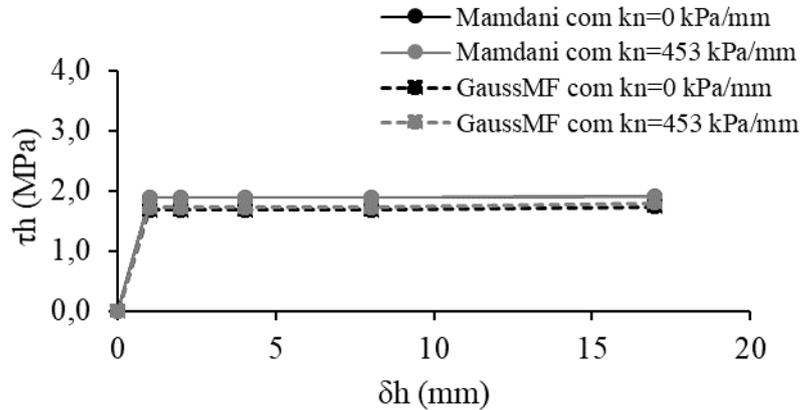
Fonte: elaborada pelo autor.

Constatou-se que os 5 modelos incompletos não identificaram a influência da respectiva variável removida na determinação de τ_h e δ_v , pois apresentaram a mesma previsão independente da mudança no parâmetro de entrada. Dessa forma, ficou evidenciada a importância de ter utilizado os principais fatores que governam o comportamento cisalhante de descontinuidades limpas como entrada no modelo fuzzy, tendo em vista que a não consideração do efeito de qualquer uma das variáveis selecionadas poderia conduzir a previsões bem discordantes da realidade física do fenômeno.

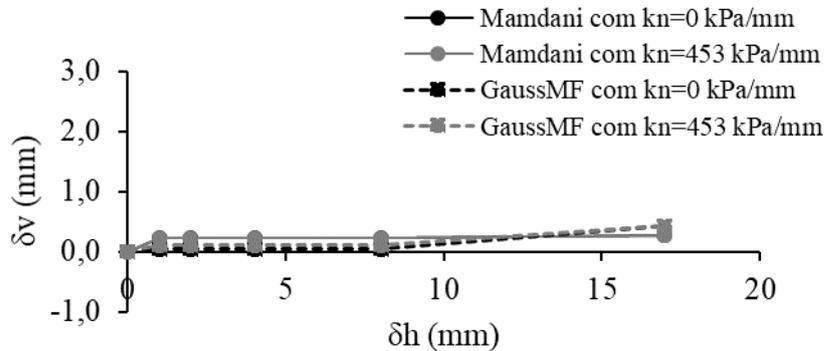
Por fim, uma análise de sensibilidade da mudança do tipo de função de pertinência foi realizada com o intuito de investigar seu efeito na resposta do modelo fuzzy conforme indicam as Figuras 3.23 a 3.26. Para isso, um novo sistema fuzzy foi desenvolvido substituindo-se as funções trapezoidais e triangulares do modelo original por funções gaussianas.

Observou-se que os dois sistemas analisados exibiram curvas com comportamentos semelhantes e resultados pouco discordantes. Desse modo, justifica-se a utilização de funções trapezoidais e triangulares que, por serem menos complexas que as funções gaussianas, reduzem o tempo de cálculo computacional das previsões.

Figura 3.23 – Análise de sensibilidade da influência do tipo de função de pertinência em valores previstos de τ_h e δ_v para $k_n = 0$ e 453 kPa/mm, $\sigma_{no} = 1,63$ MPa, $JRC = 4$, $\sigma_c = 12$ MPa e $\phi_b = 37,5$ graus



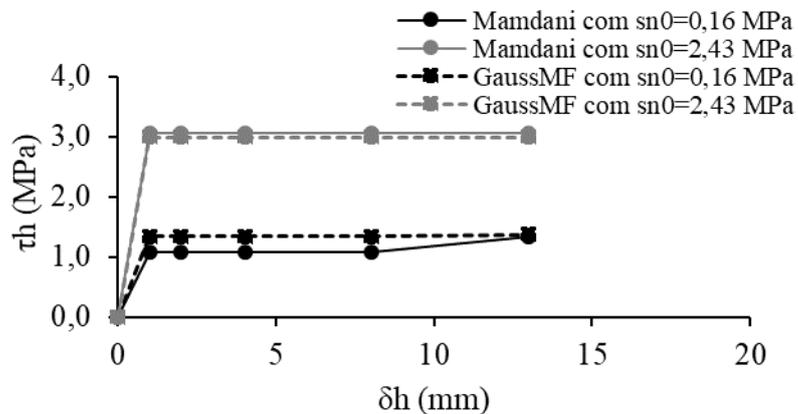
(a) Valores previstos de τ_h



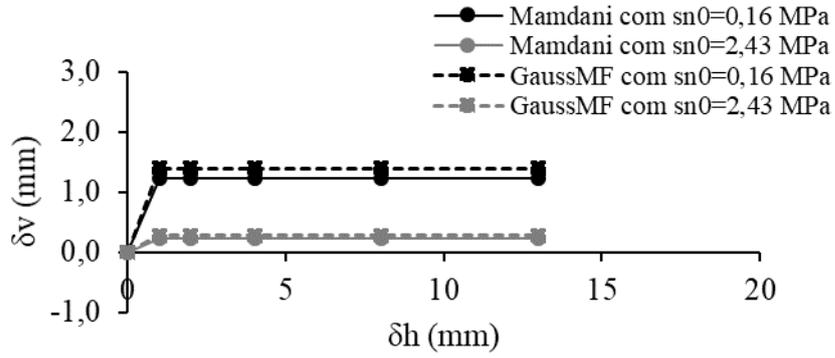
(b) Valores previstos de δ_v

Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 3.24 – Análise de sensibilidade da influência do tipo de função de pertinência em valores previstos de τ_h e δ_v para $k_n = 0$ kPa/mm, $\sigma_{no} = 0,16$ e $2,43$ MPa, $JRC = 4$, $\sigma_c = 12$ MPa e $\phi_b = 37,5$ graus



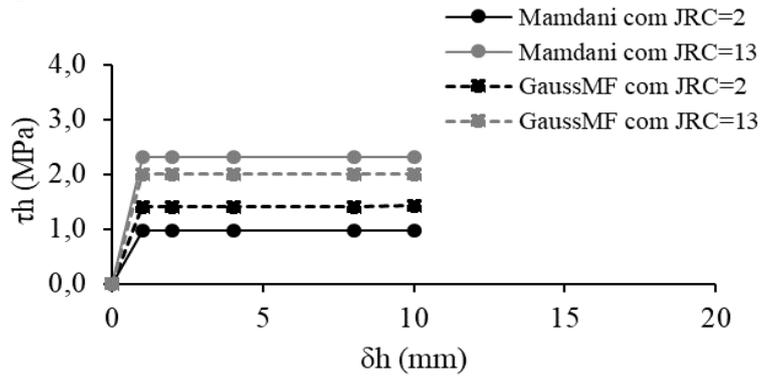
(a) Valores previstos de τ_h



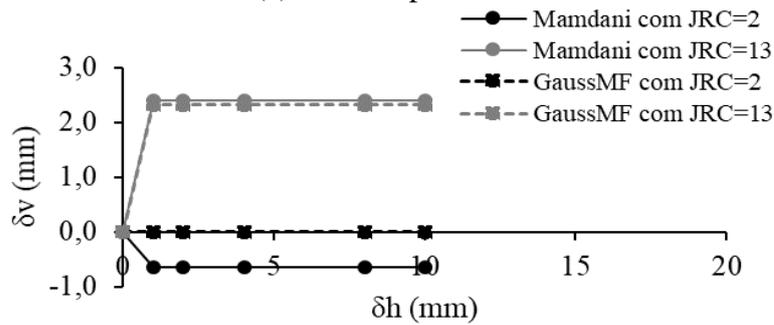
(b) Valores previstos de δ_v

Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 3.25 – Análise de sensibilidade da influência do tipo de função de pertinência em valores previstos de τ_h e δ_v para $k_n = 453$ kPa/mm, $\sigma_{n0} = 1,63$ MPa, $JRC = 2$ e 13 , $\sigma_c = 20$ e 12 MPa e $\phi_b = 32$ e $37,5$ graus



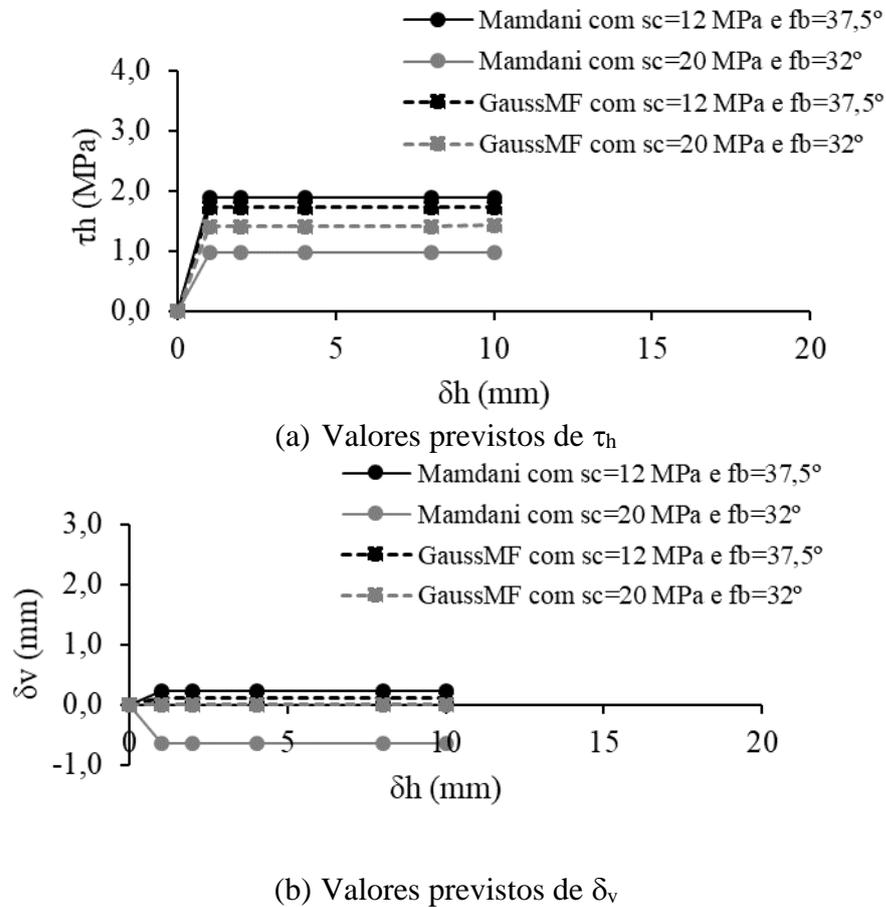
(a) Valores previstos de τ_h



(b) Valores previstos de δ_v

Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 3.26 – Análise de sensibilidade da influência do tipo de função de pertinência em valores previstos de τ_h e δ_v para $k_n = 453$ kPa/mm, $\sigma_{no} = 1,63$ MPa, $JRC = 4$ e 2 , $\sigma_c = 12$ e 20 MPa e $\phi_b = 37,5$ e 32 graus

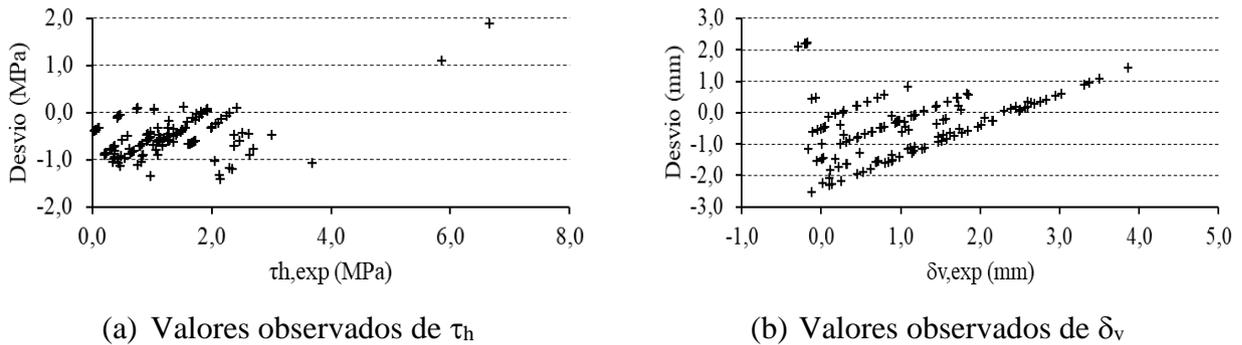


Fonte: elaborada pelo autor.

3.5.4 Avaliação do desempenho do modelo Mamdani

A fim de avaliar melhor o desempenho do controlador Mamdani são apresentados, na Figura 3.27, os desvios de τ_h e δ_v em relação a uma parcela representativa de todo o conjunto de dados utilizado na construção do modelo com 134 exemplos de entrada e saída.

Figura 3.27 – Desvios do modelo fuzzy tipo Mamdani



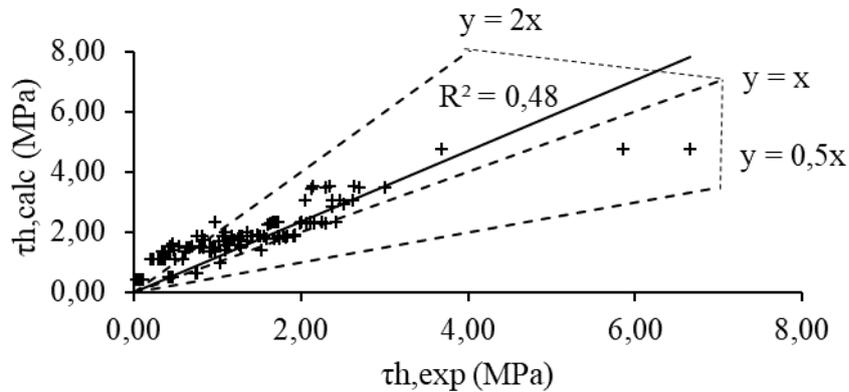
Fonte: elaborada pelo autor.

No que diz respeito à dilatação, os maiores desvios observados foram de -2,53 e -2,30 mm relativos aos dados dos ensaios de Indraratna e Haque (2000) e de Skinas et al. (1990) e que ocorreram para medidas de δ_v próximas de zero. O modelo não ofereceu bons resultados para pequenos valores de δ_v . Seu desempenho melhorou conforme os valores experimentais de dilatação aumentaram. As previsões foram razoáveis entre os dados onde δ_v experimental variou de 1,50 a 3,50 mm com desvios absolutos menores ou iguais a 1 mm. Isso mostra que as regras de inferência fuzzy desenvolvidas por meio de julgamento de especialistas e com base no conjunto de dados de ensaios não conseguiram explicar, de forma adequada, o fenômeno da dilatação das descontinuidades limpas pelo modelo Mamdani.

Com relação à resistência ao cisalhamento, os maiores desvios foram de 1,89 e -1,40 MPa que correspondem, respectivamente, aos dados dos ensaios de Benmokrane e Ballivy (1989) em descontinuidades muito resistentes, com σ_c de 90 MPa, e Indraratna e Haque (2000) em descontinuidades brandas, com σ_c de 12 MPa.

A avaliação da performance do modelo Mamdani para τ_h pode ser melhor compreendida através da Figura 3.28, que retrata a relação entre valores observados e calculados de τ_h a partir da mesma parcela do conjunto de dados usada nos desvios. Foi possível constatar que o modelo fuzzy Mamdani exibiu um valor insatisfatório de coeficiente de determinação, superestimando os valores de τ_h para a maioria dos casos e revelando que não consegue explicar, de maneira razoável, sua variação durante o processo de cisalhamento de descontinuidades limpas.

Figura 3.28 – Correlação entre τ_h medido e calculado pelo modelo fuzzy tipo Mamdani



Fonte: elaborada pelo autor.

3.6 Conclusões parciais

O modelo fuzzy Mamdani proposto foi resultado da utilização de um conjunto de dados robusto com 673 exemplos e definido com base em estudos anteriores que identificaram os principais fatores que governam o comportamento cisalhante de descontinuidades limpas.

Por meio do modelo fuzzy desenvolvido, a resistência ao cisalhamento pode ser calculada diretamente ou, de forma indireta, utilizando a dilatância, parâmetro essencial para a determinação de τ_h em alguns dos principais modelos analíticos existentes, como o de Indraratna e Haque (2000) cuja obtenção de δ_v é restrita às limitações do equipamento de ensaio e do processo de amostragem.

As análises de sensibilidade realizadas confirmaram a importância da utilização dos principais fatores que governam o comportamento cisalhante de descontinuidades limpas como entrada no sistema fuzzy Mamdani e justificaram a utilização de funções de pertinência trapezoidais e triangulares no modelo original a fim de reduzir o tempo de cálculo computacional de suas previsões.

Pelas análises dos resultados obtidos, ficou evidenciado que, de uma forma geral, o sistema fuzzy se mostrou relativamente próximo quanto ao comportamento e à ordem de grandeza dos resultados experimentais. Contudo, o modelo revelou ser pouco sensível às variações da resistência ao cisalhamento e da dilatância ao longo da movimentação das descontinuidades. É importante mencionar que o modelo proposto não considera os efeitos da pressão de água nem das condições de drenagem das descontinuidades. Evidentemente,

também não avalia a influência do material preenchimento no comportamento cisalhante das descontinuidades.

Os desvios evidenciaram que as regras de inferência fuzzy desenvolvidas por meio de julgamento de especialistas e com base no conjunto de dados de ensaios não conseguiram explicar, de forma adequada, o fenômeno da dilatação das descontinuidades limpas pelo modelo Mamdani.

A correlação entre τ_h medido e calculado mostrou que, para a maioria dos casos, o modelo Mamdani superestima os valores de τ_h , revelando que não consegue explicar, de maneira razoável, sua variação durante o processo de cisalhamento de descontinuidades limpas.

Uma alternativa que pode ser mostrar bastante proveitosa para o julgamento do engenheiro geotécnico durante as previsões de τ_h e δ_v é a definição das margens de imprecisão de seus valores experimentais. Foi constatado que o procedimento utilizando o método do menor dos máximos (SOM) e o método do maior dos máximos (LOM) mostrou resultados mais satisfatórios, pois os valores experimentais de τ_h e δ_v se encontraram dentro do intervalo definido em todas as análises realizadas, apesar de as diferenças entre os limites superior e inferior serem relativamente grandes. Todavia, no que diz respeito à τ_h , o intervalo de variação não se mostrou proveitoso para pequenos deslocamentos horizontais, inferiores a 2 mm. Entretanto, do ponto de vista prático, o modelo permitiu definir o menor valor de resistência cisalhante que pode ser adotado diante das incertezas envolvidas. Para δ_v , as margens de variação foram relevantes apenas para confirmar a ocorrência de dilatação ou compressão das descontinuidades durante o processo de cisalhamento.

Finalmente, constatou-se que o modelo fuzzy tipo Mamdani é limitado pelos domínios de suas variáveis de entrada os quais são definidos durante sua construção, ou seja, ele não permite que sejam inseridas em seus dados de entrada medidas que estejam fora do seu intervalo de atuação preestabelecido. No presente trabalho, o sistema fuzzy ficou condicionado, portanto, ao domínio das medições dos ensaios de cisalhamento direto para a maioria de seus parâmetros. Entretanto, esses domínios podem sofrer ajustes na medida em que novos conjuntos de dados estejam disponíveis. Além disso o modelo fuzzy proposto, a princípio, necessita do *software* MATLAB para a realização de suas previsões, não sendo possível ainda a sua utilização em outros programas mais acessíveis.

Outros modelos baseados na Lógica Fuzzy serão desenvolvidos buscando explicar, de forma mais eficiente, o comportamento mecânico das descontinuidades limpas durante o processo de cisalhamento.

4 MODELO FUZZY TIPO TAKAGI-SUGENO PARA PREVISÃO DO COMPORTAMENTO CISALHANTE DE DESCONTINUIDADES SEM PREENCHIMENTO EM MACIÇOS ROCHOSOS

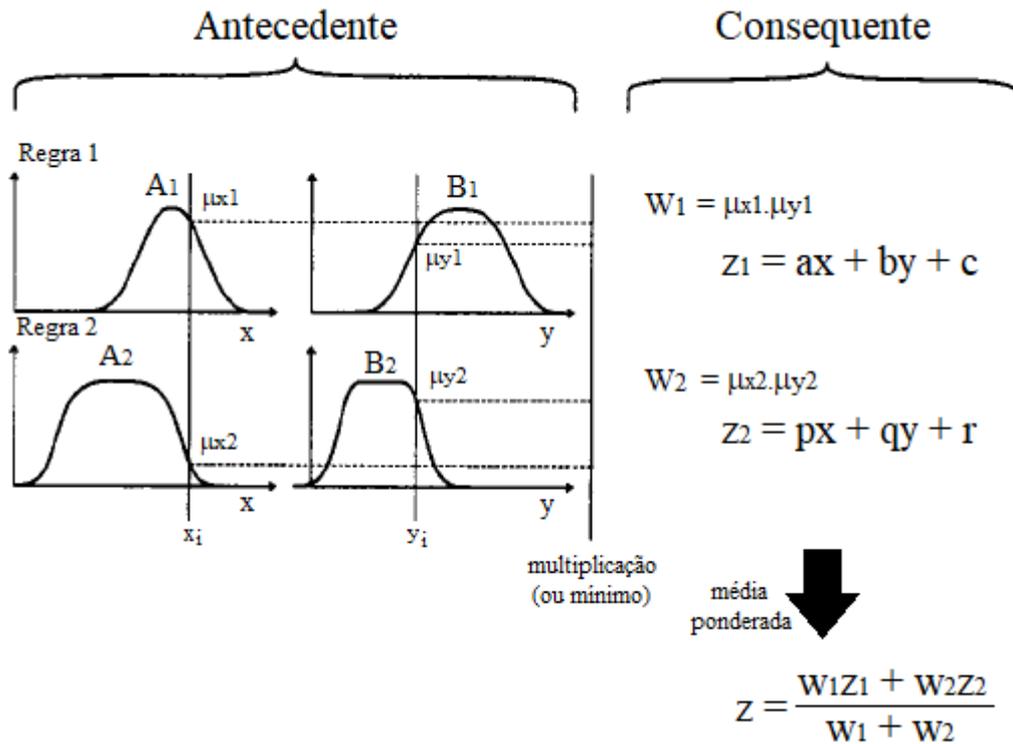
Neste capítulo, será apresentada a teoria de funcionamento do controlador fuzzy proposto por Takagi e Sugeno (1983). Posteriormente, serão descritas todas as etapas envolvidas no desenvolvimento dos controladores fuzzy do tipo Takagi-Sugeno para previsão do comportamento cisalhante de descontinuidades sem preenchimento e os resultados obtidos pelos modelos serão apresentados. Finalmente, serão feitas algumas conclusões parciais sobre os modelos fuzzy construídos com o emprego do controlador fuzzy Takagi-Sugeno.

4.1 Controlador fuzzy tipo Takagi-Sugeno

O funcionamento do controlador fuzzy proposto por Takagi e Sugeno (1983) está ilustrado na Figura 4.1. O controlador Takagi-Sugeno consiste numa simplificação do controlador Mamdani, onde, somente, o antecedente das regras é formado por variáveis fuzzy e o conseqüente de cada regra é definido como uma função das variáveis linguísticas de entrada.

Primeiramente, é realizada a fuzzificação das variáveis de entrada com a definição das funções de pertinências de cada variável e das duas regras de inferência fuzzy. Na etapa de ativação das regras ou avaliação das premissas, o processo é similar ao do sistema Mamdani, considera-se o menor grau de pertinência ou produto das pertinências para operações de intersecção (conector “E”) entre as funções das entradas. Para operações de união (conector “OU”) entre as funções de entrada, pode-se adotar o maior grau de pertinência ou a soma algébrica das pertinências.

Figura 4.1 – Resumo do funcionamento do controlador fuzzy tipo Takagi-Sugeno



Fonte: Jang (1993).

A etapa de implicação consiste em definir uma função (z_1 e z_2) que relacione os consequentes das regras com as variáveis de entrada. Essa definição não obriga o uso de uma função de implicação específica e pode ser, inclusive, um valor constante. Normalmente, adotam-se funções lineares.

A saída é a média ponderada dos consequentes de cada regra (z), avaliada pelos respectivos valores da pertinência resultante do processamento do antecedente da regra (W_1 e W_2). Pode-se observar que esse processo funciona, ao mesmo tempo, como uma etapa de agregação das regras e de defuzzificação no controlador Takagi-Sugeno.

Segundo Simões e Shaw (2007), a metodologia do controlador Takagi-Sugeno (Takagi e Sugeno, 1983) é uma abordagem híbrida que combina um método fuzzy baseado em regras e um método matemático, ou seja, os antecedentes definem os trechos relacionados à transferência de entrada e saída e os consequentes definem aproximações lineares para esses trechos. Os coeficientes dessas funções lineares podem ser determinados por análise de regressão linear com base em procedimentos estatísticos e ajustados durante a simulação posteriormente. O controlador Takagi-Sugeno estabelece, dessa maneira, que a curva que

representa o comportamento real do fenômeno físico pode ser ajustada por planos inclinados com áreas e formatos fixos.

Por ser mais compacto e, computacionalmente, mais eficiente do que o sistema Mamdani, o controlador Takagi-Sugeno, de acordo com Mathworks (2006), permite o uso de técnicas adaptativas que podem ser usadas para personalizar as funções de pertinência de modo a aprimorar o sistema fuzzy. Os sistemas Takagi-Sugeno são mais adequados para análises matemáticas e mais eficientes computacionalmente.

Simões e Shaw (2007) reconhecem que o controlador Sugeno fornece uma precisão de estimação melhor, porque é um sistema híbrido de um método fuzzy baseado em regras e de equações lineares multidimensionais. Mas alertam que a perda da formulação linguística dos consequentes de saída pode ser desvantajosa em alguns casos.

No que diz respeito ao uso de controladores fuzzy do tipo Takagi-Sugeno em Mecânica das Rochas, existem poucos estudos relacionados ao tema. Grima e Babusika (1999) desenvolveram um sistema fuzzy para prever a resistência à compressão simples não confinada de amostras de rocha. Os autores constataram que o modelo fuzzy Takagi-Sugeno se revelou como uma ferramenta com um bom potencial para modelar sistemas geológicos de engenharia complexos, não-lineares e multivariáveis. Estes autores destacam a importância dos sistemas computacionais inteligentes disponíveis para aplicação na Mecânica das Rochas, já que permitem o uso de informações vagas e imprecisas sobre os materiais e o emprego de dados cujo significado físico não é óbvio.

4.2 Metodologia empregada no desenvolvimento do modelo fuzzy Takagi-Sugeno

Utilizando os 673 exemplos como conjunto de dados, o modelo fuzzy do tipo Takagi-Sugeno foi implementado no *software* MATLAB com as mesmas variáveis de entrada e saída empregadas no desenvolvimento do sistema Mamdani apresentado anteriormente no Capítulo 3, mas definido com base no método de inferência sugerido por Takagi e Sugeno (1983).

Primeiramente, a construção do modelo foi realizada por meio de um comando existente no próprio MATLAB que permite converter, diretamente, um sistema Mamdani em um sistema Takagi-Sugeno com funções de implicação de ordem zero (constantes). Como consequência, após a conversão, as regras do sistema fuzzy Mamdani e as propriedades das

funções de pertinência de suas variáveis de entrada foram mantidas inalteradas para o modelo Takagi-Sugeno.

Um modelo fuzzy Takagi-Sugeno também foi desenvolvido adotando-se funções de implicação lineares, isto é, de ordem um. A obtenção dos coeficientes dessas funções lineares foi feita com o auxílio de um programa de planilha eletrônica por meio de regressões lineares múltiplas dos resultados dos ensaios de cisalhamento direto. Para cada conjunto fuzzy das saídas τ_h e δ_v do modelo Mamdani foi gerada uma equação. Totalizando 6 equações, 4 para τ_h e 2 para δ_v . Por exemplo, as resistências cisalhantes com intervalos dentro de “Baixa” ocorreram em 190 exemplos do total de 673. Dessa maneira, esses 190 exemplos foram utilizados para a obtenção das equações lineares do conjunto fuzzy “Baixa”. As regras de inferência e as propriedades das funções de pertinência de suas variáveis de entrada, também, foram mantidas inalteradas com relação ao sistema Mamdani.

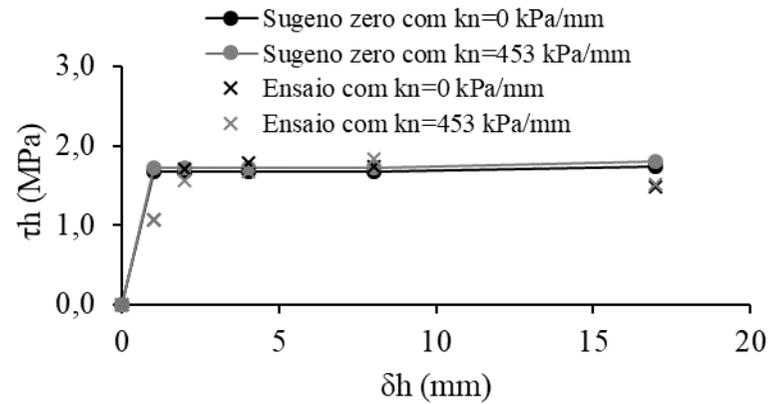
Dessa forma, pela metodologia de inferência de Takagi e Sugeno (1983) foram criados quatro sistemas MISO com 6 variáveis de entrada cada um e uma única saída, τ_h ou δ_v . Dois sistemas tratam os consequentes de suas regras como constantes (ordem zero) e os outros dois consideram funções de implicação lineares (ordem um).

Em seguida, foi verificada a acurácia dos sistemas fuzzy Takagi-Sugeno em relação aos dados experimentais para se definir qual o modelo que melhor representa o comportamento cisalhante das discontinuidades rochosas sem preenchimento.

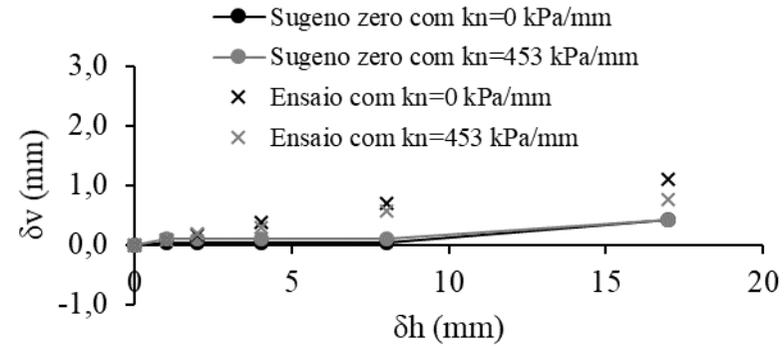
4.3 Apresentação e discussão dos resultados

Uma comparação entre previsões do comportamento cisalhante das discontinuidades sem preenchimento pelo modelo fuzzy tipo Takagi-Sugeno e os dados experimentais utilizados no desenvolvimento do modelo é apresentada nas Figuras 4.2 a 4.9. É importante mencionar mais uma vez que, devido à limitação de dados dos ensaios, não foi possível, em alguns casos, isolar a influência de apenas uma variável na resistência ao cisalhamento e na dilatação.

Figura 4.2 – Modelo Takagi-Sugeno ordem zero: comparação da influência de k_n para $\sigma_{no} = 1,63$ MPa, $JRC = 4$, $\sigma_c = 12$ MPa e $\phi_b = 37,5$ graus



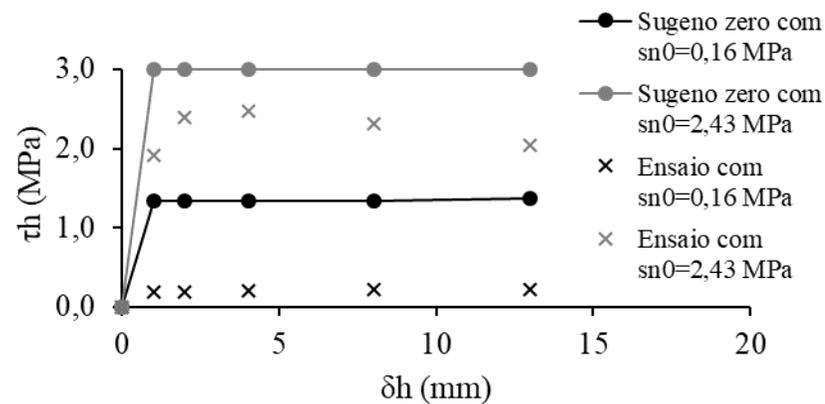
(a) Valores observados e previstos de τ_h



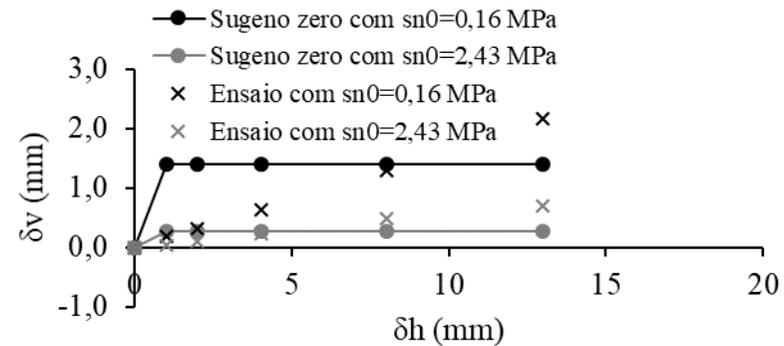
(b) Valores observados e previstos de δ_v

Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 4.3 – Modelo Takagi-Sugeno ordem zero: comparação da influência de σ_{no} para $k_n = 0$ kPa/mm, $JRC = 4$, $\sigma_c = 12$ MPa e $\phi_b = 37,5$ graus



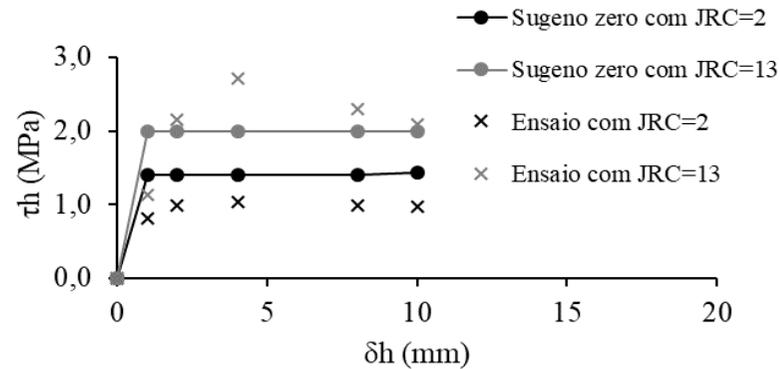
(a) Valores observados e previstos de τ_h



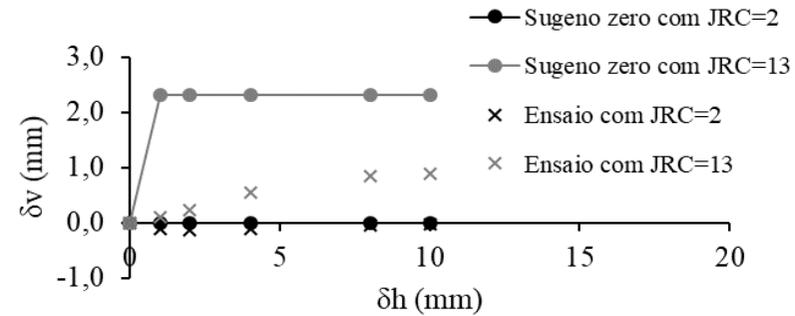
(b) Valores observados e previstos de δ_v

Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 4.4 – Modelo Takagi-Sugeno ordem zero: comparação da influência de JRC para $k_n = 453$ kPa/mm, $\sigma_{no} = 1,63$ MPa, $\sigma_c = 20$ e 12 MPa e $\phi_b = 32$ e $37,5$ graus



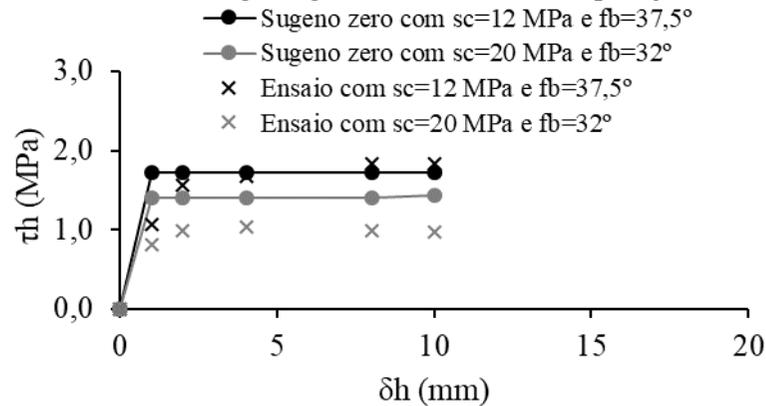
(a) Valores observados e previstos de τ_h



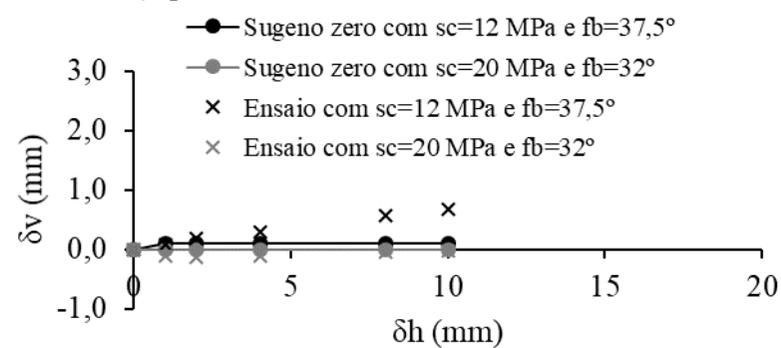
(b) Valores observados e previstos de δv

Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 4.5 – Modelo Takagi-Sugeno ordem zero: comparação da influência de σ_c e ϕ_b para $k_n = 453$ kPa/mm, $\sigma_{no} = 1,63$ MPa, JRC = 4 e 2



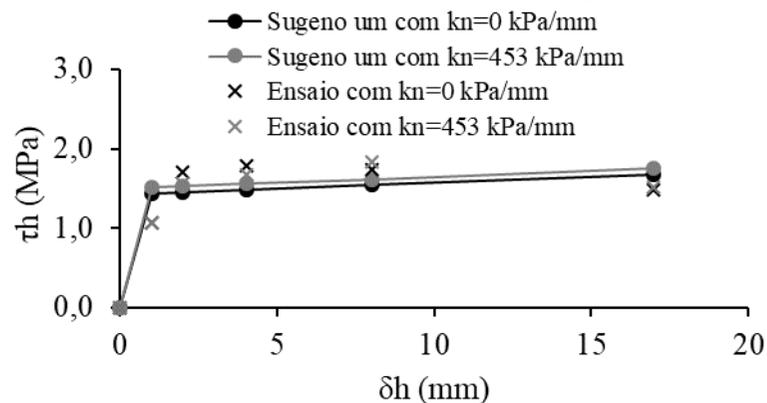
(a) Valores observados e previstos de τ_h



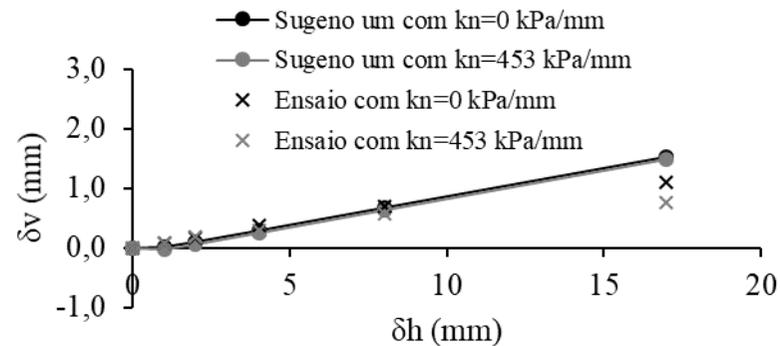
(b) Valores observados e previstos de δv

Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 4.6 – Modelo Takagi-Sugeno ordem um: comparação da influência de k_n para $\sigma_{no} = 1,63$ MPa, $JRC = 4$, $\sigma_c = 12$ MPa e $\phi_b = 37,5$ graus



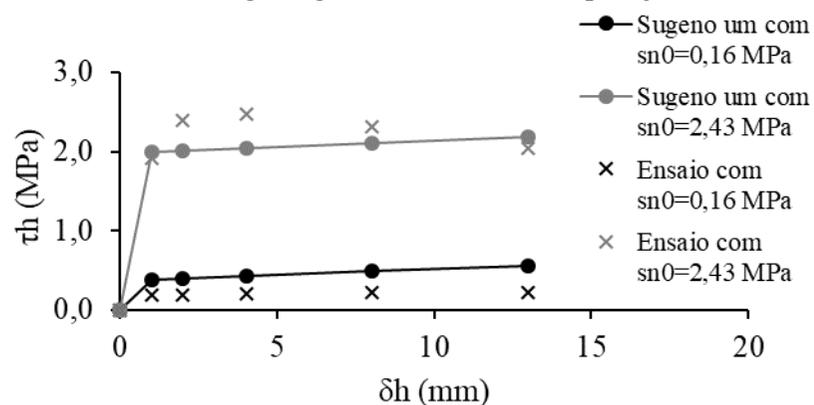
(a) Valores observados e previstos de τ_h



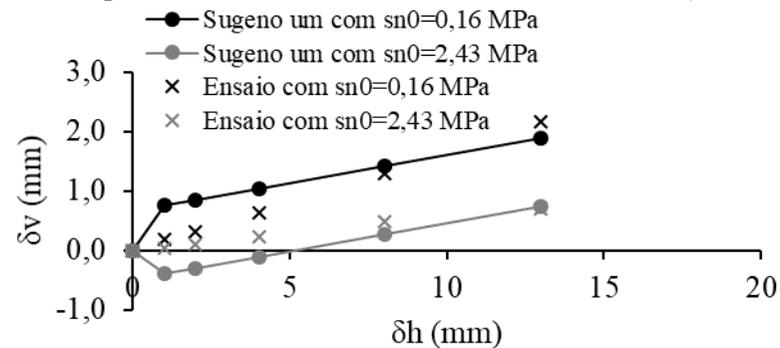
(b) Valores observados e previstos de δ_v

Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 4.7 – Modelo Takagi-Sugeno ordem um: comparação da influência de σ_{no} para $k_n = 0$ kPa/mm, $JRC = 4$, $\sigma_c = 12$ MPa e $\phi_b = 37,5$ graus



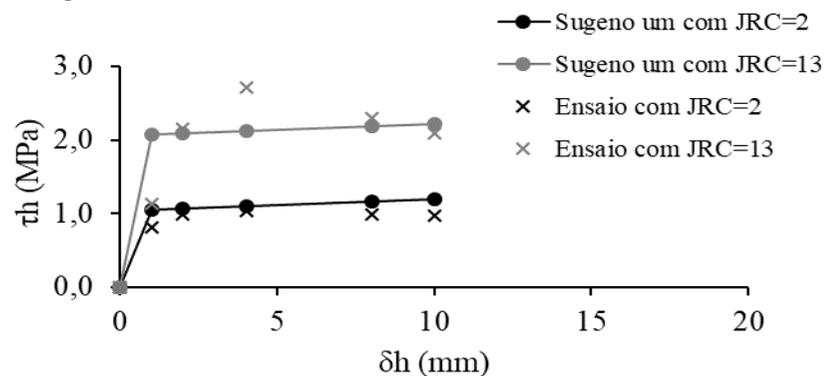
(a) Valores observados e previstos de τ_h



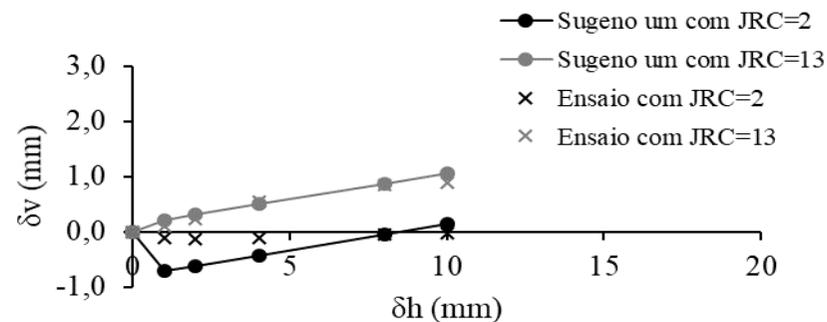
(b) Valores observados e previstos de δ_v

Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 4.8 – Modelo Takagi-Sugeno ordem um: comparação da influência de JRC para $k_n = 453$ kPa/mm, $\sigma_{no} = 1,63$ MPa, $\sigma_c = 20$ e 12 MPa e $\phi_b = 32$ e 37,5 graus



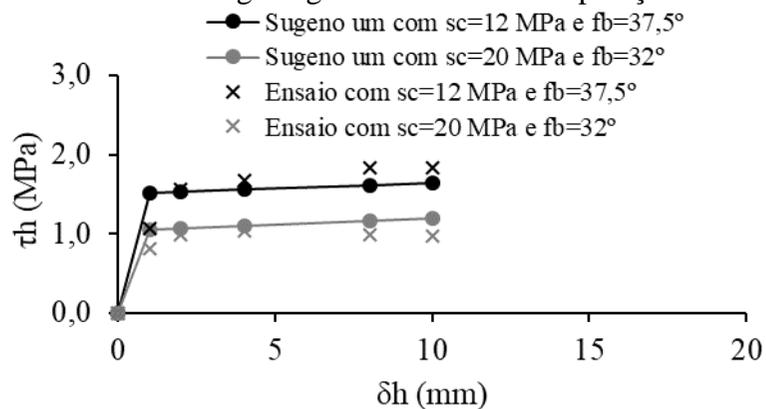
(a) Valores observados e previstos de τ_h



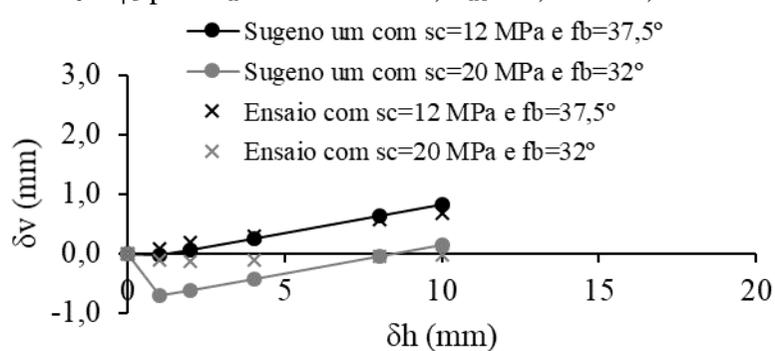
(b) Valores observados e previstos de δv

Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 4.9 – Modelo Takagi-Sugeno ordem um: comparação da influência de σ_c e ϕ_b para $k_n = 453$ kPa/mm, $\sigma_{no} = 1,63$ MPa, JRC = 4 e 2



(a) Valores observados e previstos de τ_h



(b) Valores observados e previstos de δv

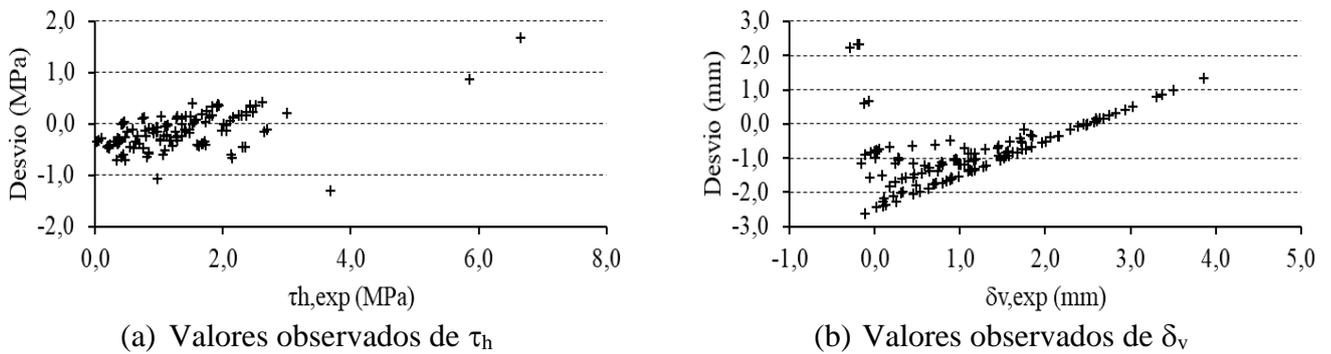
Fonte: elaborada pelo autor.

Ficou evidenciado que, entre as análises dos dois modelos fuzzy Takagi-Sugeno de ordens zero e um, os sistemas que utilizaram as funções de implicação como equações lineares (ordem um) apresentaram resultados mais acurados que os sistemas que adotaram constantes para os consequentes de suas regras (ordem zero).

Os dois sistemas fuzzy Takagi-Sugeno se mostraram, de modo geral, próximos quanto ao comportamento e à ordem de grandeza das medições dos ensaios. Para alguns cenários, como os ilustrados nas Figuras 4.3a e 4.4b, o modelo fuzzy Takagi-Sugeno de ordem zero se desviou, significativamente, dos dados experimentais, superestimando a resistência ao cisalhamento e a dilatância, o que não ocorreu no modelo de ordem um.

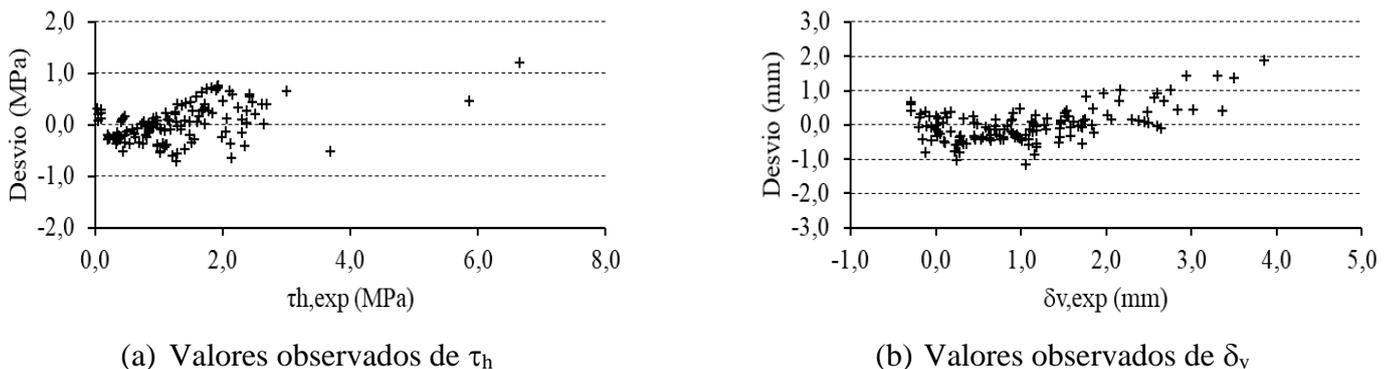
As Figuras 4.10 e 4.11 permitem uma verificação mais detalhada do desempenho dos controladores Takagi-Sugeno e apresentam os desvios de τ_h e δ_v em relação a uma parcela representativa de todo o conjunto de dados utilizado na construção desses modelos com 134 exemplos de entrada e saída.

Figura 4.10 – Desvios do modelo fuzzy tipo Takagi-Sugeno de ordem zero



Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 4.11 – Desvios do modelo fuzzy tipo Takagi-Sugeno de ordem um



Fonte: elaborada pelo autor.

Com relação à dilatância, os maiores desvios observados para o Takagi-Sugeno de ordem zero foram de -2,64 e -2,42 mm para os dados dos ensaios de Indraratna e Haque (2000) e de Skinas et al. (1990) que ocorreram para medidas de δ_v próximas de zero.

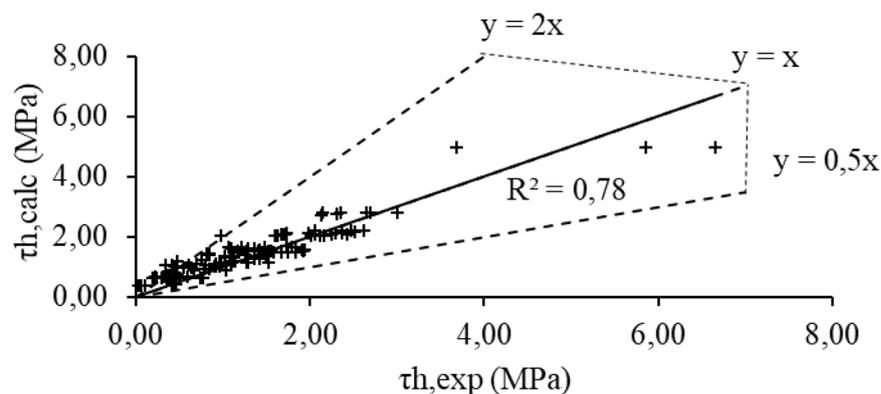
Similar ao que foi observado para o modelo Mamdani, o Takagi-Sugeno de ordem zero não ofereceu bons resultados para pequenos valores de δ_v . Seu desempenho melhorou conforme os valores experimentais de dilatância aumentaram. As previsões foram razoáveis entre os dados onde δ_v experimental variou de 1,50 a 3,50 mm com desvios absolutos menores ou iguais a 1 mm e para níveis de deslocamento horizontal elevados, geralmente superiores a 10 mm.

Já para o Takagi-Sugeno de ordem um, os maiores desvios foram de 1,87 e 1,43 mm obtidos para os ensaios de Indraratna e Haque (2000) e que correspondiam a medidas de δ_v maiores que 1 mm. Isso mostra que o modelo Takagi-Sugeno adotando funções lineares conseguiu explicar, de forma mais adequada, o fenômeno da dilatância das descontinuidades limpas do que o modelo Takagi-Sugeno que utilizou funções de implicação como constantes.

Para a resistência ao cisalhamento, os maiores desvios corresponderam a 1,68 e -1,29 MPa para Takagi-Sugeno de ordem zero e a 1,20 e 0,77 MPa para Takagi-Sugeno de ordem um. Porém, somente pela análise dos desvios, não ficou, facilmente, evidente, qual dos dois modelos apresentou melhor desempenho no cálculo de τ_h .

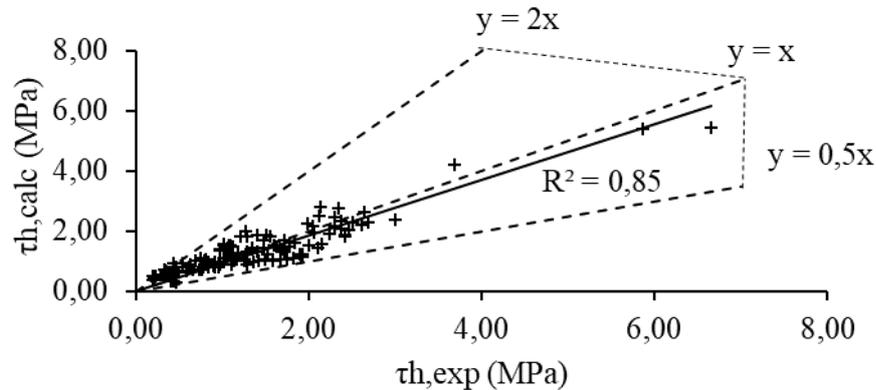
Assim, as Figuras 4.12 e 4.13 ilustram as correlações entre valores observados e calculados de τ_h obtidas para os dois controladores a partir da mesma parcela do conjunto de dados usada nos desvios com o intuito de verificar o modelo com melhor acurácia.

Figura 4.12 – Correlação entre τ_h medido e calculado pelo modelo fuzzy tipo Takagi-Sugeno de ordem zero



Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 4.13 – Correlação entre τ_h medido e calculado pelo modelo fuzzy tipo Takagi-Sugeno de ordem um



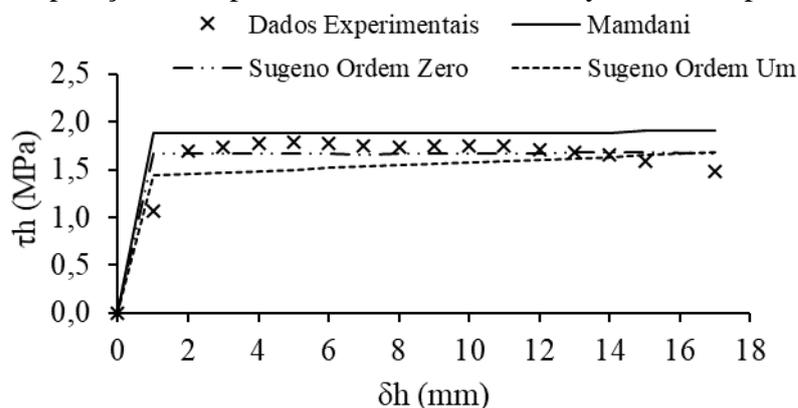
Fonte: elaborada pelo autor.

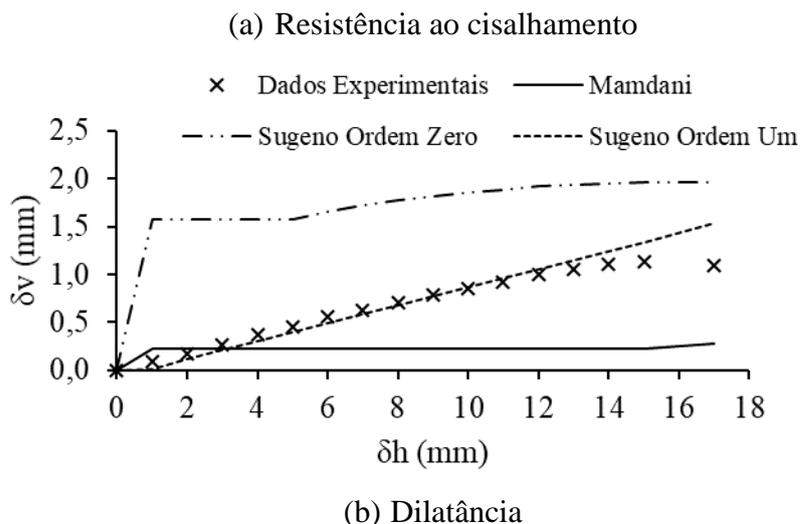
Foi possível confirmar que, apesar de não exibirem valores muito expressivos de coeficientes de determinação, os modelos fuzzy Takagi-Sugeno de ordens zero e um apresentaram um bom desempenho, conseguindo explicar, de maneira razoável, a variação de τ_h durante o processo de cisalhamento de descontinuidades sem preenchimento.

Talvez por considerar os consequentes de suas regras como equações lineares, o Takagi-Sugeno de ordem um mostrou um coeficiente de determinação maior. Foi evidenciado, também, que suas previsões, usualmente, subestimam a resistência ao cisalhamento de forma sutil, condição que, mesmo assim, é favorável à segurança.

Finalmente, a Figura 4.14 apresenta uma comparação entre os resultados dos modelos fuzzy Mamdani e Takagi-Sugeno e os dados experimentais a fim de descobrir qual dos controladores consegue expressar melhor o comportamento cisalhante das descontinuidades.

Figura 4.14 – Comparação entre previsões dos modelos fuzzy e dados experimentais





Fonte: elaborada pelo autor.

Ficou evidenciado que, entre os sistemas fuzzy propostos, o modelo Takagi-Sugeno de ordem um foi o que apresentou o melhor desempenho para a previsão do comportamento cisalhante da descontinuidade analisada com resultados muito próximos dos dados experimentais de τ_h e δ_v . Isso confirma as afirmações de Mathworks (2006) e Simões e Shaw (2007) de que os sistemas Takagi-Sugeno são mais adequados para análises matemáticas com dados de entrada e saída numéricos e mais eficientes computacionalmente do que os sistemas Mamdani.

4.4 Conclusões parciais

Os dois modelos fuzzy Takagi-Sugeno propostos foram resultados de um conjunto de dados robusto com 673 exemplos e definido com base em estudos anteriores que identificaram os principais fatores que governam o comportamento cisalhante de descontinuidades limpas.

Por meio dos modelos fuzzy desenvolvidos, a resistência ao cisalhamento pode ser calculada diretamente ou, de forma indireta, utilizando a dilatação, parâmetro essencial para a determinação de τ_h em alguns dos principais modelos analíticos existentes e cuja obtenção pode ser difícil.

Similar ao que foi observado para o modelo Mamdani, pelas análises dos resultados obtidos, ficou evidenciado que, de uma maneira geral, os sistemas fuzzy se mostraram, relativamente, próximos quanto ao comportamento e à ordem de grandeza das medições dos ensaios de cisalhamento direto. As previsões dos modelos Takagi-Sugeno

interpolaram, de modo satisfatório, os dados experimentais, mostrando que os modelos conseguem representar o comportamento cisalhante das descontinuidades.

Os desvios revelaram que o modelo Takagi-Sugeno de ordem um conseguiu explicar, de forma mais adequada, o fenômeno da dilatação das descontinuidades limpas do que o modelo Takagi-Sugeno que utilizou funções de implicação como constantes.

As correlações entre τ_h medido e calculado mostrou que, apesar de não exibirem valores muito expressivos de coeficientes de determinação, os modelos fuzzy Takagi-Sugeno de ordens zero e um apresentaram um bom desempenho, conseguindo explicar, de maneira razoável, a variação de τ_h durante o processo de cisalhamento de descontinuidades limpas.

Dessa maneira, entre as análises dos dois modelos fuzzy Takagi-Sugeno de ordens zero e um, ficou evidenciado que os sistemas que utilizaram as funções de implicação como equações lineares apresentaram resultados mais acurados que os sistemas que adotaram constantes para os consequentes de suas regras. Fato que se deve, possivelmente, à utilização de coeficientes apropriados para essas equações, obtidos por regressões lineares múltiplas realizadas com os resultados dos ensaios de cisalhamento direto.

É importante mencionar que os dois modelos propostos não consideram os efeitos da pressão de água nem das condições de drenagem das descontinuidades. Evidentemente, também não avaliam a influência do material preenchimento no comportamento cisalhante das descontinuidades.

Pelos resultados expostos, foi possível constatar a relevância das afirmações de Mathworks (2006) e Simões e Shaw (2007) de que os sistemas Takagi-Sugeno são mais adequados para análises matemáticas com dados de entrada e saída numéricos e mais eficientes computacionalmente do que os sistemas Mamdani, os quais são intuitivos e mais recomendados para implementar o conhecimento de um especialista.

Por fim, constatou-se que os modelos fuzzy tipo Takagi-Sugeno são limitados pelos domínios de suas variáveis de entrada os quais são definidos durante sua construção, ou seja, eles não permitem que sejam inseridas em seus dados de entrada medidas que estejam fora do seu intervalo de atuação preestabelecido. No presente trabalho, os sistemas fuzzy ficaram condicionados, portanto, ao domínio das medições dos ensaios de cisalhamento direto para a maioria de seus parâmetros. Entretanto, esses domínios podem sofrer ajustes na medida em que novos conjuntos de dados estejam disponíveis. Além disso, assim como o modelo fuzzy Mamdani, os modelos fuzzy Takagi-Sugeno, a princípio, necessitam do *software*

MATLAB para a realização de suas previsões, não sendo possível ainda a sua utilização em outros programas mais acessíveis.

5 MODELO NEURO-FUZZY PARA PREVISÃO DO COMPORTAMENTO CISALHANTE DE DESCONTINUIDADES SEM PREENCHIMENTO EM MACIÇOS ROCHOSOS

Neste capítulo, serão apresentados, inicialmente, os principais conceitos relacionados com a teoria de funcionamento do controlador neuro-fuzzy proposto por Jang (1993). Em seguida, serão descritas todas as etapas adotadas no desenvolvimento do controlador neuro-fuzzy para previsão do comportamento cisalhante de descontinuidades sem preenchimento. Finalmente, serão apresentados os resultados e as conclusões sobre o modelo neuro-fuzzy construído.

5.1 Controlador neuro-fuzzy

A maior dificuldade na criação de controladores nebulosos complexos, que envolvem muitas variáveis de controle por exemplo, encontra-se na construção das regras e na definição das funções de pertinência. Uma alternativa bastante viável, segundo Simões e Shaw (2007), para contornar esse problema consiste em utilizar técnicas que combinem as características da Lógica Fuzzy e das redes neurais artificiais, onde esses parâmetros são aprendidos com a apresentação de pares entrada-saída desejada a uma rede neural cujos nós computam, basicamente, operadores de intersecção e união.

Simões e Shaw (2007), afirmam que, a rigor, qualquer procedimento que incorpore os paradigmas de uma rede neural em um sistema fuzzy existente pode ser considerado um sistema neuro-fuzzy. No entanto, o termo é utilizado para um tipo específico de sistema que, de certa forma, engloba os dois paradigmas, dependendo se o sistema está na fase de aprendizado ou na fase de processamento de dados. Na fase de aprendizado, ele se comporta como uma rede neural, e, na fase de processamento de dados, como um sistema fuzzy.

Similar a um controlador nebuloso, os sistemas neuro-fuzzy podem explicar o seu funcionamento, através de regras que modelam o conhecimento do sistema. Análogo a uma rede neural artificial, o aprendizado do sistema é feito a partir da apresentação de exemplos. Por outra perspectiva, os sistemas neuro-fuzzy, ao contrário das redes neurais artificiais, permitem obter informações sobre determinada solução encontrada e, diferentemente dos

controladores fuzzy, não necessitam de um especialista para a definição das regras de inferência.

Algumas aplicações de sistemas neuro-fuzzy em Mecânica das Rochas foram feitas por Grima et al. (2000), Gokceoglu et al. (2004), Singh e Singh (2006), Noorani et al. (2010), Jalalifar et al. (2011), Singh et al. (2012) e Yesiloglu-Gultekin et al. (2013).

Dispondo de um conjunto de dados com 115 exemplos, Gokceoglu et al. (2004), desenvolveram um modelo neuro-fuzzy para estimar o módulo de deformabilidade de maciços rochosos fraturados. Os autores relatam que o modelo neuro-fuzzy construído apresentou alto desempenho, revelando-se, significativamente, mais vantajoso do que algumas equações empíricas obtidas do mesmo conjunto de dados a partir de métodos estatísticos baseados em regressão.

Conclusões semelhantes foram obtidas por Singh e Singh (2006) que, com base nos conceitos das redes neurais artificiais e dos sistemas neuro-fuzzy, construíram dois modelos numéricos para previsão do coeficiente de Poisson e do módulo de elasticidade de diferentes unidades de rocha. Fazendo uso de parâmetros, como resistência à compressão uniaxial e resistência à tração, Singh e Singh (2006) verificaram que o modelo neuro-fuzzy forneceu resultados mais próximos das propriedades elásticas das rochas quando comparado com a análise estatística e o modelo neuronal proposto pelos autores.

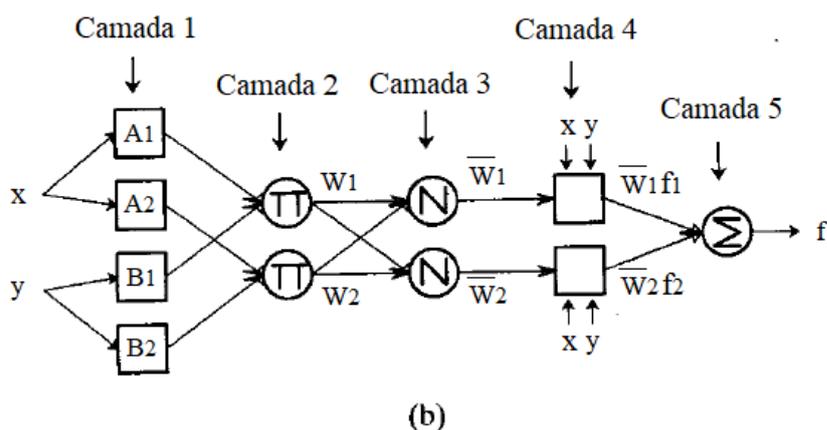
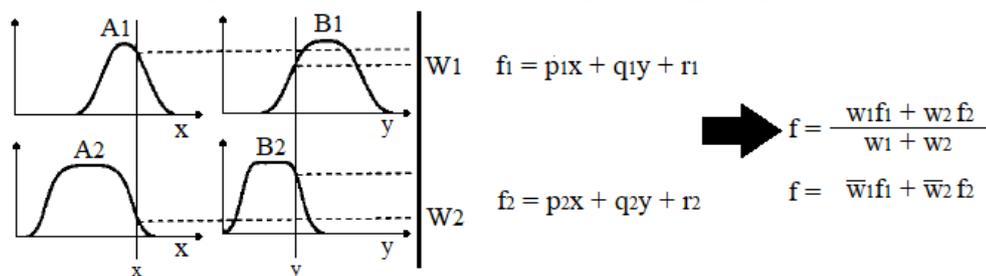
5.2 Sistema neuro-fuzzy do tipo ANFIS

O sistema neuro-fuzzy do tipo ANFIS (*Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System*) proposto por Jang (1993) consiste em um sistema de inferência fuzzy implementado na estrutura de redes neurais adaptativas. Por fazer uso de um procedimento de aprendizagem híbrido, o ANFIS pode servir de base para a construção de um conjunto de regras de inferência fuzzy com funções de pertinência adequadas para gerar os pares de entrada-saída estipulados.

O sistema de inferência fuzzy utilizado no ANFIS pode ter o funcionamento similar aos controladores propostos por Mamdani (1974) ou Takagi e Sugeno (1983). Entretanto, Jang (1993) adverte que, por necessitar de um processo de defuzzificação para a saída, a implantação do sistema fuzzy do tipo Mamdani é mais complicada e esse esforço adicional não é proveitoso.

Um exemplo de uma rede adaptativa, funcionalmente, equivalente a um sistema de inferência fuzzy é mostrado na Figura 5.1. Foi assumida uma possível arquitetura para o sistema ANFIS com cinco camadas, onde o controlador fuzzy seria do tipo Takagi-Sugeno (Takagi e Sugeno, 1983) com duas variáveis de entrada (x e y) e uma de saída (f).

Figura 5.1 – ANFIS: (a) Esquema de funcionamento do controlador fuzzy Takagi-Sugeno e (b) Arquitetura da rede adaptativa equivalente (ANFIS tipo Takagi-Sugeno)



Fonte: Jang (1993).

No sistema ANFIS equivalente, os nós quadrados são adaptativos e seus parâmetros estão sujeitos a modificações enquanto que os nós circulares são fixos e não sofrem alterações em seus parâmetros.

A Camada 1 é responsável por conter os parâmetros que definem as funções de pertinência das variáveis de entrada, sejam elas trapezoidais, triangulares ou gaussianas. Os parâmetros dessa camada são referidos como parâmetros das premissas ou parâmetros antecedentes (Jang, 1993).

Cada nó da Camada 2 funciona como uma regra na etapa de ativação das regras do sistema Takagi-Sugeno e fornece o produto das pertinências (μ) das variáveis de entrada. Outra operação para o conector “E” poderia ser empregada além da multiplicação.

$$w_i = \mu_{A_i}(x) \mu_{B_i}(y), \quad i = 1, 2 \quad (5.1)$$

Na Camada 3, as pertinências das regras fornecidas pela camada anterior são normalizadas, calculando-se a taxa de contribuição de cada regra para o sistema.

$$\bar{w}_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2}, \quad i = 1, 2 \quad (5.2)$$

A Camada 4 é responsável por fornecer os parâmetros consequentes (p_i , q_i e r_i), que estão sujeitos a modificações e são relacionados com a função que determina a saída de cada regra (f_i).

$$\bar{w}_i f_i = \bar{w}_i (p_i x + q_i y + r_i) \quad (5.3)$$

Por fim, o único nó da Camada 5 calcula a saída global (f) como o somatório de todos os sinais recebidos.

$$f = \sum_i \bar{w}_i f_i = \frac{\sum_i w_i f_i}{\sum_i w_i} \quad (5.4)$$

A saída global pode ser expressa como uma combinação linear dos parâmetros consequentes (Jang, 1993).

$$f = \frac{w_1}{w_1 + w_2} f_1 + \frac{w_2}{w_1 + w_2} f_2 = (\bar{w}_1 x) p_1 + (\bar{w}_1 y) q_1 + (\bar{w}_1) r_1 + (\bar{w}_2 x) p_2 + (\bar{w}_2 y) q_2 + (\bar{w}_2) r_2 \quad (5.5)$$

Essa configuração permite que o algoritmo de aprendizagem híbrido descrito por Jang (1993) possa ser aplicado, diretamente, durante os ajustes dos parâmetros antecedentes e consequentes. O processo de aprendizagem híbrido estabelece que, com o avanço dos sinais até a Camada 4, os parâmetros consequentes são estimados pelo método dos mínimos quadrados. O erro gerado é, então, propagado para Camada 1 e os parâmetros das premissas são ajustados pelo método de gradiente descendente (*gradient descent*). Conforme Mathworks (2006), o ajuste desses parâmetros é facilitado por um vetor gradiente, que fornece uma medida de quão bem o sistema de inferência fuzzy está modelando os dados de entrada e saída para um determinado conjunto de parâmetros.

Antes de qualquer procedimento de otimização de parâmetros do modelo ANFIS, é necessário, primeiramente, definir a estrutura inicial do controlador fuzzy. Definir essa estrutura inicial equivale, de acordo com Jang et al. (1997), a determinar as variáveis de entrada relevantes, a quantidade de funções de pertinência de cada uma delas, as propriedades dessas funções de pertinência (parâmetros antecedentes), o número de regras de inferência fuzzy do modelo e os parâmetros consequentes das variáveis de saída.

Todos esses procedimentos podem ser feitos manualmente por meio do conhecimento e da experiência de um especialista ou através de técnicas específicas que podem ser aplicadas na construção da estrutura inicial do sistema.

Segundo Jang e Sun (1995), um procedimento muito utilizado na geração de controladores fuzzy é a repartição em grades (*Grid Partitioning*). A principal estratégia do método é dividir o domínio das variáveis de entrada em frações iguais. Nesse caso, as funções de pertinência terão formatos idênticos e estarão espaçadas uniformemente. Entre as entradas, o número de divisões feitas no domínio pode ser diferente. Contudo, Jang e Sun (1995) advertem que o uso dessa técnica para sistemas com muitas variáveis de entrada pode se tornar inviável pela quantidade de regras de inferência que seriam geradas.

O método de agrupamento subtrativo (*Subtractive Clustering*) desenvolvido por Chiu (1994) é outra alternativa para definição da estrutura inicial do modelo ANFIS. Ele admite que cada um dos dados usados para alimentar o modelo é candidato ao centro de grupos (*clusters*). Os dados que ocuparão o centro desses grupos são definidos por meio de uma medida de densidade que avalia a quantidade de pontos próximos. Assim, os dados que obtiverem os maiores valores de densidade serão selecionados para os centros dos grupos. A localização desses centros de agrupamento permite obter as funções de pertinência e as regras de inferência. Benini (2007) afirma que a distância adotada para definir as densidades dos dados está, diretamente, relacionada com o número de regras de inferência encontrado pelo método. Segundo ele, quanto menor for essa distância, maior será a quantidade de regras concebidas. Ao contrário, uma distância muito grande produzirá um número menor de regras.

Vale mencionar que diferentes metodologias para determinação da estrutura inicial do controlador fuzzy fornecerão, obviamente, modelos ANFIS distintos.

Diversos trabalhos, como os de Grima et al. (2000), Noorani et al. (2010), Jalalifar et al. (2011), Singh et al. (2012) e Yesiloglu-Gultekin et al. (2013), utilizaram o ANFIS em problemas relacionados com a Mecânica das Rochas.

Jalalifar et al. (2011) construíram três modelos ANFIS para previsão do índice do maciço rochoso, *Rock Mass Rating* (RMR), utilizando algumas técnicas para obtenção da estrutura inicial do controlador fuzzy, entre elas o agrupamento subtrativo e a repartição em grades. Os autores constataram que o modelo ANFIS baseado no método de agrupamento subtrativo (Chiu, 1994) foi o que apresentou o melhor resultado.

Já Grima et al. (2000) aplicaram o ANFIS para modelar o desempenho de tuneladoras e constataram que o sistema neuro-fuzzy desenvolvido forneceu resultados melhores que outras abordagens mais convencionais.

Yesiloglu-Gultekin et al. (2013) e Noorani et al. (2010) obtiveram boas estimativas da resistência à compressão uniaxial das rochas analisadas pelos seus modelos.

Singh et al. (2012) desenvolveram um modelo ANFIS com excelente desempenho para avaliar o módulo de elasticidade de rochas. Os autores relatam que, por combinar as vantagens das redes neurais artificiais e da Lógica Fuzzy, o ANFIS é uma ferramenta interessante para descrever problemas complexos, não-lineares e multivariáveis. Singh et al. (2012) sugerem a possibilidade de utilização de seu modelo para obtenção do módulo de elasticidade de rochas de outros locais.

5.3 Metodologia empregada no desenvolvimento do modelo neuro-fuzzy ANFIS

A implementação de alguns modelos neuro-fuzzy foi realizada no *software* MATLAB e utilizou os mesmos dados experimentais descritos, anteriormente, no desenvolvimento dos modelos Mamdani e Takagi-Sugeno, mas seguindo a metodologia apresentada por Jang (1993).

Para a construção de cada modelo do tipo ANFIS, a fase de treinamento foi realizada considerando 80% dos exemplos de entrada e saída selecionados, aleatoriamente, do banco de dados de aprendizagem, enquanto os 20% restantes foram utilizados na fase de validação.

É importante ressaltar que a fase de validação, responsável por avaliar a capacidade de generalização do modelo neuro-fuzzy, foi feita com verificação de dados (*checking*), isto é, o sistema neuro-fuzzy foi selecionado para ter parâmetros associados ao erro mínimo relativo ao conjunto de dados de validação.

Foi utilizada a regra de aprendizado híbrida para correção dos parâmetros das premissas ou antecedentes, que definem as funções de pertinência, e dos parâmetros

consequentes, os quais estão relacionados com a determinação das variáveis de saída. Optou-se pelo uso de 50 épocas na fase de treinamento e de tolerância zero para os erros.

No presente trabalho, o funcionamento do modelo ANFIS é análogo ao do controlador fuzzy proposto por Takagi e Sugeno (1983). Foram escolhidas algumas alternativas para obtenção do modelo com a melhor acurácia em relação ao conjunto de dados de validação. Todos os modelos se tratavam de dois sistemas MISO com uma única variável de saída, τ_h ou δ_v . As diferenças básicas entre cada modelo analisado estavam na forma de obtenção do sistema de inferência fuzzy e nas variáveis de entrada adotadas. As opções empregadas foram:

- Um modelo com seis variáveis de entrada utilizando a técnica de agrupamento subtrativo (Chiu, 1994) para determinação do sistema de inferência fuzzy e adotando funções de implicação como equações lineares;
- Um modelo com seis variáveis de entrada utilizando a técnica da repartição em grades para determinação do sistema de inferência fuzzy com duas funções de pertinência do tipo gaussiana para cada variável de entrada e adotando funções de implicação como equações lineares;
- Um modelo com quatro variáveis de entrada utilizando a técnica de agrupamento subtrativo (Chiu, 1994) para determinação do sistema de inferência fuzzy e adotando funções de implicação como equações lineares;
- Um modelo com quatro variáveis de entrada utilizando a técnica da repartição em grades para determinação do sistema de inferência fuzzy com três funções de pertinência do tipo gaussiana para cada variável e adotando funções de implicação como equações lineares.

Durante a aplicação no MATLAB, os parâmetros inseridos na técnica de agrupamento subtrativo, como a faixa de influência (*range of influence*), a taxa de aceitação (*accept ratio*) etc., foram mantidos no modo padrão do *software*.

Nos modelos que utilizaram somente 4 variáveis, as entradas foram escolhidas com base nos resultados de Dantas Neto et al. (2017) que apresentam as variáveis que mais interferem em τ_h e δ_v . Para a resistência ao cisalhamento, foram adotados os parâmetros k_n , σ_c , σ_{no} e δ_h . Com relação à dilatância, empregaram-se JRC, σ_c , k_n e δ_h .

Jang e Sun (1995) não recomendam o uso da técnica da repartição em grades para sistemas que possuem muitas variáveis de entrada, uma vez que o tamanho do conjunto de regras varia exponencialmente com o número de funções de pertinência e de variáveis de

entrada. Os autores não definem um número limite de entradas que poderia inviabilizar o uso dessa técnica, mas esclarecem que, quanto maior o número de variáveis de entrada, menor deverá ser a quantidade de suas funções de pertinência para que a técnica da repartição em grades permaneça viável.

Diante disso, ficou estabelecido, neste trabalho, que os modelos que empregaram a técnica da repartição em grades estavam condicionados a utilizar, no máximo, um total de 100 regras de inferência. Esse fato pode ser justificado pela viabilidade do tempo de cálculo computacional necessário para obter o sistema de inferência fuzzy otimizado.

5.4 Apresentação e discussão dos resultados

Todos os modelos obtiveram máxima otimização de seus parâmetros na segunda época. Finalmente, foi selecionado o modelo que apresentou os menores desvios absolutos médios de τ_h e δ_v com relação aos dados de validação.

Os desvios médios de cada modelo estão resumidos na Tabela 5.1. São apresentados, também, os desvios absolutos fornecidos pelos modelos Mamdani e Takagi-Sugeno de ordens zero e um. No Apêndice C, são exibidas as tabelas com os dados de validação utilizados e todos os desvios absolutos dos modelos calculados a partir desses dados de validação.

Tabela 5.1 – Desvios absolutos médios obtidos por cada sistema de inferência fuzzy em relação aos dados de validação

Sistema de inferência	Obtenção do sistema de inferência	Número de entradas	Desvio médio	
			τ_h (kPa)	δ_v (mm)
Mamdani	Julgamento de especialista	6	569	0,83
Takagi-Sugeno ordem zero	Julgamento de especialista	6	299	1,12
Takagi-Sugeno ordem um	Julgamento de especialista	6	287	0,37
Takagi-Sugeno (ANFIS)	Agrupamento subtrativo	6	172	0,19
Takagi-Sugeno (ANFIS)	Agrupamento subtrativo	4	310	0,39
Takagi-Sugeno (ANFIS)	Repartição em grades	6	87	0,07
Takagi-Sugeno (ANFIS)	Repartição em grades	4	200	0,30

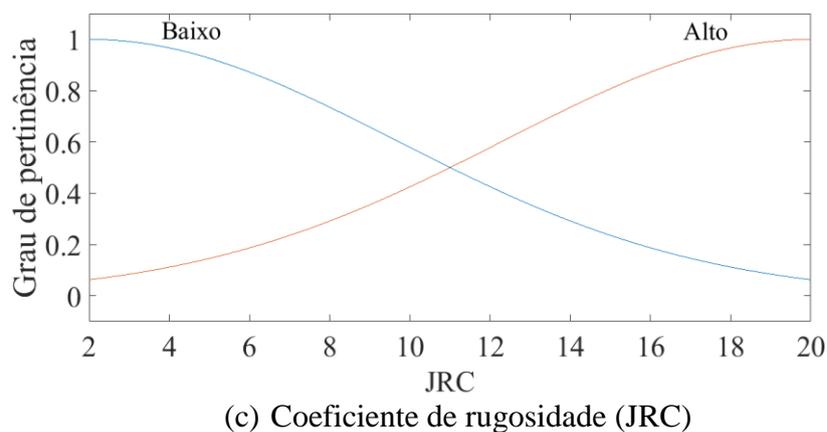
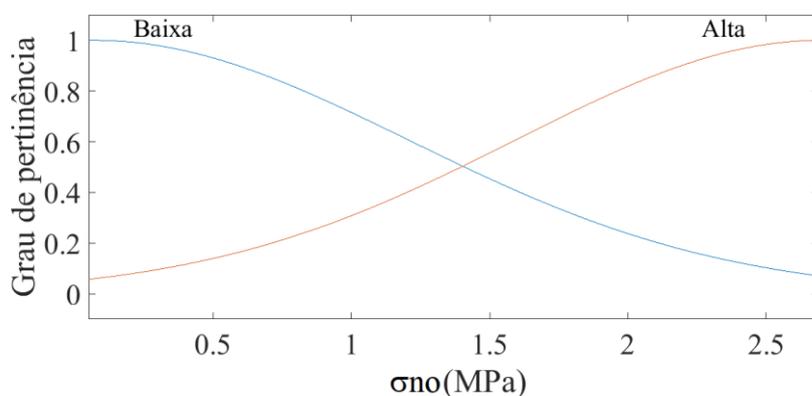
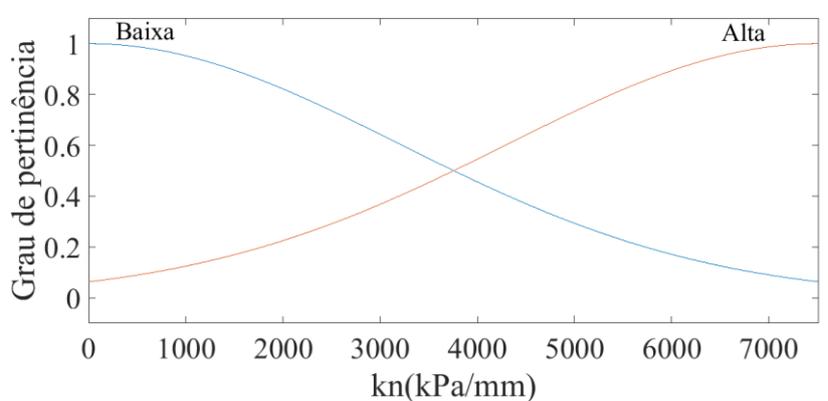
Fonte: elaborada pelo autor.

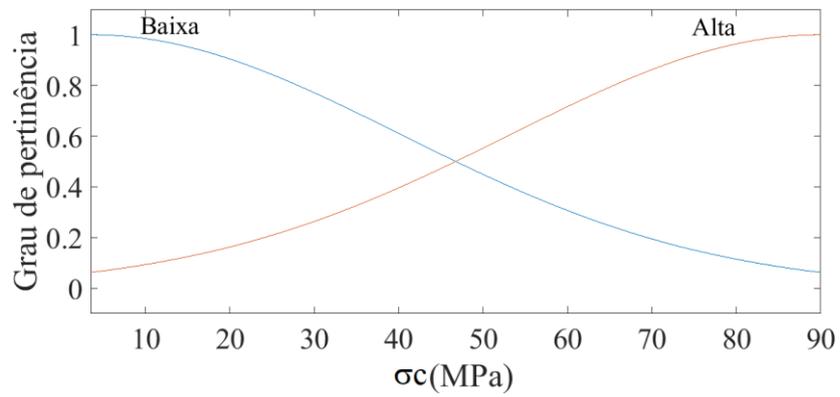
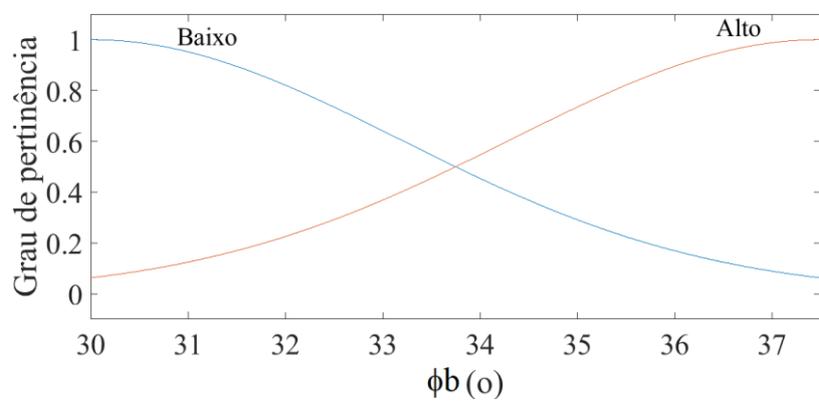
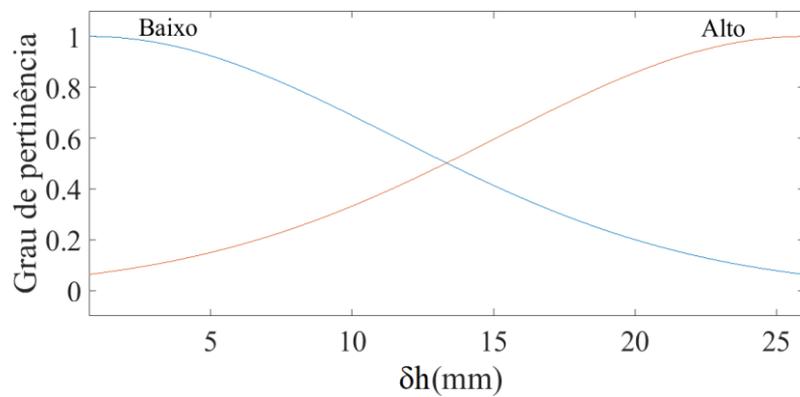
Portanto, o modelo com 6 variáveis de entrada utilizando a técnica da repartição em grades com duas funções de pertinência do tipo gaussiana para cada entrada foi o que

apresentou melhor desempenho. O modelo do tipo ANFIS selecionado apresentou 64 regras de inferência fuzzy para determinação de τ_h e δ_v . As regras são apresentadas no Apêndice D.

A Figura 5.2 exibe as funções de pertinência das variáveis de entrada com todas as suas propriedades já definidas pela técnica neuro-fuzzy. Para verificar a acurácia do modelo ANFIS, suas previsões foram confrontadas com alguns dados dos ensaios de cisalhamento direto como mostram as Figuras 5.3 a 5.6.

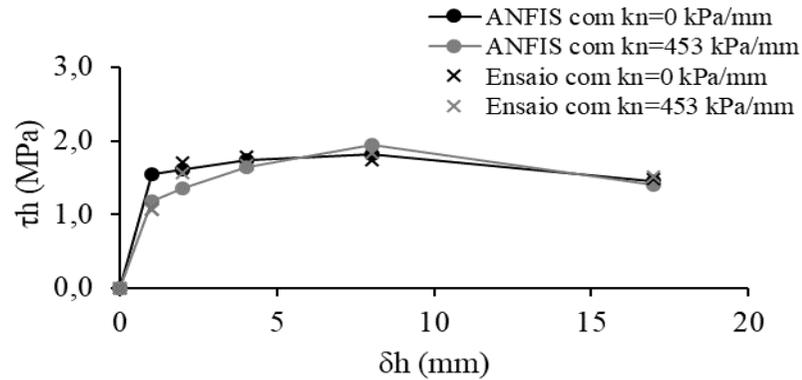
Figura 5.2 – Funções de pertinência das variáveis de entrada do modelo ANFIS



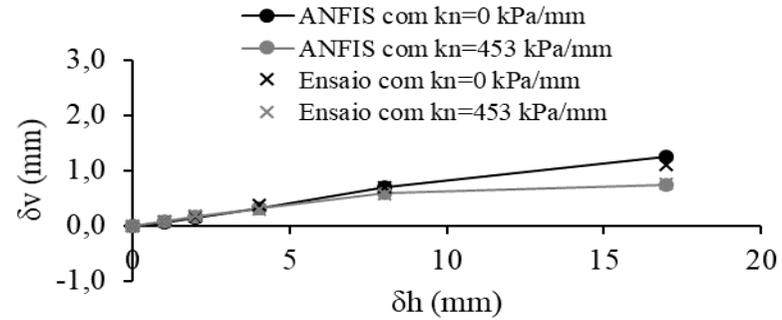
(d) Resistência à compressão da rocha (σ_c)(e) Ângulo de atrito básico (ϕ_b)(f) Deslocamento horizontal (δ_h)

Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 5.3 – Modelo ANFIS: comparação da influência de k_n para $\sigma_{n0} = 1,63$ MPa, $JRC = 4$, $\sigma_c = 12$ MPa e $\phi_b = 37,5$ graus



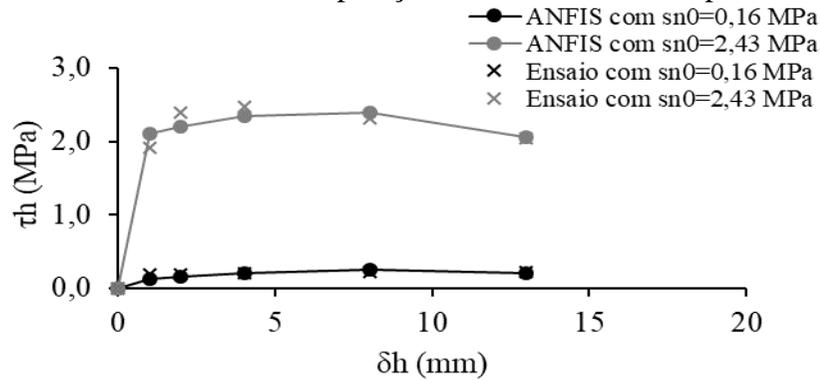
(a) Valores observados e previstos de τ_h



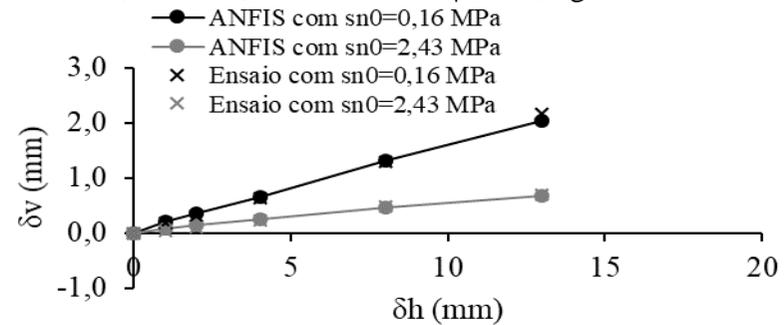
(b) Valores observados e previstos de δ_v

Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 5.4 – Modelo ANFIS: comparação da influência de σ_{n0} para $k_n = 0$ kPa/mm, $JRC = 4$, $\sigma_c = 12$ MPa e $\phi_b = 37,5$ graus



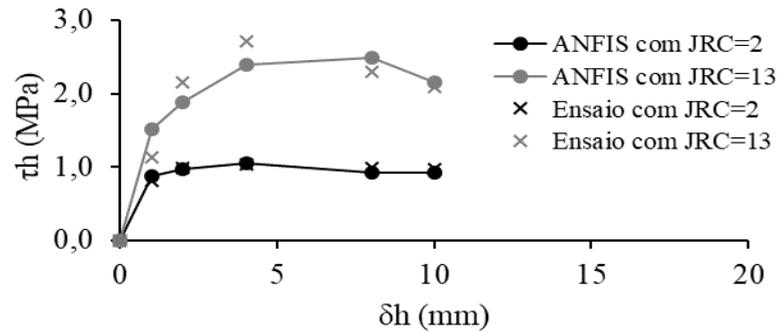
(a) Valores observados e previstos de τ_h



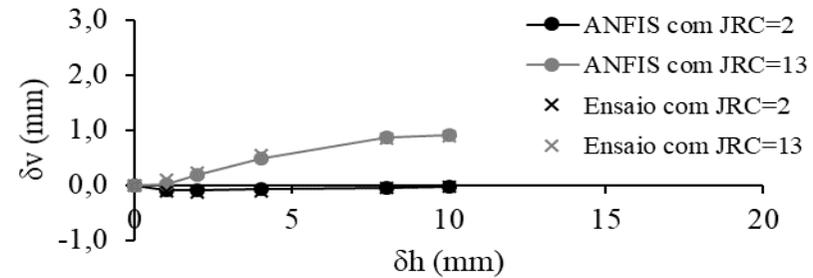
(b) Valores observados e previstos de δ_v

Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 5.5 – Modelo ANFIS: comparação da influência de JRC entre valores observados e previstos de τ_h para $k_n = 453$ kPa/mm, $\sigma_{no} = 1,63$ MPa, $\sigma_c = 20$ e 12 MPa e $\phi_b = 32$ e 37,5 graus



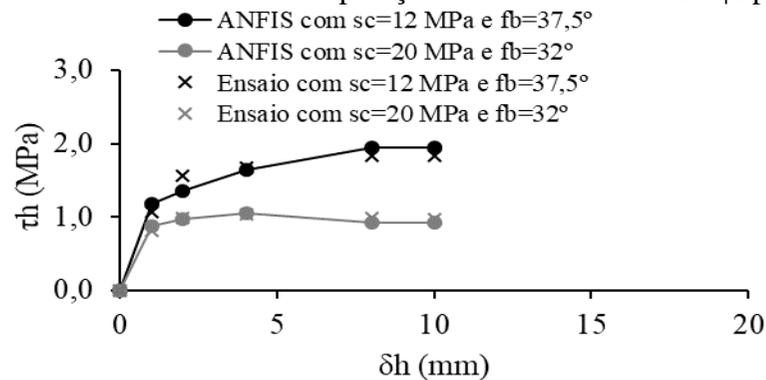
(a) Valores observados e previstos de τ_h



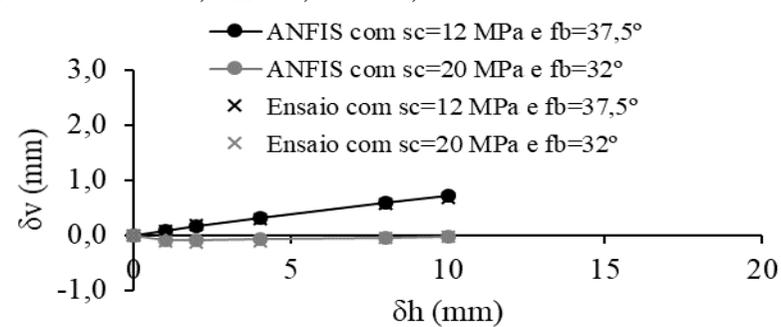
(b) Valores observados e previstos de δ_v

Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 5.6 – Modelo ANFIS: comparação da influência de σ_c e ϕ_b para $k_n = 453$ kPa/mm, $\sigma_{no} = 1,63$ MPa, JRC = 4 e 2



(a) Valores observados e previstos de τ_h

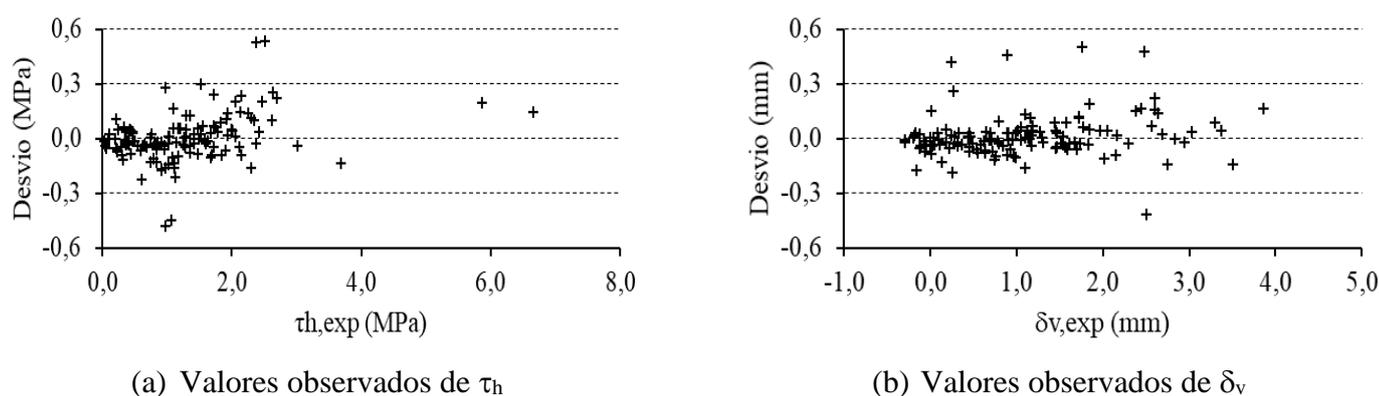


(b) Valores observados e previstos de δ_v

Fonte: elaborada pelo autor.

Constatou-se que os dois sistemas neuro-fuzzy para previsão de τ_h e δ_v exibiram, em todos os cenários analisados, valores muito próximos dos dados experimentais para as descontinuidades sem preenchimento. Recorrendo a uma verificação mais detalhada da performance do ANFIS, são apresentados, na Figura 5.7, os desvios de τ_h e δ_v em relação aos dados de validação.

Figura 5.7 – Desvios do modelo neuro-fuzzy tipo ANFIS

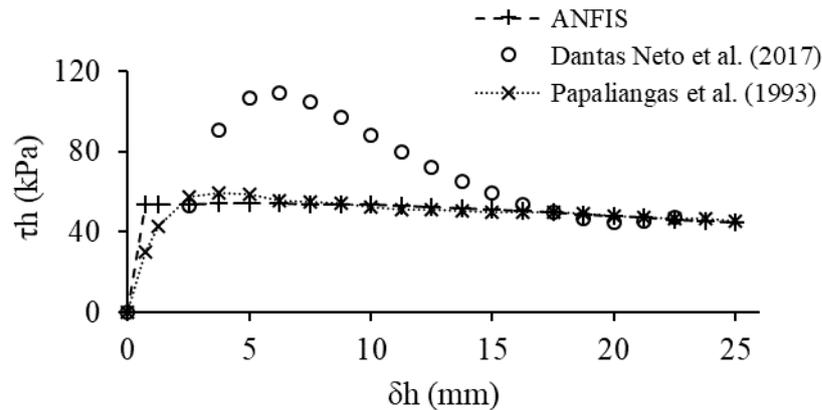


Fonte: elaborada pelo autor.

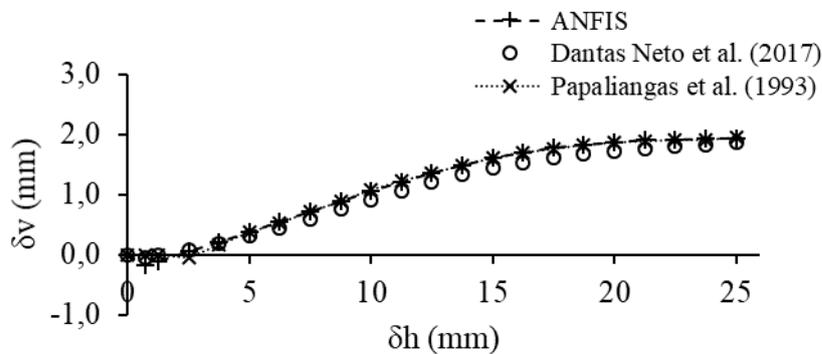
Foi constatado que, para a dilatação, os maiores desvios observados foram de 0,50 e 0,48 mm relativos aos dados dos ensaios de Papaliangas et al. (1993) e de Indraratna e Haque (2000). Com exceção de alguns dados isolados, no geral, o modelo ofereceu bons resultados para as diversas faixas de valores de δ_v com desvios absolutos menores que 0,20 mm. Isso mostra que o ANFIS conseguiu explicar, de forma adequada, o fenômeno da dilatação das descontinuidades limpas muito mais que os modelos fuzzy apresentados anteriormente.

No que diz respeito à resistência cisalhante, os maiores desvios obtidos foram de 0,54 MPa e 0,53 MPa relativos aos dados dos ensaios de Indraratna e Haque (2000) em descontinuidades brandas, com σ_c de 12 MPa. No entanto, atenção especial deve ser concedida às descontinuidades sem preenchimento em rochas muito brandas cujas baixas resistências ao cisalhamento são mais sensíveis aos desvios fornecidos pelas previsões do ANFIS. A Figura 5.8 apresenta uma comparação entre os resultados do ANFIS e os ensaios de Papaliangas et al. (1993) em rochas muito brandas, com σ_c de 3,5 MPa. São exibidas também as previsões do modelo de Dantas Neto et al. (2017).

Figura 5.8 – Verificação do desempenho do ANFIS na previsão de τ_h e δ_v para as descontinuidades em rochas muito brandas dos ensaios de Papaliangas et al. (1993)



(a) Resistência ao cisalhamento



(b) Dilatância

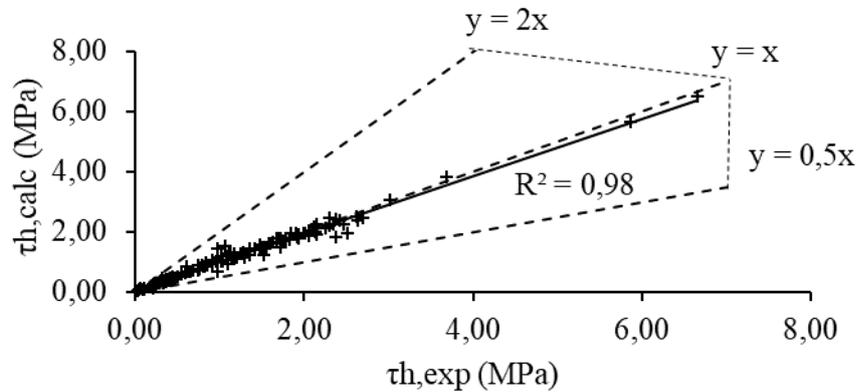
Fonte: elaborada pelo autor.

Mesmo recebendo poucas informações sobre o comportamento de descontinuidades em rochas muito brandas devido à limitação do conjunto de dados utilizado na sua construção, o ANFIS reproduziu excelentes resultados na previsão da resistência ao cisalhamento de descontinuidades com essas características. Ficou evidenciado que o modelo neuro-fuzzy revelou ser mais geral que o modelo neuronal de Dantas Neto et al. (2017), o qual não é recomendado para descontinuidades muito brandas, pois superestima os valores de resistência ao cisalhamento, geralmente muito baixos em descontinuidades deste tipo.

A Figura 5.9 comprova a notável capacidade do ANFIS na determinação da resistência ao cisalhamento de descontinuidades limpas e retrata a correlação entre valores observados e calculados de τ_h obtida para o modelo neuro-fuzzy com base no conjunto de dados de validação. Por meio de um coeficiente de determinação bastante expressivo de 0,98 e muito superior aos obtidos pelos modelos fuzzy Mamdani e Takagi-Sugeno, foi possível

confirmar a habilidade do ANFIS de explicar, com boa acurácia, a variação de τ_h durante o processo de cisalhamento de descontinuidades limpas.

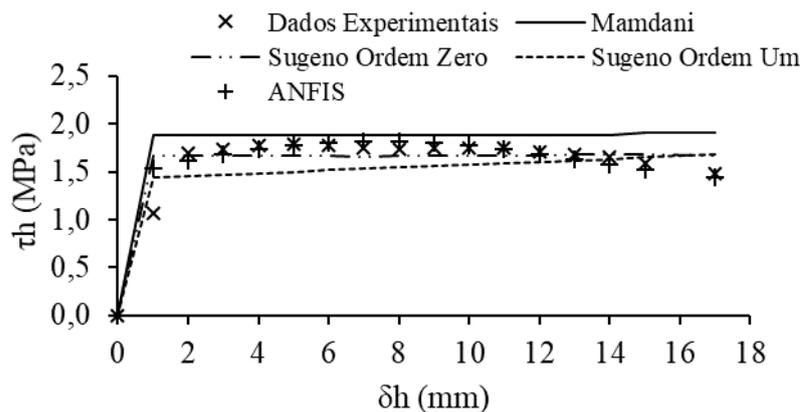
Figura 5.9 – Correlação entre τ_h medido e calculado pelo modelo neuro-fuzzy tipo ANFIS



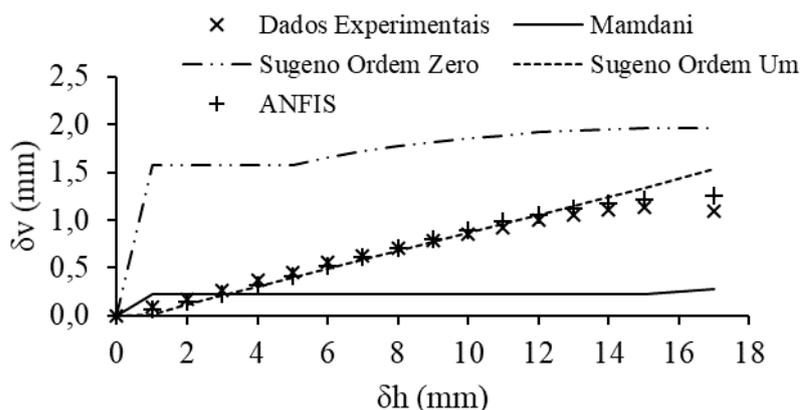
Fonte: elaborada pelo autor.

Finalmente, a Figura 5.10 apresenta uma comparação entre os resultados dos modelos fuzzy Mamdani e Takagi-Sugeno e neuro-fuzzy além dos dados experimentais e confirma a superioridade do ANFIS em descrever o comportamento cisalhante das descontinuidades. Suas previsões foram melhores principalmente para a dilatância.

Figura 5.10 – Comparação entre dados experimentais e previsões dos modelos fuzzy e neuro-fuzzy



(a) Resistência ao cisalhamento



(b) Dilatância

Fonte: elaborada pelo autor.

5.5 Conclusões parciais

Verificou-se que, entre todas as alternativas avaliadas, o modelo com 6 variáveis de entrada utilizando a técnica da repartição em grades com duas funções de pertinência do tipo gaussiana para cada entrada e adotando funções de implicação lineares foi o que apresentou melhor desempenho. Esse fato corrobora a orientação de Jang e Sun (1995), os quais não recomendam o uso da técnica da repartição em grades para sistemas com muitas variáveis de entrada e várias funções de pertinência.

Pelas análises dos resultados obtidos, o ANFIS mostrou que consegue prever, com bom desempenho, o comportamento cisalhante de descontinuidade sem preenchimento. Suas previsões foram melhores principalmente para a dilatação. A habilidade do ANFIS de explicar a variação de τ_h durante o processo de cisalhamento de descontinuidades limpas foi confirmada por meio de um coeficiente de determinação bastante expressivo de 0,98 e muito superior aos obtidos pelos modelos fuzzy Mamdani e Takagi-Sugeno.

Finalmente, ficou evidenciado que os dois sistemas neuro-fuzzy para previsão de τ_h e δ_v exibiram, em todos os cenários analisados, pequenos desvios e resultados muito próximos dos dados experimentais das descontinuidades sem preenchimento, comprovando a capacidade dos sistemas neuro-fuzzy de explicar o funcionamento de fenômenos físicos complexos.

Porém, o modelo neuro-fuzzy tipo ANFIS é limitado pelos domínios de suas variáveis de entrada os quais são definidos durante sua construção, ou seja, ele não permite que sejam inseridas em seus dados de entrada medidas que estejam fora do seu intervalo de atuação preestabelecido. No presente trabalho, o sistema neuro-fuzzy ficou condicionado,

portanto, ao domínio das medições dos ensaios de cisalhamento direto para a maioria de seus parâmetros. Entretanto, esses domínios podem sofrer ajustes na medida em que novos conjuntos de dados estejam disponíveis. Além disso, assim como os modelos fuzzy Mamdani e Takagi-Sugeno, o modelo neuro-fuzzy proposto, a princípio, necessita do *software* MATLAB para a realização de suas previsões, não sendo possível ainda a sua utilização em outros programas mais acessíveis.

6 APLICAÇÃO PRÁTICA DOS MODELOS EM ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDE ROCHOSO

Neste capítulo, os modelos fuzzy e neuro-fuzzy apresentados anteriormente serão utilizados em uma aplicação prática para determinar os fatores de segurança de três taludes rochosos fictícios com superfícies de deslizamento definidas por descontinuidades sem preenchimento.

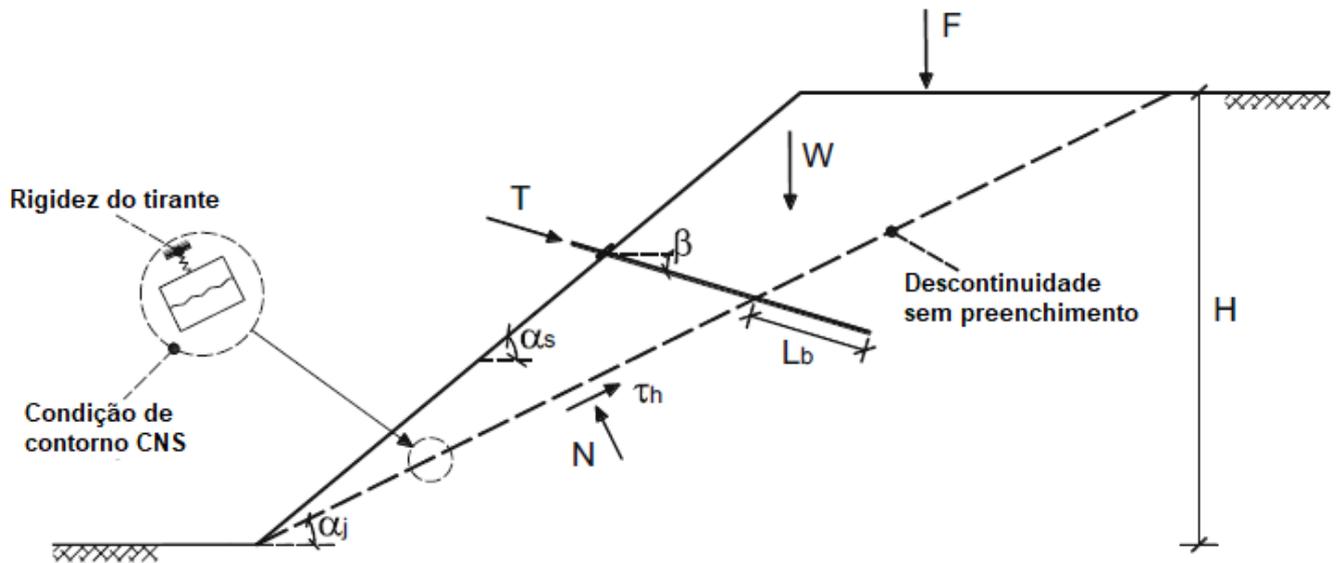
6.1 Definição do problema

Inicialmente, para a aplicação dos modelos fuzzy e neuro-fuzzy em problemas de estabilidade de taludes rochosos, foram considerados dois taludes rochosos hipotéticos com suas propriedades e suas condições de contorno impostas restritas às características dos ensaios realizados por Skinas et al. (1990) e Indraratna e Haque (2000). Foi admitido que a estabilidade desses taludes era governada por descontinuidades com comportamento semelhante ao obtidos nos resultados experimentais.

Porém, como os ensaios de Skinas et al. (1990) e Indraratna e Haque (2000) foram empregados na construção desses modelos, um terceiro talude cujas características foram definidas por uma descontinuidade hipotética proposta por Dantas Neto et al. (2017), também, foi avaliado.

Conforme está representado na Figura 6.1, as análises de estabilidade foram feitas admitindo-se a configuração geral de um talude rochoso submetido a uma sobrecarga F , com altura H , inclinação α_s e cuja superfície potencial de deslizamento é definida por uma descontinuidade sem preenchimento com ângulo α_j . A presença da força aplicada pelo tirante T define a rigidez de contorno do problema (condição CNS).

Figura 6.1 – Configuração geral para problemas de análise de estabilidade de taludes rochosos



Fonte: Indraratna et al. (2010a).

O peso da cunha (W) delimitada pela descontinuidade da rocha provoca a instabilização do talude e pode ser determinado de acordo com a Equação 6.1.

$$W = 0,5\gamma H^2(\cot \alpha_j - \cot \alpha_s) \quad (6.1)$$

A tensão normal atuante na descontinuidade (σ_n) pode ser determinada em função do aumento da força normal (N) que age na descontinuidade devido à condição de contorno CNS imposta pelos tirantes. Por sua vez, esse aumento na força normal depende da quantidade de tirantes inseridos no talude (n), dos seus espaçamentos horizontais (s_h) e da sua inclinação (β) além da força normal inicial (N_0) atuante na descontinuidade.

$$\sigma_n = \frac{N \sen \alpha_j}{H} \quad (6.2)$$

$$N = N_0 + \frac{n}{s_h} T \sen(\alpha_j + \beta) \quad (6.3)$$

Em situações de taludes sem a presença de tirantes, a força normal é constante e calculada segundo a Equação 6.4.

$$N_0 = (W + F) \cos \alpha_j \quad (6.4)$$

O valor de T pode ser calculado por meio das características dos tirantes e da dilatância da descontinuidade (δ_v) cuja medida pode ser obtida por ensaios de laboratório ou

fornecida por algum outro procedimento de cálculo acessível, os modelos fuzzy e neuro-fuzzy propostos por exemplo.

$$T = \frac{E_b A_b}{L_b} \frac{\delta_v}{\text{sen}(\alpha_j + \beta)} \quad (6.5)$$

Onde:

E_b é o módulo de elasticidade do tirante;

A_b é a área da seção transversal do tirante;

L_b é o comprimento do bulbo de ancoragem do tirante.

Para o caso de taludes atirantados, a rigidez normal de contorno atuante na descontinuidade pode ser definida pelas propriedades elásticas dos tirantes e pela geometria da descontinuidade.

$$k_n = \frac{n E_b A_b \text{sen} \alpha_j}{H L_b s_h \text{sen}(\alpha_j + \beta)} \quad (6.6)$$

Por fim, o fator de segurança (FS) é obtido pela relação entre as forças resistentes e as forças que induzem o movimento da cunha.

$$FS = \frac{\tau_h \left(\frac{H}{\text{sen} \alpha_j} \right) + \left(\frac{n}{s_h} \right) T \cos(\alpha_j + \beta)}{(W + F) \text{sen} \alpha_j} \quad (6.7)$$

A resistência ao cisalhamento (τ_h) pode ser determinada por ensaios de laboratório ou estimada por qualquer metodologia de cálculo disponível.

6.2 Apresentação e discussão dos resultados

A Tabela 6.1 resume as propriedades das descontinuidades e as suas condições de contorno impostas além das características dos taludes e dos tirantes que serão adotadas nas análises de estabilidade.

Tabela 6.1 – Dados das descontinuidades, dos taludes e dos tirantes para as análises de estabilidade

Fonte	Descontinuidade				Talude rochoso						Tirante					
	kn (kPa/mm)	σ_{no} (MPa)	JRC	σ_c (MPa)	ϕ_b (grau)	H (m)	α_s (grau)	α_j (grau)	γ (kN/m ³)	F (kN)	db (mm)	Lb (m)	β (grau)	sh (m)	n	Eb (GPa)
Indraratna e Haque (2000)	453	0,56	13	12	37,5	35	80	11	27,5	21000	63,5	1	15	1	58	200
Skinas et al. (1990)	0	1	9	27,5	37	66	90	20	30	26000	–	–	–	–	–	–
Dantas Neto et al. (2017)	560	0,5	5	12	37,5	40	85	15	27,5	0	63,5	1	15	1	68	200

Fonte: elaborada pelo autor.

Dessa forma, as análises consideraram os valores de τ_h e δ_v obtidos nos ensaios de Skinas et al. (1990) e Indraratna e Haque (2000) e estimados pelos modelos fuzzy e neuro-fuzzy desenvolvidos para a determinação do fator de segurança. Nesses cenários, os resultados fornecidos pelos ensaios foram tomados como referência.

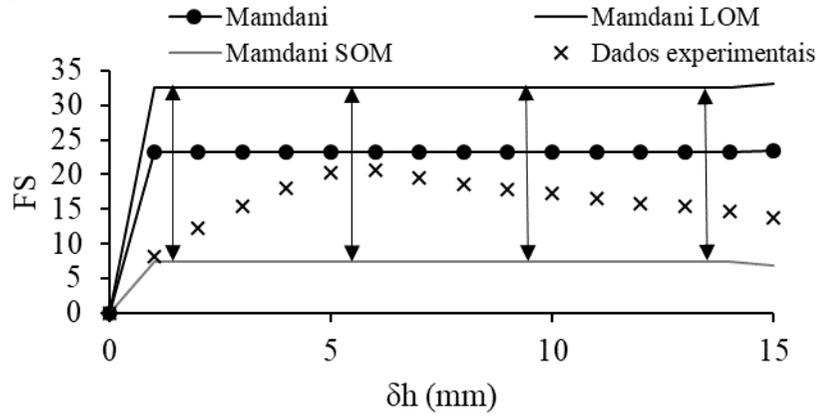
No caso da descontinuidade hipotética, foram utilizadas as previsões do modelo neuronal de Dantas Neto et al. (2017) como orientação para as previsões dos controladores fuzzy e neuro-fuzzy.

As Figuras 6.2, 6.3 e 6.4 apresentam os fatores de segurança obtidos por cada metodologia de cálculo, respectivamente, para as descontinuidades dos ensaios de Indraratna e Haque (2000) e Skinas et al. (1990) e para a descontinuidade hipotética de Dantas Neto et al. (2017).

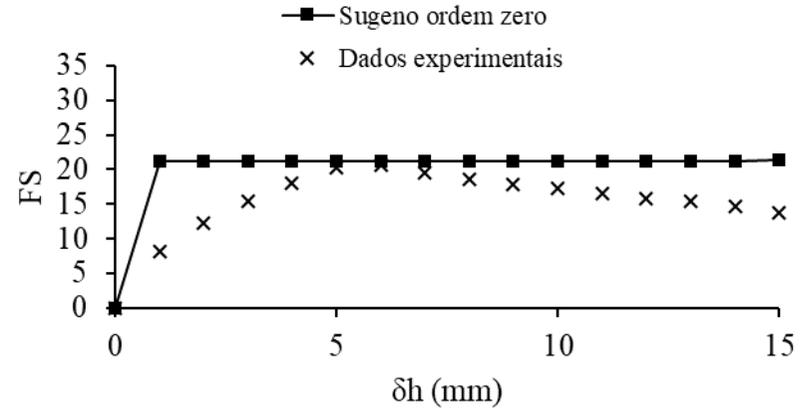
Diante de todos os cenários analisados, ficou constatada a excelência do ANFIS na obtenção dos fatores de segurança. A forma eficiente de obter a estrutura inicial do seu sistema de inferência fuzzy, a alta capacidade de otimizar seus parâmetros, aliadas com a utilização de um conjunto de dados de entrada e saída robusto e diversificado fez com que o ANFIS fosse o modelo com a melhor performance entre os demais.

Para os taludes definidos com propriedades e condições de contorno dos ensaios de Skinas et al. (1990) e Indraratna e Haque (2000), o ANFIS exibiu uma diminuição do fator de segurança causada pela redução na resistência ao cisalhamento devido, provavelmente, à degradação das asperezas das descontinuidades. Os controladores fuzzy Mamdani e Takagi-Sugeno mostraram pouca ou nenhuma sensibilidade à ocorrência dessa degradação.

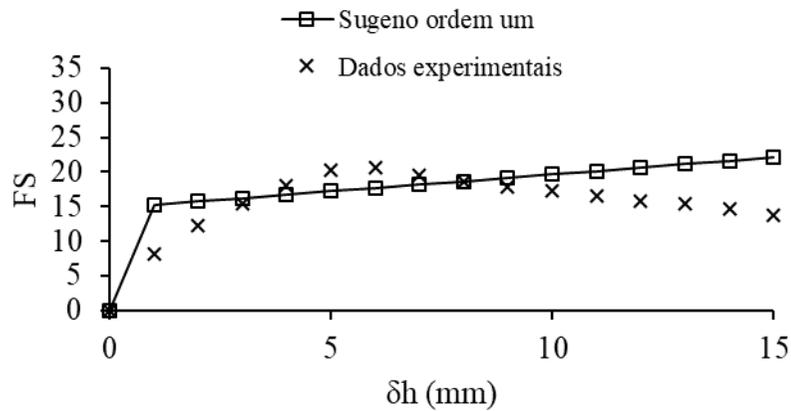
Figura 6.2 – Fatores de segurança para o talude 1 em rocha branda definido com propriedades e condições de contorno dos ensaios de Indraratna e Haque (2000)



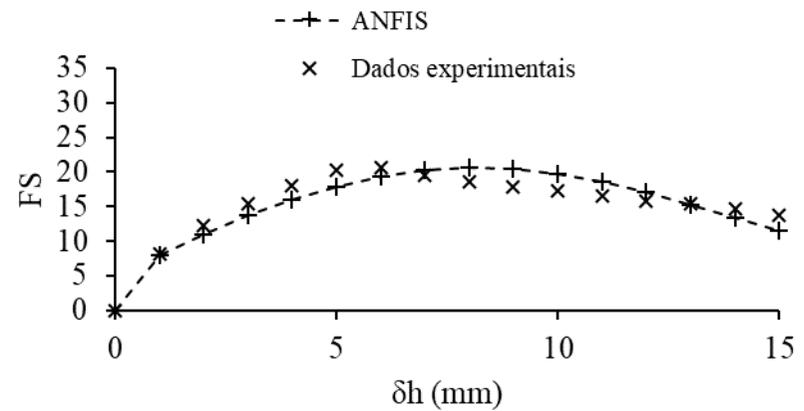
(a) Mamdani



(b) Takagi-Sugeno de ordem zero



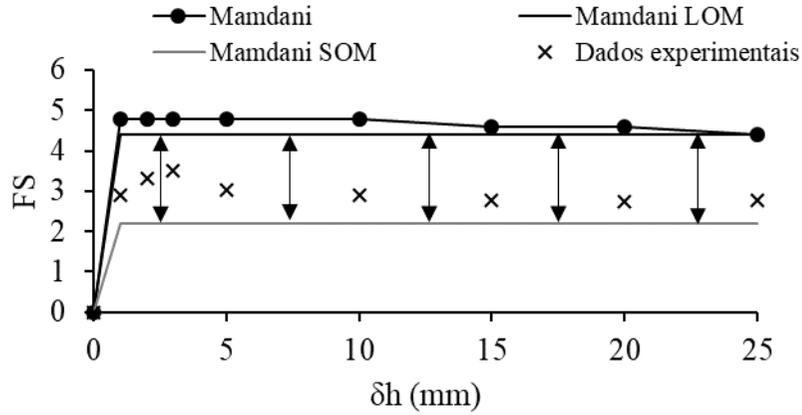
(c) Takagi-Sugeno de ordem um



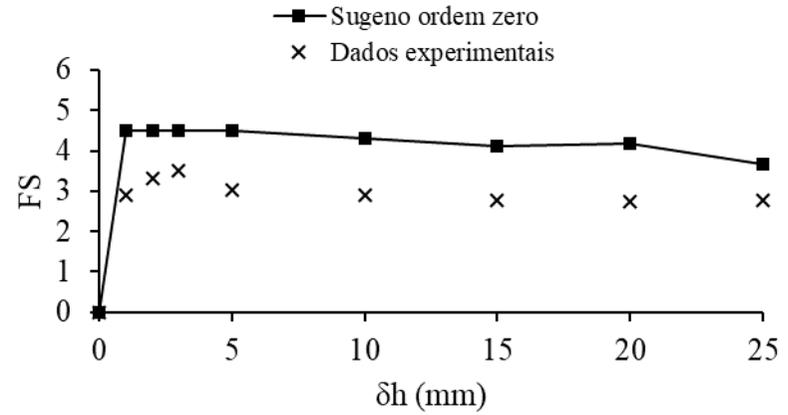
(d) ANFIS

Fonte: elaborada pelo autor.

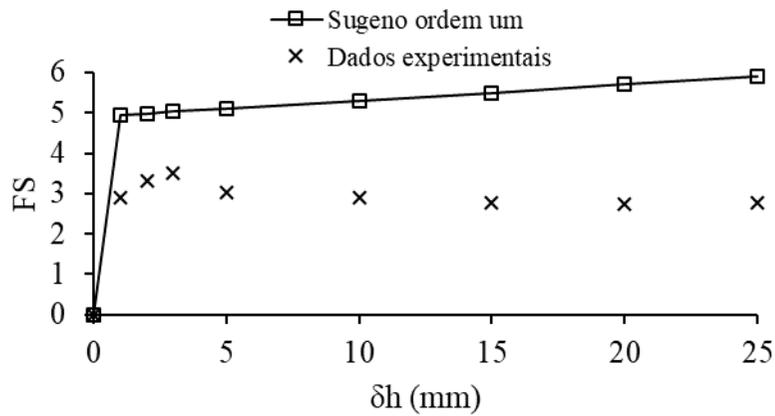
Figura 6.3 – Fatores de segurança para o talude 2 em rocha resistente definido com propriedades e condições de contorno dos ensaios de Skinas et al. (1990)



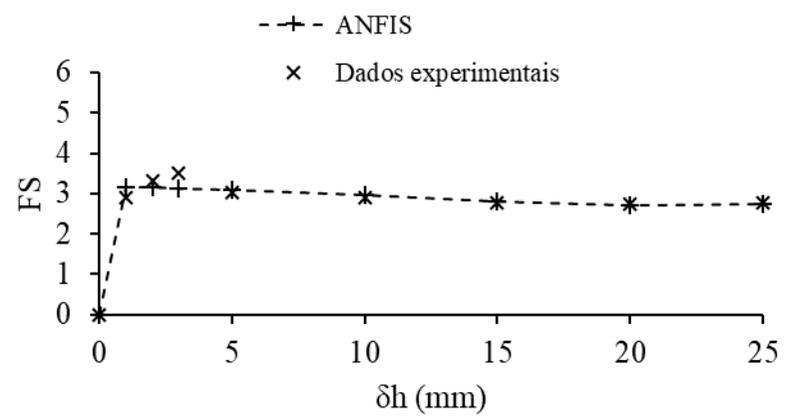
(a) Mamdani



(b) Takagi-Sugeno de ordem zero



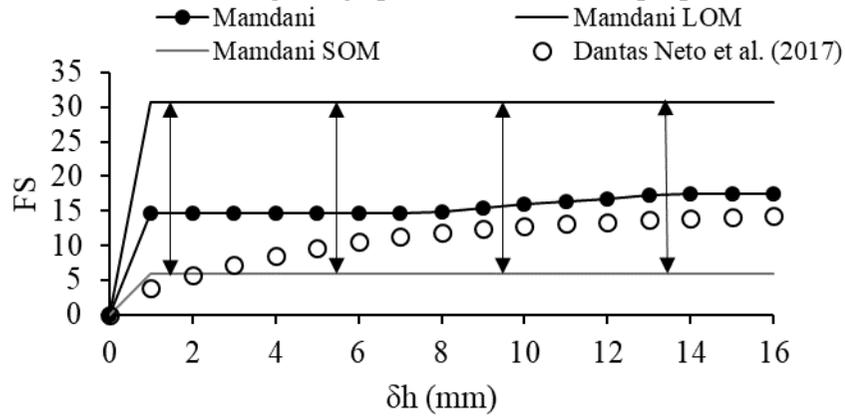
(c) Takagi-Sugeno de ordem um



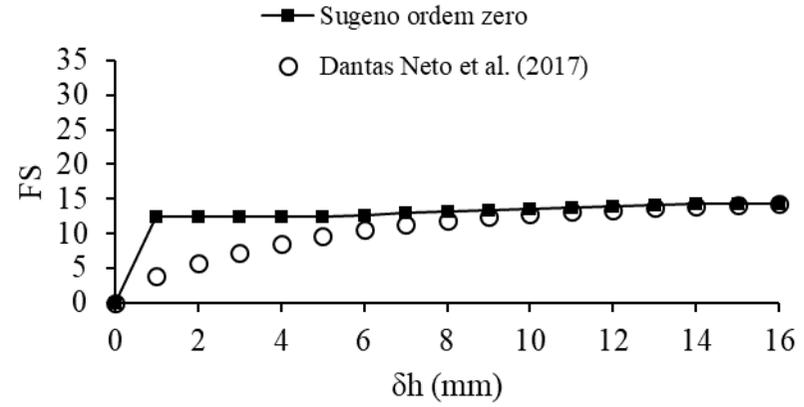
(d) ANFIS

Fonte: elaborada pelo autor.

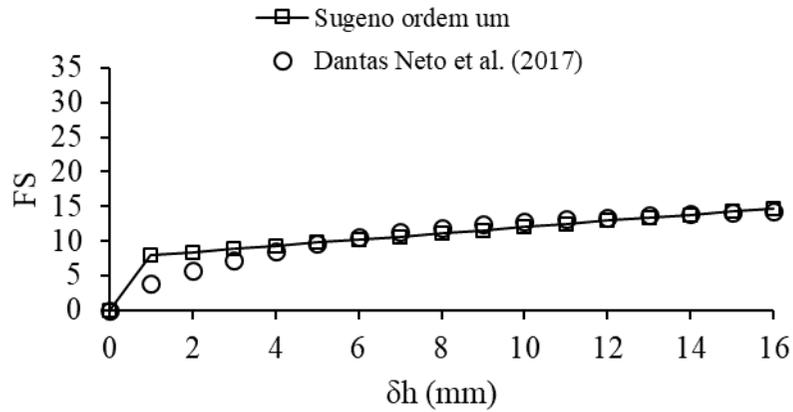
Figura 6.4 – Fatores de segurança para o talude 3 com propriedades e condições de contorno definidas de acordo com Dantas Neto et al. (2017)



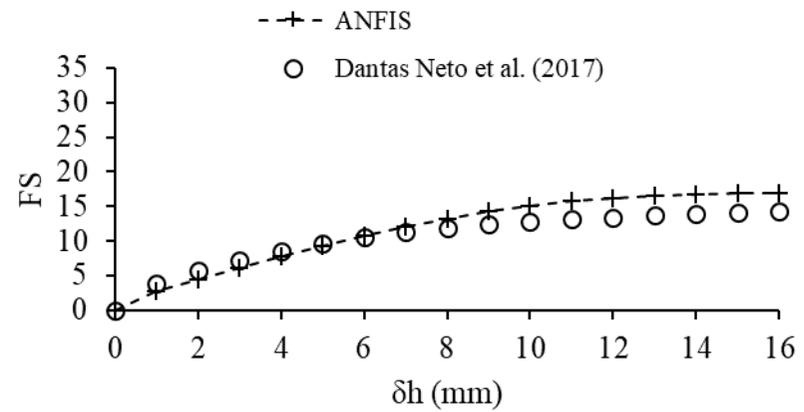
(a) Mamdani



(b) Takagi-Sugeno de ordem zero



(c) Takagi-Sugeno de ordem um



(d) ANFIS

Fonte: elaborada pelo autor.

Entre os dois modelos do tipo Takagi-Sugeno, ficou evidenciada uma ligeira vantagem do sistema que utilizou τ_h e δ_v como funções lineares, por conseguir estimar a dilatância com maior acurácia, parâmetro considerado nos cálculos da força de tração aplicada pelo tirante e que, portanto, pode influenciar o valor do fator de segurança dependendo da condição de contorno da descontinuidade. Desse modo, o melhor desempenho do Takagi-Sugeno de ordem zero para o talude definido pelos ensaios de Skinas et al. (1990) pode ser explicado, talvez, pela condição de contorno CNL imposta que anulou o efeito da dilatância no aumento da tensão normal.

Observou-se, também, que o controlador Mamdani foi o que apresentou previsões mais divergentes dos demais. Esse fato já havia sido constatado durante a obtenção dos desvios absolutos médios dos modelos, e reafirma as orientações de Mathworks (2006) e Simões e Shaw (2007) de que os sistemas Takagi-Sugeno são mais adequados para análises matemáticas com dados de entrada e saída numéricos, e mais eficientes computacionalmente do que os sistemas Mamdani.

No entanto, a particularidade da metodologia de Mamdani de permitir a definição das margens de imprecisão dos valores de fator de segurança se mostrou bastante proveitosa para o julgamento do engenheiro geotécnico durante suas análises, já que, em todos os cenários, os valores dos fatores de segurança fornecidos pelos dados experimentais estavam dentro da região delimitada pelo modelo. Uma recomendação interessante, e de grande utilidade para aplicações práticas do modelo Mamdani, seria descobrir procedimentos alternativos que obtivessem um intervalo de variação menor para τ_h e, principalmente, para δ_v .

As análises foram importantes para compreender melhor a forma de aplicação dos modelos fuzzy e neuro-fuzzy na prática geotécnica, revelando, ainda, a possibilidade de utilização desses modelos em situações de campo quando a reprodução em laboratório seja difícil ou inviável. Porém, é necessário verificar, ainda, a acurácia dos modelos para casos que envolvam taludes rochosos reais com descontinuidades e condições de contorno diversas e que, preferencialmente, não estejam dentro do conjunto de dados adotado na criação dos modelos.

7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Neste capítulo, serão apresentadas as conclusões do trabalho, indicando os resultados obtidos e os objetivos alcançados. Por fim, serão sugeridas as pesquisas futuras necessárias para a complementação dos estudos apresentados neste trabalho.

7.1 Conclusões

O presente trabalho permitiu desenvolver modelos baseados em técnicas fuzzy e neuro-fuzzy para previsão da resistência ao cisalhamento e da dilatância de descontinuidades sem preenchimento de maciços rochosos. Todas as modelagens foram realizadas a partir de 44 ensaios de cisalhamento direto em diferentes tipos de descontinuidades e sob diferentes condições de contorno, resultando em um conjunto de dados de entrada e saída robusto com 673 exemplos para serem usados na construção dos modelos.

Com relação ao tema abordado no presente trabalho, conclui-se que existe um número razoável de pesquisas relativas à aplicação de sistemas fuzzy e neuro-fuzzy em Mecânica das Rochas, mas nenhuma delas estudou a previsão do comportamento cisalhante de descontinuidades sem preenchimento, fato que motivou o desenvolvimento do presente trabalho.

Quanto ao modelo fuzzy do tipo Mamdani, as análises de sensibilidade realizadas confirmaram a importância da utilização dos principais fatores que governam o comportamento cisalhante de descontinuidades sem preenchimento como entrada no sistema fuzzy. Além disso, justificaram a utilização de funções de pertinência trapezoidais e triangulares no modelo original a fim de reduzir o tempo de cálculo computacional de suas previsões.

Pelas análises dos resultados obtidos, ficou evidenciado que, de uma forma geral, o sistema fuzzy se mostrou relativamente próximo quanto ao comportamento e à ordem de grandeza das medições dos ensaios de cisalhamento direto. Contudo, o modelo revelou ser pouco sensível às variações da resistência ao cisalhamento e da dilatância ao longo da movimentação das descontinuidades.

Os desvios evidenciaram que as regras de inferência fuzzy desenvolvidas por meio de julgamento de especialistas e com base no conjunto de dados de ensaios não conseguiram explicar, de forma adequada, o fenômeno da dilatância das descontinuidades

limpas pelo modelo Mamdani. A correlação entre τ_h medido e calculado mostrou que, para a maioria dos casos, o modelo Mamdani superestima os valores de τ_h , revelando que não consegue explicar, de maneira razoável, sua variação durante o processo de cisalhamento de descontinuidades limpas.

Uma alternativa que pode ser mostrar bastante proveitosa para o julgamento do engenheiro geotécnico durante as previsões de τ_h e δ_v é a definição das margens de imprecisão de seus valores experimentais. Foi constatado que o procedimento utilizando o método do menor dos máximos (SOM) e o método do maior dos máximos (LOM) mostrou resultados mais satisfatórios, pois os valores experimentais de τ_h e δ_v se encontraram dentro do intervalo definido em todas as análises realizadas, apesar de as diferenças entre os limites superior e inferior serem relativamente grandes. Todavia, no que diz respeito à τ_h , o intervalo de variação não se mostrou proveitoso para pequenos deslocamentos horizontais, inferiores a 2 mm. Entretanto, do ponto de vista prático, o modelo permitiu definir o menor valor de resistência cisalhante que pode ser adotado diante das incertezas envolvidas. Para δ_v , as margens de variação foram relevantes apenas para confirmar a ocorrência de dilatação ou compressão das descontinuidades durante o processo de cisalhamento.

Com relação aos modelos fuzzy Takagi-Sugeno de ordens zero e um, similar ao que foi observado para o modelo Mamdani, pelas análises dos resultados obtidos, ficou evidenciado que, de uma forma geral, os sistemas fuzzy se mostraram, relativamente, próximos quanto ao comportamento e à ordem de grandeza das medições dos ensaios de cisalhamento direto. Contudo, os dois modelos fuzzy Takagi-Sugeno apresentaram comportamento do tipo elástico-perfeitamente plástico, já que, em alguns casos, não previram o endurecimento nem o relaxamento de tensão que ocorreram nas descontinuidades ao longo do deslocamento horizontal. Com relação à dilatância, o modelo Takagi-Sugeno de ordem zero revelou ser pouco sensível à variação de δ_v durante a movimentação das descontinuidades.

Os desvios revelaram que o modelo Takagi-Sugeno de ordem um conseguiu explicar, de forma mais adequada, o fenômeno da dilatância das descontinuidades limpas do que o modelo Takagi-Sugeno de ordem zero. As correlações entre τ_h medido e calculado mostrou que, apesar de não exibirem valores muito expressivos de coeficientes de determinação, os modelos fuzzy Takagi-Sugeno de ordens zero e um apresentaram um bom desempenho, conseguindo explicar, de maneira razoável, a variação de τ_h durante o processo de cisalhamento de descontinuidades limpas.

Dessa maneira, entre as análises dos dois modelos fuzzy Takagi-Sugeno de ordens zero e um, ficou evidenciado que os sistemas que utilizaram as funções de implicação como equações lineares apresentaram resultados mais acurados que os sistemas que adotaram constantes para os consequentes de suas regras. Fato que se deve, possivelmente, à utilização de coeficientes apropriados para essas equações, obtidos por regressões lineares múltiplas realizadas com os resultados dos ensaios de cisalhamento direto.

Pelos resultados expostos, foi possível constatar a relevância das afirmações de Mathworks (2006) e Simões e Shaw (2007) de que os sistemas Takagi-Sugeno são mais adequados para análises matemáticas com dados de entrada e saída numéricos e mais eficientes computacionalmente do que os sistemas Mamdani, os quais são intuitivos e mais recomendados para implementar o conhecimento de um especialista.

Quanto ao modelo neuro-fuzzy do tipo ANFIS, verificou-se que, entre todas as alternativas avaliadas, o modelo com 6 variáveis de entrada utilizando a técnica da repartição em grades com duas funções de pertinência do tipo gaussiana para cada entrada e adotando funções de implicação lineares foi o que apresentou melhor desempenho. Esse fato corrobora a orientação de Jang e Sun (1995) que não recomendam o uso da técnica da repartição em grades para sistemas com muitas variáveis de entrada e várias funções de pertinência.

Pelas análises dos resultados obtidos, o ANFIS mostrou que consegue prever, com bastante acurácia, o comportamento não-linear da resistência cisalhante com o endurecimento e o relaxamento de tensão de τ_h além das variações de δ_v ao longo do deslocamento das descontinuidades.

Finalmente, ficou evidenciado que os dois sistemas neuro-fuzzy para previsão de τ_h e δ_v exibiram, em todos os cenários analisados, pequenos desvios e resultados muito próximos dos valores observados nas descontinuidades sem preenchimento fornecidos pelos ensaios de cisalhamento direto. Comprovando a capacidade dos sistemas neuro-fuzzy de explicar o funcionamento de fenômenos físicos complexos.

Com relação à aplicação prática dos modelos nas análises de estabilidade dos taludes rochosos, ficou constatada, diante de todos os cenários analisados, a excelência do ANFIS na obtenção dos fatores de segurança. A forma eficiente de obter a estrutura inicial do seu sistema de inferência fuzzy, a alta capacidade de otimizar seus parâmetros, aliadas com a utilização de um conjunto de dados de entrada e saída robusto e diversificado fez com que o ANFIS fosse o modelo com a melhor performance entre os demais.

Para os taludes definidos com propriedades e condições de contorno dos ensaios de Skinas et al. (1990) e Indraratna e Haque (2000), o ANFIS exibiu uma diminuição do fator de segurança causada pela redução na resistência ao cisalhamento devido, provavelmente, à degradação das asperezas das descontinuidades. Os controladores fuzzy Mamdani e Takagi-Sugeno mostraram pouca ou nenhuma sensibilidade à ocorrência dessa degradação.

Entre os dois modelos do tipo Takagi-Sugeno, ficou evidenciada uma ligeira vantagem do sistema que utilizou τ_h e δ_v como funções lineares, por conseguir estimar a dilatância com maior acurácia, parâmetro considerado nos cálculos da força de tração aplicada pelo tirante e que, portanto, pode influenciar o valor do fator de segurança dependendo da condição de contorno da descontinuidade. Desse modo, o melhor desempenho do Takagi-Sugeno de ordem zero para o talude definido pelos ensaios de Skinas et al. (1990) pode ser explicado, talvez, pela condição de contorno CNL imposta que anulou o efeito da dilatância no aumento da tensão normal.

Observou-se, também, que o controlador Mamdani foi o que apresentou previsões mais divergentes dos demais. Esse fato já havia sido constatado durante a obtenção dos desvios absolutos médios dos modelos e reafirma as orientações de Mathworks (2006) e Simões e Shaw (2007) de que os sistemas Takagi-Sugeno são mais adequados para análises matemáticas com dados de entrada e saída numéricos e mais eficientes computacionalmente do que os sistemas Mamdani. No entanto, a particularidade da metodologia de Mamdani de permitir a definição das margens de imprecisão dos valores de fator de segurança se mostrou bastante proveitosa para o julgamento do engenheiro geotécnico durante suas análises, já que, em todos os cenários, os valores dos fatores de segurança fornecidos pelos dados experimentais estavam dentro da região delimitada pelo modelo.

As análises foram importantes para compreender melhor a forma de aplicação dos modelos fuzzy e neuro-fuzzy na prática geotécnica, revelando, ainda, a possibilidade de utilização desses modelos em situações de campo quando a reprodução em laboratório seja difícil ou inviável. Porém, é necessário verificar, ainda, a acurácia dos modelos para casos que envolvam taludes rochosos reais com descontinuidades e condições de contorno diversas e que, preferencialmente, não estejam dentro do conjunto de dados adotado na criação dos modelos.

Os modelos fuzzy e neuro-fuzzy propostos permitem a descrição completa do comportamento cisalhante das descontinuidades sem preenchimento de forma simples. Por meio deles, a resistência ao cisalhamento pode ser calculada diretamente ou, de forma indireta,

utilizando a dilatação, parâmetro essencial para a determinação de τ_h em alguns dos principais modelos analíticos existentes, como o de Indraratna e Haque (2000) cuja obtenção de δ_v é restrita às limitações do equipamento de ensaio e do processo de amostragem.

É importante mencionar que todos os modelos propostos no presente trabalho não consideram os efeitos da pressão de água nem das condições de drenagem das descontinuidades. Evidentemente, também não avaliam a influência do material preenchimento no comportamento cisalhante das descontinuidades.

Por último, é importante mencionar que, como principal limitação, os modelos fuzzy e neuro-fuzzy desenvolvidos no presente trabalho estão limitados pelos domínios de suas variáveis de entrada os quais são definidos durante sua construção, ou seja, eles não permitem que sejam inseridas em seus dados de entrada medidas que estejam fora do seu intervalo de atuação preestabelecido. No presente trabalho, os sistemas ficaram condicionados ao domínio das medições dos ensaios de cisalhamento direto para a maioria de seus parâmetros. Entretanto, esses domínios podem sofrer ajustes na medida em que novos conjuntos de dados estejam disponíveis. Além disso os modelos fuzzy e neuro-fuzzy propostos, a princípio, necessitam do *software* MATLAB para a realização de suas previsões, não sendo possível ainda a sua utilização em outros programas mais acessíveis.

7.2 Sugestões para pesquisas futuras

Algumas possibilidades para melhoria e continuação da pesquisa realizada no presente trabalho foram identificadas durante o seu desenvolvimento. Recomendam-se, assim:

- Incluir, no conjunto de dados, exemplos de entrada e saída que contemplem novos cenários ainda não considerados, possibilitando a criação de novas regras de inferência para os modelos Mamdani e Takagi-Sugeno de ordens zero e um e permitindo que esses modelos cubram uma maior parte dos fenômenos físicos analisados;
- Incluir novos conjuntos de dados de descontinuidades com características e condições de contorno mais diversificadas para o desenvolvimento de um modelo neuro-fuzzy ANFIS mais abrangente e com um melhor desempenho;

- Desenvolver modelos Mamdani e Takagi-Sugeno de ordens zero e um alterando os parâmetros das funções de pertinência, isto é, aumentando e reduzindo a imprecisão de suas variáveis;
- Desenvolver modelos Takagi-Sugeno de ordens zero e um com uma quantidade de funções de implicação igual ao número de regras;
- Verificar a influência das variáveis de entrada e dos tipos de função de pertinência nos modelos Takagi-Sugeno de ordens zero e um;
- Ajustar os coeficientes das funções lineares do modelo Takagi-Sugeno de ordem um de forma a otimizar seus parâmetros;
- Descobrir, para aplicações práticas do modelo Mamdani, procedimentos alternativos que obtenham um intervalo de variação menor para τ_h e, principalmente, para δ_v ;
- Realizar análises de estabilidade de taludes rochosos reais com descontinuidades e condições de contorno diversas a fim de verificar a acurácia dos modelos para casos que, preferencialmente, não estejam dentro do conjunto de dados adotado na sua construção;
- Utilizar a Lógica Fuzzy do tipo 2, que trata as incertezas associadas aos conjuntos fuzzy e permite considerar a imprecisão que existe na definição das funções de pertinência das variáveis, para determinar a resistência ao cisalhamento e a dilatância de descontinuidades sem preenchimento;
- Realizar modelagens fuzzy e neuro-fuzzy para determinar a resistência ao cisalhamento e a dilatância de descontinuidades com preenchimento.

REFERÊNCIAS

- AKGUN, A.; SEZER, E. A.; NEFESLIOGLU, H. A.; GOKCEOGLU, C.; PRADHAN, B. An easy-to-use MATLAB program (MamLand) for the assessment of landslide susceptibility using a Mamdani fuzzy algorithm. **Computers & Geosciences**, n. 38, p. 23-34, 2012.
- ANDRADE, M.; JACQUES, M. A. P. Estudo comparativo de controladores de Mamdani e Sugeno para controle de tráfego em interseções isoladas, **TRANSPORTES**, v. XVI, n. 2, p. 24-31, 2008.
- ASADI, M. Optimized Mamdani fuzzy models for predicting the strength of intact rocks and anisotropic rock masses. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, n. 8, p. 218-224, 2016.
- BANDIS, S. C. Mechanical properties of rock joints. In: Barton & Stephansson (ed.), **Proceedings...** Loen, Norway, 1990, p. 125-140.
- BANDIS, S. C.; BARTON, N. R.; CHRISTIANSON, M. Application of a new numerical model of joint behaviour to rock mechanics problems. In: Stephansson (ed.), **Proceedings...** Björkliden, Sweden, September, 1985, p. 345-356.
- BARTON, N. R. A relationship between joint roughness and joint shear strength. In: INT. SYMP. ROCK MECH. **Proceedings...** Nancy, 1971, Paper I-8.
- BARTON, N. R. Review of a new shear strength criterion for rock joints. **Engineering Geology**. n. 7, p. 287-332, 1973.
- BARTON, N. R. The shear strength of rocks and rock joints. **Int. J. Rock Mech. Min. Sci.**, n. 13, p. 255-279, 1976.
- BARTON, N. R. Modelling rock joint behavior from in-situ block tests: implications for nuclear waste repository design. **ONWI-308**, Columbus, September, 1982.
- BARTON, N. R.; BANDIS, S. C. Review of predictive capabilities of JRC-JCS model in engineering practice. In: Barton N. R., Stephansson O. (eds) **Proceedings ...** Loen, Norway. Balkema, Rotterdam, 1990, p. 603-610.
- BARTON, N. R.; BANDIS, S. C.; BAKHTAR, K. Strength, deformation and conductivity coupling of rock joints. **Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. & Geomech**, v. 22, n. 3, p. 121-140, 1985.
- BARTON, N. R.; CHOUBEY, V. The shear strength of rock joints in theory and practice. **Rock Mechanics**. v. 10, p. 1-54, 1977.
- BENINI, L. C. **Estimação da densidade de solos utilizando sistemas de inferência fuzzy**. 2007. 211 f. Tese (Doutorado) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2007.
- BENMOKRANE, B.; BALLIVY, G. **Laboratory study of shear behaviour of rock joints**

under constant normal stiffness conditions. In: Khair (ed) *Rock mechanics as a guide of efficient utilization of natural resources*. Balkema Publishers, Rotterdam, p. 899-906, 1989.

BERENJI, H. R. **Fuzzy and neural control.** In: Antsaklis, P.; Passino, K. *An introduction to intelligent and autonomous control*. Kluwer Academic Publishers. 1993.

BIENIAWSKI, Z. T. **Rock mechanics design in mining and tunneling.** A. A. Balkema, Rotterdam, 272 p., 1984.

BRADY, B. H. G.; BROWN, E. T. **Rock mechanics for underground mining.** George Allen & Unwin, London, UK, 571 p., 2005.

CAMPOS, M. M.; SAITO, K. **Sistemas inteligentes em controle e automação de processos.** Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 235 p., 2004.

CHIU, S. L. Fuzzy model identification based on cluster estimation. **Journal of Intelligent and Fuzzy Systems**, v. 2, p. 267-278, 1994.

CUNDALL, P. A.; HART, R. D. **Analysis of block test No. 1 inelastic rock mass behavior: Phase 2 - A characterization of joint behavior (final report).** Itasca Consulting Group Report, Rockwell Hanford Operations, Subcontract SA-957, 1984.

DAFTARIBESHELI, A.; ATA EI, M.; SERESHKI, F. Assessment of rock slope stability using the Fuzzy Slope Mass Rating (FSMR) system. **Applied Soft Computing**, n. 11, p. 4465-4473, 2011.

DANTAS NETO, S. A.; INDRARATNA, B.; OLIVEIRA, D. A. F.; ASSIS, A. P. Modelling the shear behaviour of clean rock discontinuities using artificial neural networks. **Rock Mech Rock Eng**, v. 50, p. 1817-1831, 2017.

DUBOIS, D.; PRADE, H. **Possibility theory: an approach to computerized processing of uncertainty.** Plenum Press, New York, USA. 263 p. 1988.

DE TOLEDO, P. E. C.; DE FREITAS, M. H. Laboratory testing and parameters controlling the shear strength of filled rock joints. **Géotechnique**, v. 43, n. 1, p. 1-19, 1993.

GANOULIS, J. G. **Engineering risk analysis of water pollution: Probabilities and fuzzy sets.** New York: VCH Publishers, 1994.

GOKCEOGLU, C. A fuzzy triangular chart to predict the uniaxial compressive strength of the Ankara agglomerates from their petrographic composition. **Engineering Geology**, n. 66, p. 39-51, 2002.

GOKCEOGLU, C.; YESILNACAR, E.; SONMEZ, H.; KAYABASI, A. A neuro-fuzzy model for modulus of deformation of jointed rock masses. **Computers and Geotechnics**, n. 31, p. 375-383, 2004.

GOKCEOGLU, C.; ZORLU, K. A fuzzy model to predict the uniaxial compressive strength and the modulus of elasticity of a problematic rock. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, n. 17, p. 61-72, 2004.

GOODMAN, R. E. **Methods in geological engineering in discontinuous rocks.** West Publishing company, St Paul. 472 p., 1976.

GRIMA, M. A. **Neuro-fuzzy modelling in engineering geology:** Applications to mechanical rock excavation, rock strength estimation and geological mapping. A. A. Balkema, Rotterdam, 244 p., 2000.

GRIMA, M. A.; BABUŠKA, R. Fuzzy model for the prediction of unconfined compressive strength of rock samples. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, n. 36, p. 339-349, 1999.

GRIMA, M. A.; BRUINES, P. A.; VERHOEF, P. N. W. Modeling tunnel boring machine performance by neuro-fuzzy methods. **Tunnelling and Underground Space Technology**, v. 15, n. 3, p. 259-269, 2000.

HAQUE, A. **Shear behaviour of soft rock joints under constant normal stiffness.** 1999. 296 f. Tese (Doutorado) - School of Civil, Mining and Environmental Engineering, University of Wollongong, Wollongong, 1999.

HUDSON, J. A.; HARRISON, J. P. **Engineering rock Mechanics:** An introduction to the principles. Elsevier Science, Ltd., Oxford, 444 p., 1997.

INDRARATNA, B.; HAQUE, A. **Shear behaviour of rock joint.** Balkema, Rotterdam, 164 p., 2000.

INDRARATNA, B.; HAQUE, A.; AZIZ, N. Laboratory modelling of shear behaviour of soft joints under constant normal stiffness condition. **Geotechnical and Geological Engineering** v. 16, p. 17-44, 1998.

INDRARATNA, B.; HAQUE, A.; AZIZ, N. Shear behaviour of idealised joints under constant normal stiffness. **Géotechnique**, v. 49, n. 3, p. 331-355, 1999.

INDRARATNA, B.; WELIDENIYA, S.; BROWN, E. T. A shear strength model for idealised infilled joints under constant normal stiffness. **Géotechnique**, v. 55, n. 3, p. 215-226, 2005.

INDRARATNA, B.; OLIVEIRA, D. A. F.; BROWN, E. T. A shear-displacement criterion for soil-infilled rock discontinuities. **Géotechnique**, v. 60, n. 8, p. 623-633, 2010a.

INDRARATNA, B.; OLIVEIRA, D. A. F.; BROWN, E. T.; ASSIS, A. P. Effect of soil-infilled joints on the stability of rock wedges formed in a tunnel roof. **Int. J. Rock Mech. Min. Sci.**, v. 47, n. 5, p. 739-751, 2010b.

INDRARATNA, B.; PREMADASA, W. N.; BROWN, E. T. Shear behaviour of rock joints with unsaturated infill. **Géotechnique**, v. 63, n. 15, p. 1356-1360, 2013.

INDRARATNA, B.; PREMADASA, W. N.; BROWN, E. T.; GENS, A.; HEITOR, A. Shear strength of rock joints influenced by compacted infill. **Int. J. Rock Mech. Min. Sci.**, v. 70, p. 296-307, 2014.

ITASCA CONSULTING GROUP. **UDEC Manual**, Version 3.1, Itasca, Minneapolis, 2000.

JAEGER, J. C. Friction of rocks and stability of rock slopes. **Géotechnique**, v. 21, p. 97-134, 1971.

JALALIFAR, H.; MOJEDIFAR, S.; SAHEBI, A. A.; NEZAMABADI-POUR, H. Application of the adaptive neuro-fuzzy inference system for prediction of a rock engineering classification system. **Computers and Geotechnics**, n. 38, p. 783-790, 2011.

JANG, J.-S. R. ANFIS: Adaptive-Network-based Fuzzy Inference Systems. **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics**, v. 23, n. 3, p. 665-685, 1993.

JANG, J.-S. R.; SUN, C.-T. Neuro-fuzzy modeling and control. **Proceedings of the IEEE**, v. 83, n. 3, p. 378-406, 1995.

JANG, J.-S. R.; SUN, C.-T.; MIZUTANI, E. **Neuro-fuzzy and soft computing: A computational approach to learning and machine intelligence**. London (UK): Prentice Hall International Limited, 1997.

KAYABASI, A.; GOKCEOGLU, C.; ERCANOGLU, M. Estimating the deformation modulus of rock masses: a comparative study. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, n. 40, p. 55-63, 2003.

LADANYI, B.; ARCHAMBAULT, G. Simulation of shear behaviour of a jointed rock mass. In: 11TH SYMPOSIUM ON ROCK MECHANICS, 1970. **Proceedings....** Urbana, Illinois, 1970, p. 105-125.

MAMDANI, E. H. Applications of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant. **Proceedings of the IEEE**, v. 12, p. 1585-1588, 1974.

MATHWORKS. **Fuzzy logic toolbox: for use with MATLAB**, User's Guide. MathWorks, 227p., 2006.

MONJEZI, M.; REZAEI, M. Developing a new fuzzy model to predict burden from rock geomechanical properties. **Expert Systems with Applications**, n. 38, p. 9266-9273, 2011.

MONTOYA, C. A. H. **Incertezas, vulnerabilidade e avaliação de risco devido a deslizamento em estradas**. 2013. 273 f. Tese (Doutorado) - Pós-graduação em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília. Brasília, DF, 2013.

NOORANI, R.; KORDI, H.; GHAZVINIAN, A. H. An adaptive neuro-fuzzy inference system for uniaxial compressive strength of rocks. **Rock Engineering in Difficult Ground Conditions – Soft Rocks and Karst – Vrkljan (ed.)**, p. 327-331, 2010.

NEFESLIOGLU, H. A.; GOKCEOGLU, C.; SONMEZ, H. A Mamdani model to predict the weighted joint density. PALADE, V.; HOWLETT, R. J.; JAIN, L. C. (Eds.): **KES 2003, LNAI 2773**, p. 1052-1057, 2003.

OLIVEIRA, D. A. F. **An advancement in analytical modelling of soil-infilled rock joints and their practical applications**. 2009. 278 f. Tese (Doutorado) - School of Civil, Mining

and Environmental Engineering, University of Wollongong, Wollongong, 2009.

OLIVEIRA, D. A. F.; INDRARATNA, B. Comparison between models of rock discontinuity strength and deformation. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 136, n. 6, p. 864-874, 2010.

PAPALIANGAS, T.; HENCHER, S. R.; MANOLOPOULOS, S. The effect of frictional fill thickness on the shear strength of rock discontinuities. **Int J Rock Mech Min Sci Geomech**, v. 30, n. 2, p. 81-91, 1993.

PATTON, F. D. Multiple modes of shear failure in rocks. In: 1ST CONG, INT. SOC. ROCK MECH., 1966. **Proceedings...** Lisboa, Portugal, v. 1, p. 509-513, 1966.

SARI, M. Estimating strength of rock masses using fuzzy inference system. **Rock Mechanics and Rock Engineering: From the Past to the Future - Ulusay et al. (ed.)**, p. 129-134, 2016.

SEIDEL, J. P.; HABERFIELD, C. M. The application of energy principles to the determination of the sliding resistance of rock joints. **Rock Mech. & Rock Eng.**, v. 28, n. 4, p. 211-226, 1995a.

SEIDEL, J. P.; HABERFIELD, C. M. Towards an understanding of joint roughness, **Rock Mechanics and Rock Engineering**, v. 28, n. 2, p. 69-92, 1995b.

SILVA, A. V. **Avaliação do risco de ruptura em análises de estabilidade de taludes de barragens de terra utilizando números fuzzy**. 2015. 128 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - Geotecnia, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará. 2015.

SILVA, A. V.; DANTAS NETO, S. A.; SOUZA FILHO, F. A. A simplified method for risk assessment in slope stability analysis of earth dams using fuzzy numbers. **Electronic Journal of Geotechnical Engineering**, v. 21, n. 10, p. 3607-3624, 2016.

SINGH, V.; SINGH, T. N. A neuro-fuzzy approach for prediction of Poisson's ratio and Young's modulus of shale and sandstone. In: 41ST U.S. SYMPOSIUM ON ROCK MECHANICS (USRMS), 2006. **Proceedings...** Golden, Colorado, p. 1-7, 2006.

SINGH, R.; KAINTHOLA, A.; SINGH, T. N. Estimation of elastic constant of rocks using an ANFIS approach. **Applied Soft Computing**, n. 12, p. 40-45, 2012.

SIMÕES, M. G.; SHAW, I. S. **Controle e modelagem fuzzy**. São Paulo, Blucher: FAPESP, 186 p., 2007.

SKINAS, C. A.; BANDIS, S. C.; DEMIRIS, C. A. Experimental investigations and modelling of rock joint behaviour under constant stiffness. In: Barton; Stephanson (eds) **Rock joints**. Balkema Publisher, Rotterdam, p. 301-307, 1990.

SONMEZ, H.; GOKCEOGLU, C.; ULUSAY, R. An application of fuzzy sets to the Geological Strength Index (GSI) system used in rock engineering. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, n. 16, p. 251-269, 2003.

SONMEZ, H.; GOKCEOGLU, C.; ULUSAY, R. A Mamdani fuzzy inference system for the Geological Strength Index (GSI) and its use in slope stability assessments. **Int. J. Rock Mech. Min. Sci.**, v. 41, n. 3, p. 1-6, 2004.

TAKAGI, T.; SUGENO, M. Derivation of fuzzy control rules from human operator's control action. **IFAC Symposium on Fuzzy Information, Knowledge Representation and Decision Analysis**, Marseille, p. 55-60, 1983.

VAN SINT JAN, M. L. Shear tests of model rock joints under stiff normal loading. In: Barton; Stephanson (eds) **Rock joints**. Balkema Publisher, Rotterdam, p. 323-327, 1990.

YESILOGLU-GULTEKIN, N.; SEZER, E. A.; GOKCEOGLU, C.; BAYHAN, H. Na application of adaptive neuro fuzzy inference system for estimating the uniaxial compressive strength of certain granitic rocks from their mineral contentes. **Expert Systems with Applications**, n. 40, p. 921-928, 2013.

ZADEH, L. A. Fuzzy Sets. **Information and Control**, v. 8, p. 338-353, 1965.

APÊNDICE A – REGRAS DE INFERÊNCIA FUZZY PARA DETERMINAÇÃO DE τ_h e δ_v PELO MODELO FUZZY DO TIPO MAMDANI

REGRAS DE INFERÊNCIA FUZZY PARA DETERMINAÇÃO DE τ_h

1. Se (kn(kPa/mm) é Muito alta) e (sn0(MPa) é Média) e (JRC é Muito alto) e (sc(MPa) é Alta) e (fb(o) é Médio) e (dh(mm) é Baixo) então (th(kPa) é Muito alta) (1)
2. Se (kn(kPa/mm) é Alta) e (sn0(MPa) é Média) e (JRC é Médio) e (sc(MPa) é Média) e (fb(o) é Médio) e (dh(mm) é Baixo) então (th(kPa) é Média) (0.5)
3. Se (kn(kPa/mm) é Alta) e (sn0(MPa) é Média) e (JRC é Médio) e (sc(MPa) é Média) e (fb(o) é Médio) e (dh(mm) é Baixo) então (th(kPa) é Alta) (0.5)
4. Se (kn(kPa/mm) é Alta) e (sn0(MPa) é Média) e (JRC é Médio) e (sc(MPa) é Média) e (fb(o) é Médio) e (dh(mm) é Alto) então (th(kPa) é Alta) (1)
5. Se (kn(kPa/mm) é Média) e (sn0(MPa) é Média) e (JRC é Médio) e (sc(MPa) é Média) e (fb(o) é Médio) e (dh(mm) é Baixo) então (th(kPa) é Média) (0.7)
6. Se (kn(kPa/mm) é Média) e (sn0(MPa) é Média) e (JRC é Médio) e (sc(MPa) é Média) e (fb(o) é Médio) e (dh(mm) é Baixo) então (th(kPa) é Alta) (0.3)
7. Se (kn(kPa/mm) é Média) e (sn0(MPa) é Média) e (JRC é Médio) e (sc(MPa) é Média) e (fb(o) é Médio) e (dh(mm) é Alto) então (th(kPa) é Alta) (1)
8. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Média) e (JRC é Alto) e (sc(MPa) é Alta) e (fb(o) é Médio) e (dh(mm) é Baixo) então (th(kPa) é Muito alta) (1)
9. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Média) e (JRC é Médio) e (sc(MPa) é Média) e (fb(o) é Médio) e (dh(mm) é Baixo) então (th(kPa) é Média) (0.8)
10. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Média) e (JRC é Médio) e (sc(MPa) é Média) e (fb(o) é Médio) e (dh(mm) é Baixo) então (th(kPa) é Alta) (0.2)
11. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Média) e (JRC é Médio) e (sc(MPa) é Média) e (fb(o) é Médio) e (dh(mm) é Alto) então (th(kPa) é Média) (1)
12. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Muito alta) e (JRC é Alto) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Baixo) então (th(kPa) é Média) (0.1)
13. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Muito alta) e (JRC é Alto) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Baixo) então (th(kPa) é Alta) (0.6)
14. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Muito alta) e (JRC é Alto) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Baixo) então (th(kPa) é Muito alta) (0.3)
15. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Muito alta) e (JRC é Médio) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Baixo) então (th(kPa) é Alta) (0.7)
16. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Muito alta) e (JRC é Médio) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Baixo) então (th(kPa) é Muito alta) (0.3)

17. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Muito alta) e (JRC é Baixo) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Alto) então (th(kPa) é Alta) (1)
18. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Muito alta) e (JRC é Baixo) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Baixo) então (th(kPa) é Alta) (1)
19. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Muito alta) e (JRC é Baixo) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Médio) e (dh(mm) é Baixo) então (th(kPa) é Média) (0.7)
20. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Muito alta) e (JRC é Baixo) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Médio) e (dh(mm) é Baixo) então (th(kPa) é Alta) (0.3)
21. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Alta) e (JRC é Alto) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Baixo) então (th(kPa) é Média) (0.1)
22. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Alta) e (JRC é Alto) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Baixo) então (th(kPa) é Alta) (0.9)
23. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Alta) e (JRC é Médio) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Alto) então (th(kPa) é Alta) (1)
24. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Alta) e (JRC é Médio) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Baixo) então (th(kPa) é Média) (0.1)
25. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Alta) e (JRC é Médio) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Baixo) então (th(kPa) é Alta) (0.9)
26. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Alto) então (th(kPa) é Média) (0.8)
27. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Alto) então (th(kPa) é Alta) (0.2)
28. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Baixo) então (th(kPa) é Média) (0.1)
29. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Baixo) então (th(kPa) é Alta) (0.9)
30. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Médio) e (dh(mm) é Baixo) então (th(kPa) é Média) (1)
31. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Média) e (JRC é Alto) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Baixo) então (th(kPa) é Média) (0.3)
32. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Média) e (JRC é Alto) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Baixo) então (th(kPa) é Alta) (0.7)
33. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Média) e (JRC é Médio) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Alto) então (th(kPa) é Média) (0.3)
34. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Média) e (JRC é Médio) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Alto) então (th(kPa) é Alta) (0.7)
35. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Média) e (JRC é Médio) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Baixo) então (th(kPa) é Média) (0.1)

36. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Média) e (JRC é Médio) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Baixo) então (th(kPa) é Alta) (0.9)
37. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Média) e (JRC é Baixo) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Alto) então (th(kPa) é Média) (1)
38. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Média) e (JRC é Baixo) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Médio) e (dh(mm) é Baixo) então (th(kPa) é Baixa) (0.8)
39. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Média) e (JRC é Baixo) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Médio) e (dh(mm) é Baixo) então (th(kPa) é Média) (0.2)
40. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Média) e (JRC é Baixo) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Baixo) então (th(kPa) é Média) (0.8)
41. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Média) e (JRC é Baixo) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Baixo) então (th(kPa) é Alta) (0.2)
42. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Baixo) e (dh(mm) é Alto) então (th(kPa) é Baixa) (1)
43. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Baixo) e (dh(mm) é Baixo) então (th(kPa) é Baixa) (1)
44. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Baixo) então (th(kPa) é Baixa) (0.2)
45. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Baixo) então (th(kPa) é Média) (0.7)
46. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Baixo) então (th(kPa) é Alta) (0.1)
47. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Baixa) e (JRC é Médio) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Alto) então (th(kPa) é Baixa) (0.2)
48. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Baixa) e (JRC é Médio) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Alto) então (th(kPa) é Média) (0.5)
49. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Baixa) e (JRC é Médio) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Alto) então (th(kPa) é Alta) (0.3)
50. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Baixa) e (JRC é Médio) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Baixo) então (th(kPa) é Baixa) (0.3)
51. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Baixa) e (JRC é Médio) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Baixo) então (th(kPa) é Média) (0.6)
52. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Baixa) e (JRC é Médio) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Baixo) então (th(kPa) é Alta) (0.1)
53. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Alto) então (th(kPa) é Baixa) (0.9)
54. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Alto) então (th(kPa) é Média) (0.1)

55. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Baixo) então (th(kPa) é Baixa) (0.9)

56. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Baixo) então (th(kPa) é Média) (0.1)

57. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Médio) e (dh(mm) é Baixo) então (th(kPa) é Baixa) (1)

REGRAS DE INFERÊNCIA FUZZY PARA DETERMINAÇÃO DE δ_v

1. Se (kn(kPa/mm) é Muito alta) e (sn0(MPa) é Média) e (JRC é Muito alto) e (sc(MPa) é Alta) e (fb(o) é Médio) e (dh(mm) é Baixo) então (dv(mm) é Dilatação) (1)
2. Se (kn(kPa/mm) é Alta) e (sn0(MPa) é Média) e (JRC é Médio) e (sc(MPa) é Média) e (fb(o) é Médio) e (dh(mm) é Baixo) então (dv(mm) é Dilatação) (0.8)
3. Se (kn(kPa/mm) é Alta) e (sn0(MPa) é Média) e (JRC é Médio) e (sc(MPa) é Média) e (fb(o) é Médio) e (dh(mm) é Baixo) então (dv(mm) é Compressão) (0.2)
4. Se (kn(kPa/mm) é Alta) e (sn0(MPa) é Média) e (JRC é Médio) e (sc(MPa) é Média) e (fb(o) é Médio) e (dh(mm) é Alto) então (dv(mm) é Dilatação) (1)
5. Se (kn(kPa/mm) é Média) e (sn0(MPa) é Média) e (JRC é Médio) e (sc(MPa) é Média) e (fb(o) é Médio) e (dh(mm) é Baixo) então (dv(mm) é Dilatação) (0.8)
6. Se (kn(kPa/mm) é Média) e (sn0(MPa) é Média) e (JRC é Médio) e (sc(MPa) é Média) e (fb(o) é Médio) e (dh(mm) é Baixo) então (dv(mm) é Compressão) (0.2)
7. Se (kn(kPa/mm) é Média) e (sn0(MPa) é Média) e (JRC é Médio) e (sc(MPa) é Média) e (fb(o) é Médio) e (dh(mm) é Alto) então (dv(mm) é Dilatação) (1)
8. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Média) e (JRC é Alto) e (sc(MPa) é Alta) e (fb(o) é Médio) e (dh(mm) é Baixo) então (dv(mm) é Dilatação) (1)
9. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Média) e (JRC é Médio) e (sc(MPa) é Média) e (fb(o) é Médio) e (dh(mm) é Baixo) então (dv(mm) é Dilatação) (1)
10. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Média) e (JRC é Médio) e (sc(MPa) é Média) e (fb(o) é Médio) e (dh(mm) é Alto) então (dv(mm) é Dilatação) (1)
11. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Muito alta) e (JRC é Alto) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Baixo) então (dv(mm) é Dilatação) (1)
12. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Muito alta) e (JRC é Médio) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Baixo) então (dv(mm) é Dilatação) (0.9)
13. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Muito alta) e (JRC é Médio) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Baixo) então (dv(mm) é Compressão) (0.1)
14. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Muito alta) e (JRC é Baixo) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Alto) então (dv(mm) é Dilatação) (1)
15. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Muito alta) e (JRC é Baixo) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Baixo) então (dv(mm) é Dilatação) (1)
16. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Muito alta) e (JRC é Baixo) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Médio) e (dh(mm) é Baixo) então (dv(mm) é Compressão) (1)
17. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Alta) e (JRC é Alto) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Baixo) então (dv(mm) é Dilatação) (1)
18. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Alta) e (JRC é Médio) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Baixo) então (dv(mm) é Dilatação) (1)

19. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Alta) e (JRC é Médio) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Alto) então (dv(mm) é Dilatação) (1)
20. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Alto) então (dv(mm) é Dilatação) (1)
21. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Baixo) então (dv(mm) é Dilatação) (1)
22. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Médio) e (dh(mm) é Baixo) então (dv(mm) é Compressão) (1)
23. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Média) e (JRC é Alto) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Baixo) então (dv(mm) é Dilatação) (1)
24. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Média) e (JRC é Médio) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Alto) então (dv(mm) é Dilatação) (1)
25. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Média) e (JRC é Médio) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Baixo) então (dv(mm) é Dilatação) (1)
26. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Média) e (JRC é Baixo) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Alto) então (dv(mm) é Dilatação) (1)
27. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Média) e (JRC é Baixo) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Médio) e (dh(mm) é Baixo) então (dv(mm) é Dilatação) (0.8)
28. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Média) e (JRC é Baixo) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Médio) e (dh(mm) é Baixo) então (dv(mm) é Compressão) (0.2)
29. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Média) e (JRC é Baixo) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Baixo) então (dv(mm) é Dilatação) (1)
30. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Baixo) e (dh(mm) é Baixo) então (dv(mm) é Dilatação) (0.7)
31. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Baixo) e (dh(mm) é Baixo) então (dv(mm) é Compressão) (0.3)
32. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Baixo) então (dv(mm) é Dilatação) (1)
33. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Baixo) e (dh(mm) é Alto) então (dv(mm) é Dilatação) (1)
34. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Baixa) e (JRC é Médio) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Alto) então (dv(mm) é Dilatação) (1)
35. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Baixa) e (JRC é Médio) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Baixo) então (dv(mm) é Dilatação) (1)
36. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Alto) então (dv(mm) é Dilatação) (1)
37. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Baixo) então (dv(mm) é Dilatação) (1)

38. Se $k_n(\text{kPa/mm})$ é Baixa e $s_{n0}(\text{MPa})$ é Baixa e JRC é Baixo e $s_c(\text{MPa})$ é Baixa e $f_b(o)$ é Médio e $d_h(\text{mm})$ é Baixo então $d_v(\text{mm})$ é Dilatação (0.6)

39. Se $k_n(\text{kPa/mm})$ é Baixa e $s_{n0}(\text{MPa})$ é Baixa e JRC é Baixo e $s_c(\text{MPa})$ é Baixa e $f_b(o)$ é Médio e $d_h(\text{mm})$ é Baixo então $d_v(\text{mm})$ é Compressão (0.4)

APÊNDICE B – CÓDIGOS DO MATLAB PARA DETERMINAÇÃO DO INTERVALO DE VARIAÇÃO DE τ_h e δ_v PELO MÉTODO DE MAMDANI

τ_h PELO MÉTODO DO MENOR DOS MÁXIMOS E PELO MÉTODO DO MAIOR DOS MÁXIMOS

%Definição dos valores de cada entrada%

x1 = input('Entre com o valor de Kn:');

x2 = input('Entre com o valor de sn0:');

x3 = input('Entre com o valor de JRC:');

x4 = input('Entre com o valor de sc:');

x5 = input('Entre com o valor de fb:');

x6 = input('Entre com o valor de dh:');

%Definição das funções de pertinência de Kn%

mf11in=trapmf(x1,[-1000 0 0 1000]); %Kn1%

mf12in=trapmf(x1,[3000 7500 8000 13000]); %Kn4%

mf13in=trimf(x1,[0 1000 3000]); %Kn2%

mf14in=trimf(x1,[1000 3000 7500]); %Kn3%

%Definição das funções de pertinência de sn0%

mf21in=trapmf(x2,[-0.5 0 0.5 1]); %sn01%

mf22in=trapmf(x2,[2 2.5 3 3.5]); %sn04%

mf23in=trimf(x2,[0.5 1 2]); %sn02%

mf24in=trimf(x2,[1 2 2.5]); %sn03%

%Definição das funções de pertinência de JRC%

mf31in=trapmf(x3,[-4 0 2 6]); %JRC1%

mf32in=trapmf(x3,[12 18 20 26]); %JRC4%

mf33in=trimf(x3,[2 6 12]); %JRC2%

mf34in=trimf(x3,[6 12 18]); %JRC3%

%Definição das funções de pertinência de sc%

mf41in=trapmf(x4,[-20 0 10 30]); %sc1%

mf42in=trapmf(x4,[60 120 120 180]); %sc4%

mf43in=trimf(x4,[10 30 60]); %sc2%

mf44in=trimf(x4,[30 60 120]); %sc3%

%Definição das funções de pertinência de fb%

mf51in=trapmf(x5,[0 20 27 34]); %fb1%

mf52in=trapmf(x5,[34 40 40 46]); %fb3%

mf53in=trimf(x5,[27 34 40]); %fb2%

%Definição das funções de pertinência de dh%

mf61in=trapmf(x6,[-20 0 5 25]); %dh1%

mf62in=trapmf(x6,[5 25 30 50]); %dh2%

%Etapa de ativação das regras%

ativar1=min(min(min(min(min(mf12in,mf23in),mf32in),mf44in),mf53in),mf61in);

ativar2_3=min(min(min(min(min(mf14in,mf23in),mf33in),mf43in),mf53in),mf61in);

ativar4=min(min(min(min(min(mf14in,mf23in),mf33in),mf43in),mf53in),mf62in);

ativar5_6=min(min(min(min(min(mf13in,mf23in),mf33in),mf43in),mf53in),mf61in);

ativar7=min(min(min(min(min(mf13in,mf23in),mf33in),mf43in),mf53in),mf62in);

ativar8=min(min(min(min(min(mf11in,mf23in),mf34in),mf44in),mf53in),mf61in);

ativar9_10=min(min(min(min(min(mf11in,mf23in),mf33in),mf43in),mf53in),mf61in);

ativar11=min(min(min(min(min(mf11in,mf23in),mf33in),mf43in),mf53in),mf62in);

ativar12_13_14=min(min(min(min(min(mf11in,mf22in),mf34in),mf41in),mf52in),mf61in);

ativar15_16=min(min(min(min(min(mf11in,mf22in),mf33in),mf41in),mf52in),mf61in);

ativar17=min(min(min(min(min(mf11in,mf22in),mf31in),mf41in),mf52in),mf62in);

ativar18=min(min(min(min(min(mf11in,mf22in),mf31in),mf41in),mf52in),mf61in);

ativar19_20=min(min(min(min(min(mf11in,mf22in),mf31in),mf41in),mf53in),mf61in);

ativar21_22=min(min(min(min(min(mf11in,mf24in),mf34in),mf41in),mf52in),mf61in);

ativar23=min(min(min(min(min(mf11in,mf24in),mf33in),mf41in),mf52in),mf62in);

ativar24_25=min(min(min(min(min(mf11in,mf24in),mf33in),mf41in),mf52in),mf61in);

ativar26_27=min(min(min(min(min(mf11in,mf24in),mf31in),mf41in),mf52in),mf62in);

ativar28_29=min(min(min(min(min(mf11in,mf24in),mf31in),mf41in),mf52in),mf61in);

ativar30=min(min(min(min(min(mf11in,mf24in),mf31in),mf41in),mf53in),mf61in);

ativar31_32=min(min(min(min(min(mf11in,mf23in),mf34in),mf41in),mf52in),mf61in);

ativar33_34=min(min(min(min(min(mf11in,mf23in),mf33in),mf41in),mf52in),mf62in);

ativar35_36=min(min(min(min(min(mf11in,mf23in),mf33in),mf41in),mf52in),mf61in);

ativar37=min(min(min(min(min(mf11in,mf23in),mf31in),mf41in),mf52in),mf62in);

ativar38_39=min(min(min(min(min(mf11in,mf23in),mf31in),mf41in),mf53in),mf61in);

ativar40_41=min(min(min(min(min(mf11in,mf23in),mf31in),mf41in),mf52in),mf61in);

ativar42=min(min(min(min(min(mf11in,mf21in),mf34in),mf41in),mf51in),mf62in);

```

ativar43=min(min(min(min(min(mf11in,mf21in),mf34in),mf41in),mf51in),mf61in);
ativar44_45_46=min(min(min(min(min(mf11in,mf21in),mf34in),mf41in),mf52in),mf61in);
ativar47_48_49=min(min(min(min(min(mf11in,mf21in),mf33in),mf41in),mf52in),mf62in);
ativar50_51_52=min(min(min(min(min(mf11in,mf21in),mf33in),mf41in),mf52in),mf61in);
ativar53_54=min(min(min(min(min(mf11in,mf21in),mf31in),mf41in),mf52in),mf62in);
ativar55_56=min(min(min(min(min(mf11in,mf21in),mf31in),mf41in),mf52in),mf61in);
ativar57=min(min(min(min(min(mf11in,mf21in),mf31in),mf41in),mf53in),mf61in);

```

```
%Definição das funções de pertinência de th%
```

```
y=-0:10:7000;
```

```
th1=trapmf(y,[-500 0 500 1000]);
```

```
th2=trimf(y,[500 1000 2000]);
```

```
th3=trimf(y,[1000 2000 4000]);
```

```
th4=trapmf(y,[2000 4000 7000 9000]);
```

```
%Etapa de implicação%
```

```
mf1out=min(ativar1,th4);
```

```
mf2out=0.5*min(ativar2_3,th2);
```

```
mf3out=0.5*min(ativar2_3,th3);
```

```
mf4out=min(ativar4,th3);
```

```
mf5out=0.7*min(ativar5_6,th2);
```

```
mf6out=0.3*min(ativar5_6,th3);
```

```
mf7out=min(ativar7,th3);
```

```
mf8out=min(ativar8,th4);
```

```
mf9out=0.8*min(ativar9_10,th2);
```

```
mf10out=0.2*min(ativar9_10,th3);
```

```
mf11out=min(ativar11,th2);
```

```
mf12out=0.1*min(ativar12_13_14,th2);
```

```
mf13out=0.6*min(ativar12_13_14,th3);
```

```
mf14out=0.3*min(ativar12_13_14,th4);
```

```
mf15out=0.7*min(ativar15_16,th3);
```

```
mf16out=0.3*min(ativar15_16,th4);
```

```
mf17out=min(ativar17,th3);
```

```
mf18out=min(ativar18,th3);
```

```
mf19out=0.7*min(ativar19_20,th2);
```

```
mf20out=0.3*min(ativar19_20,th3);
```

```
mf21out=0.1*min(ativar21_22,th2);
```

mf22out=0.9*min(ativar21_22,th3);
mf23out=min(ativar23,th3);
mf24out=0.1*min(ativar24_25,th2);
mf25out=0.9*min(ativar24_25,th3);
mf26out=0.8*min(ativar26_27,th2);
mf27out=0.2*min(ativar26_27,th3);
mf28out=0.1*min(ativar28_29,th2);
mf29out=0.9*min(ativar28_29,th3);
mf30out=min(ativar30,th2);
mf31out=0.3*min(ativar31_32,th2);
mf32out=0.7*min(ativar31_32,th3);
mf33out=0.3*min(ativar33_34,th2);
mf34out=0.7*min(ativar33_34,th3);
mf35out=0.1*min(ativar35_36,th2);
mf36out=0.9*min(ativar35_36,th3);
mf37out=min(ativar37,th2);
mf38out=0.8*min(ativar38_39,th1);
mf39out=0.2*min(ativar38_39,th2);
mf40out=0.8*min(ativar40_41,th2);
mf41out=0.2*min(ativar40_41,th3);
mf42out=min(ativar42,th1);
mf43out=min(ativar43,th1);
mf44out=0.2*min(ativar44_45_46,th1);
mf45out=0.7*min(ativar44_45_46,th2);
mf46out=0.1*min(ativar44_45_46,th3);
mf47out=0.2*min(ativar47_48_49,th1);
mf48out=0.5*min(ativar47_48_49,th2);
mf49out=0.3*min(ativar47_48_49,th3);
mf50out=0.3*min(ativar50_51_52,th1);
mf51out=0.6*min(ativar50_51_52,th2);
mf52out=0.1*min(ativar50_51_52,th3);
mf53out=0.9*min(ativar53_54,th1);
mf54out=0.1*min(ativar53_54,th2);
mf55out=0.9*min(ativar55_56,th1);
mf56out=0.1*min(ativar55_56,th2);
mf57out=min(ativar57,th1);

```
%Etapa de agregação%  
ConjFuzzyRegras=[mf1out;mf2out;mf3out;mf4out;mf5out;  
mf6out;mf7out;mf8out;mf9out;mf10out;mf11out;mf12out;  
mf13out;mf14out;mf15out;mf16out;mf17out;mf18out;mf19out;  
mf20out;mf21out;mf22out;mf23out;mf24out;mf25out;mf26out;  
mf27out;mf28out;mf29out;mf30out;mf31out;mf32out;mf33out;  
mf34out;mf35out;mf36out;mf37out;mf38out;mf39out;mf40out;  
mf41out;mf42out;mf43out;mf44out;mf45out;mf46out;mf47out;  
mf48out;mf49out;mf50out;mf51out;mf52out;mf53out;mf54out;  
mf55out;mf56out;mf57out];
```

```
ConjFuzzyOutAgregado=max(ConjFuzzyRegras);
```

```
%Plotagem da função de agregação%  
figure; plot(y,ConjFuzzyOutAgregado,'b-'); grid  
xlabel('Variavel de saida');  
ylabel('Pertinencia');  
ylabel('Conjunto Fuzzy de Saida Agregado');
```

δ_v PELO MÉTODO DO MENOR DOS MÁXIMOS E PELO MÉTODO DO MAIOR DOS MÁXIMOS

```

%Definição dos valores de cada entrada%
x1 = input('Entre com o valor de Kn:');
x2 = input('Entre com o valor de sn0:');
x3 = input('Entre com o valor de JRC:');
x4 = input('Entre com o valor de sc:');
x5 = input('Entre com o valor de fb:');
x6 = input('Entre com o valor de dh:');

%Definição das funções de pertinência de Kn%
mf11in=trapmf(x1,[-1000 0 0 1000]); %Kn1%
mf12in=trapmf(x1,[3000 7500 8000 13000]); %Kn4%
mf13in=trimf(x1,[0 1000 3000]); %Kn2%
mf14in=trimf(x1,[1000 3000 7500]); %Kn3%

%Definição das funções de pertinência de sn0%
mf21in=trapmf(x2,[-0.5 0 0.5 1]); %sn01%
mf22in=trapmf(x2,[2 2.5 3 3.5]); %sn04%
mf23in=trimf(x2,[0.5 1 2]); %sn02%
mf24in=trimf(x2,[1 2 2.5]); %sn03%

%Definição das funções de pertinência de JRC%
mf31in=trapmf(x3,[-4 0 2 6]); %JRC1%
mf32in=trapmf(x3,[12 18 20 26]); %JRC4%
mf33in=trimf(x3,[2 6 12]); %JRC2%
mf34in=trimf(x3,[6 12 18]); %JRC3%

%Definição das funções de pertinência de sc%
mf41in=trapmf(x4,[-20 0 10 30]); %sc1%
mf42in=trapmf(x4,[60 120 120 180]); %sc4%
mf43in=trimf(x4,[10 30 60]); %sc2%
mf44in=trimf(x4,[30 60 120]); %sc3%

```

%Definição das funções de pertinência de fb%

mf51in=trapmf(x5,[0 20 27 34]); %fb1%

mf52in=trapmf(x5,[34 40 40 46]); %fb3%

mf53in=trimf(x5,[27 34 40]); %fb2%

%Definição das funções de pertinência de dh%

mf61in=trapmf(x6,[-20 0 5 25]); %dh1%

mf62in=trapmf(x6,[5 25 30 50]); %dh2%

%Etapa de ativação das regras%

ativar1=min(min(min(min(min(mf12in,mf23in),mf32in),mf44in),mf53in),mf61in);

ativar2_3=min(min(min(min(min(mf14in,mf23in),mf33in),mf43in),mf53in),mf61in);

ativar4=min(min(min(min(min(mf14in,mf23in),mf33in),mf43in),mf53in),mf62in);

ativar5_6=min(min(min(min(min(mf13in,mf23in),mf33in),mf43in),mf53in),mf61in);

ativar7=min(min(min(min(min(mf13in,mf23in),mf33in),mf43in),mf53in),mf62in);

ativar8=min(min(min(min(min(mf11in,mf23in),mf34in),mf44in),mf53in),mf61in);

ativar9=min(min(min(min(min(mf11in,mf23in),mf33in),mf43in),mf53in),mf61in);

ativar10=min(min(min(min(min(mf11in,mf23in),mf33in),mf43in),mf53in),mf62in);

ativar11=min(min(min(min(min(mf11in,mf22in),mf34in),mf41in),mf52in),mf61in);

ativar12_13=min(min(min(min(min(mf11in,mf22in),mf33in),mf41in),mf52in),mf61in);

ativar14=min(min(min(min(min(mf11in,mf22in),mf31in),mf41in),mf52in),mf62in);

ativar15=min(min(min(min(min(mf11in,mf22in),mf31in),mf41in),mf52in),mf61in);

ativar16=min(min(min(min(min(mf11in,mf22in),mf31in),mf41in),mf53in),mf61in);

ativar17=min(min(min(min(min(mf11in,mf24in),mf34in),mf41in),mf52in),mf61in);

ativar18=min(min(min(min(min(mf11in,mf24in),mf33in),mf41in),mf52in),mf61in);

ativar19=min(min(min(min(min(mf11in,mf24in),mf33in),mf41in),mf52in),mf62in);

ativar20=min(min(min(min(min(mf11in,mf24in),mf31in),mf41in),mf52in),mf62in);

ativar21=min(min(min(min(min(mf11in,mf24in),mf31in),mf41in),mf52in),mf61in);

ativar22=min(min(min(min(min(mf11in,mf24in),mf31in),mf41in),mf53in),mf61in);

ativar23=min(min(min(min(min(mf11in,mf23in),mf34in),mf41in),mf52in),mf61in);

ativar24=min(min(min(min(min(mf11in,mf23in),mf33in),mf41in),mf52in),mf62in);

ativar25=min(min(min(min(min(mf11in,mf23in),mf33in),mf41in),mf52in),mf61in);

ativar26=min(min(min(min(min(mf11in,mf23in),mf31in),mf41in),mf52in),mf62in);

ativar27_28=min(min(min(min(min(mf11in,mf23in),mf31in),mf41in),mf53in),mf61in);

ativar29=min(min(min(min(min(mf11in,mf23in),mf31in),mf41in),mf52in),mf61in);

ativar30_31=min(min(min(min(min(mf11in,mf21in),mf34in),mf41in),mf51in),mf61in);

ativar32=min(min(min(min(min(mf11in,mf21in),mf34in),mf41in),mf52in),mf61in);

```

ativar33=min(min(min(min(min(mf11in,mf21in),mf34in),mf41in),mf51in),mf62in);
ativar34=min(min(min(min(min(mf11in,mf21in),mf33in),mf41in),mf52in),mf62in);
ativar35=min(min(min(min(min(mf11in,mf21in),mf33in),mf41in),mf52in),mf61in);
ativar36=min(min(min(min(min(mf11in,mf21in),mf31in),mf41in),mf52in),mf62in);
ativar37=min(min(min(min(min(mf11in,mf21in),mf31in),mf41in),mf52in),mf61in);
ativar38_39=min(min(min(min(min(mf11in,mf21in),mf31in),mf41in),mf53in),mf61in);

```

```
%Definição das funções de pertinência de dv%
```

```
y=-5:0.01:5;
```

```
C=trapmf(y,[-6 -5 -0.5 0.5]);%dv1%
```

```
D=trapmf(y,[-0.5 0.5 5 6]);%dv2%
```

```
%Etapa de implicação%
```

```
mf1out=min(ativar1,D);
```

```
mf2out=0.8*min(ativar2_3,D);
```

```
mf3out=0.2*min(ativar2_3,C);
```

```
mf4out=min(ativar4,D);
```

```
mf5out=0.8*min(ativar5_6,D);
```

```
mf6out=0.2*min(ativar2_3,C);
```

```
mf7out=min(ativar7,D);
```

```
mf8out=min(ativar8,D);
```

```
mf9out=min(ativar9,D);
```

```
mf10out=min(ativar10,D);
```

```
mf11out=min(ativar11,D);
```

```
mf12out=0.9*min(ativar12_13,D);
```

```
mf13out=0.1*min(ativar12_13,C);
```

```
mf14out=min(ativar14,D);
```

```
mf15out=min(ativar15,D);
```

```
mf16out=min(ativar16,C);
```

```
mf17out=min(ativar17,D);
```

```
mf18out=min(ativar18,D);
```

```
mf19out=min(ativar19,D);
```

```
mf20out=min(ativar20,D);
```

```
mf21out=min(ativar21,D);
```

```
mf22out=min(ativar22,C);
```

```
mf23out=min(ativar23,D);
```

```
mf24out=min(ativar24,D);
```

```
mf25out=min(ativar25,D);
mf26out=min(ativar26,D);
mf27out=0.8*min(ativar27_28,D);
mf28out=0.2*min(ativar27_28,C);
mf29out=min(ativar29,D);
mf30out=0.7*min(ativar30_31,D);
mf31out=0.3*min(ativar30_31,C);
mf32out=min(ativar32,D);
mf33out=min(ativar33,D);
mf34out=min(ativar34,D);
mf35out=min(ativar35,D);
mf36out=min(ativar36,D);
mf37out=min(ativar37,D);
mf38out=0.6*min(ativar38_39,D);
mf39out=0.4*min(ativar38_39,C);

%Etapa de agregação%
ConjFuzzyRegras=[mf1out;mf2out;mf3out;mf4out;mf5out;
mf6out;mf7out;mf8out;mf9out;mf10out;mf11out;mf12out;
mf13out;mf14out;mf15out;mf16out;mf17out;mf18out;mf19out;
mf20out;mf21out;mf22out;mf23out;mf24out;mf25out;mf26out;
mf27out;mf28out;mf29out;mf30out;mf31out;mf32out;mf33out;
mf34out;mf35out;mf36out;mf37out;mf38out;mf39out];

ConjFuzzyOutAgregado=max(ConjFuzzyRegras);

%Plotagem da função de agregação%
figure; plot(y,ConjFuzzyOutAgregado,'b-'); grid
xlabel('Variavel de saida');
ylabel('Pertinencia');
ylabel('Conjunto Fuzzy de Saida Agregado');
```

τ_h UTILIZANDO O MAIOR ENTRE OS MENORES DOS MÁXIMOS E O MENOR ENTRE OS MAIORES DOS MÁXIMOS

%Definição dos valores de cada entrada%

x1 = input('Entre com o valor de Kn:');

x2 = input('Entre com o valor de sn0:');

x3 = input('Entre com o valor de JRC:');

x4 = input('Entre com o valor de sc:');

x5 = input('Entre com o valor de fb:');

x6 = input('Entre com o valor de dh:');

%Definição das funções de pertinência de Kn%

mf11in=trapmf(x1,[-1000 0 0 1000]); %Kn1%

mf12in=trapmf(x1,[3000 7500 8000 13000]); %Kn4%

mf13in=trimf(x1,[0 1000 3000]); %Kn2%

mf14in=trimf(x1,[1000 3000 7500]); %Kn3%

%Definição das funções de pertinência de sn0%

mf21in=trapmf(x2,[-0.5 0 0.5 1]); %sn01%

mf22in=trapmf(x2,[2 2.5 3 3.5]); %sn04%

mf23in=trimf(x2,[0.5 1 2]); %sn02%

mf24in=trimf(x2,[1 2 2.5]); %sn03%

%Definição das funções de pertinência de JRC%

mf31in=trapmf(x3,[-4 0 2 6]); %JRC1%

mf32in=trapmf(x3,[12 18 20 26]); %JRC4%

mf33in=trimf(x3,[2 6 12]); %JRC2%

mf34in=trimf(x3,[6 12 18]); %JRC3%

%Definição das funções de pertinência de sc%

mf41in=trapmf(x4,[-20 0 10 30]); %sc1%

mf42in=trapmf(x4,[60 120 120 180]); %sc4%

mf43in=trimf(x4,[10 30 60]); %sc2%

mf44in=trimf(x4,[30 60 120]); %sc3%

%Definição das funções de pertinência de fb%

```

mf51in=trapmf(x5,[0 20 27 34]); %fb1%
mf52in=trapmf(x5,[34 40 40 46]); %fb3%
mf53in=trimf(x5,[27 34 40]); %fb2%

%Definição das funções de pertinência de dh%
mf61in=trapmf(x6,[-20 0 5 25]); %dh1%
mf62in=trapmf(x6,[5 25 30 50]); %dh2%

%Etapa de ativação das regras%
ativar1=min(min(min(min(min(mf12in,mf23in),mf32in),mf44in),mf53in),mf61in);
ativar2_3=min(min(min(min(min(mf14in,mf23in),mf33in),mf43in),mf53in),mf61in);
ativar4=min(min(min(min(min(mf14in,mf23in),mf33in),mf43in),mf53in),mf62in);
ativar5_6=min(min(min(min(min(mf13in,mf23in),mf33in),mf43in),mf53in),mf61in);
ativar7=min(min(min(min(min(mf13in,mf23in),mf33in),mf43in),mf53in),mf62in);
ativar8=min(min(min(min(min(mf11in,mf23in),mf34in),mf44in),mf53in),mf61in);
ativar9_10=min(min(min(min(min(mf11in,mf23in),mf33in),mf43in),mf53in),mf61in);
ativar11=min(min(min(min(min(mf11in,mf23in),mf33in),mf43in),mf53in),mf62in);
ativar12_13_14=min(min(min(min(min(mf11in,mf22in),mf34in),mf41in),mf52in),mf61in);
ativar15_16=min(min(min(min(min(mf11in,mf22in),mf33in),mf41in),mf52in),mf61in);
ativar17=min(min(min(min(min(mf11in,mf22in),mf31in),mf41in),mf52in),mf62in);
ativar18=min(min(min(min(min(mf11in,mf22in),mf31in),mf41in),mf52in),mf61in);
ativar19_20=min(min(min(min(min(mf11in,mf22in),mf31in),mf41in),mf53in),mf61in);
ativar21_22=min(min(min(min(min(mf11in,mf24in),mf34in),mf41in),mf52in),mf61in);
ativar23=min(min(min(min(min(mf11in,mf24in),mf33in),mf41in),mf52in),mf62in);
ativar24_25=min(min(min(min(min(mf11in,mf24in),mf33in),mf41in),mf52in),mf61in);
ativar26_27=min(min(min(min(min(mf11in,mf24in),mf31in),mf41in),mf52in),mf62in);
ativar28_29=min(min(min(min(min(mf11in,mf24in),mf31in),mf41in),mf52in),mf61in);
ativar30=min(min(min(min(min(mf11in,mf24in),mf31in),mf41in),mf53in),mf61in);
ativar31_32=min(min(min(min(min(mf11in,mf23in),mf34in),mf41in),mf52in),mf61in);
ativar33_34=min(min(min(min(min(mf11in,mf23in),mf33in),mf41in),mf52in),mf62in);
ativar35_36=min(min(min(min(min(mf11in,mf23in),mf33in),mf41in),mf52in),mf61in);
ativar37=min(min(min(min(min(mf11in,mf23in),mf31in),mf41in),mf52in),mf62in);
ativar38_39=min(min(min(min(min(mf11in,mf23in),mf31in),mf41in),mf53in),mf61in);
ativar40_41=min(min(min(min(min(mf11in,mf23in),mf31in),mf41in),mf52in),mf61in);
ativar42=min(min(min(min(min(mf11in,mf21in),mf34in),mf41in),mf51in),mf62in);
ativar43=min(min(min(min(min(mf11in,mf21in),mf34in),mf41in),mf51in),mf61in);
ativar44_45_46=min(min(min(min(min(mf11in,mf21in),mf34in),mf41in),mf52in),mf61in);

```

```

ativar47_48_49=min(min(min(min(min(mf11in,mf21in),mf33in),mf41in),mf52in),mf62in);
ativar50_51_52=min(min(min(min(min(mf11in,mf21in),mf33in),mf41in),mf52in),mf61in);
ativar53_54=min(min(min(min(min(mf11in,mf21in),mf31in),mf41in),mf52in),mf62in);
ativar55_56=min(min(min(min(min(mf11in,mf21in),mf31in),mf41in),mf52in),mf61in);
ativar57=min(min(min(min(min(mf11in,mf21in),mf31in),mf41in),mf53in),mf61in);

```

```
%Definição das funções de pertinência de th%
```

```

y=-0:10:7000;
th1=trapmf(y,[-500 0 500 1000]);
th2=trimf(y,[500 1000 2000]);
th3=trimf(y,[1000 2000 4000]);
th4=trapmf(y,[2000 4000 7000 9000]);

```

```
%Etapa de implicação%
```

```

mf1out=min(ativar1,th4);
mf2out=0.5*min(ativar2_3,th2);
mf3out=0.5*min(ativar2_3,th3);
mf4out=min(ativar4,th3);
mf5out=0.7*min(ativar5_6,th2);
mf6out=0.3*min(ativar5_6,th3);
mf7out=min(ativar7,th3);
mf8out=min(ativar8,th4);
mf9out=0.8*min(ativar9_10,th2);
mf10out=0.2*min(ativar9_10,th3);
mf11out=min(ativar11,th2);
mf12out=0.1*min(ativar12_13_14,th2);
mf13out=0.6*min(ativar12_13_14,th3);
mf14out=0.3*min(ativar12_13_14,th4);
mf15out=0.7*min(ativar15_16,th3);
mf16out=0.3*min(ativar15_16,th4);
mf17out=min(ativar17,th3);
mf18out=min(ativar18,th3);
mf19out=0.7*min(ativar19_20,th2);
mf20out=0.3*min(ativar19_20,th3);
mf21out=0.1*min(ativar21_22,th2);
mf22out=0.9*min(ativar21_22,th3);
mf23out=min(ativar23,th3);

```

```
mf24out=0.1*min(ativar24_25,th2);
mf25out=0.9*min(ativar24_25,th3);
mf26out=0.8*min(ativar26_27,th2);
mf27out=0.2*min(ativar26_27,th3);
mf28out=0.1*min(ativar28_29,th2);
mf29out=0.9*min(ativar28_29,th3);
mf30out=min(ativar30,th2);
mf31out=0.3*min(ativar31_32,th2);
mf32out=0.7*min(ativar31_32,th3);
mf33out=0.3*min(ativar33_34,th2);
mf34out=0.7*min(ativar33_34,th3);
mf35out=0.1*min(ativar35_36,th2);
mf36out=0.9*min(ativar35_36,th3);
mf37out=min(ativar37,th2);
mf38out=0.8*min(ativar38_39,th1);
mf39out=0.2*min(ativar38_39,th2);
mf40out=0.8*min(ativar40_41,th2);
mf41out=0.2*min(ativar40_41,th3);
mf42out=min(ativar42,th1);
mf43out=min(ativar43,th1);
mf44out=0.2*min(ativar44_45_46,th1);
mf45out=0.7*min(ativar44_45_46,th2);
mf46out=0.1*min(ativar44_45_46,th3);
mf47out=0.2*min(ativar47_48_49,th1);
mf48out=0.5*min(ativar47_48_49,th2);
mf49out=0.3*min(ativar47_48_49,th3);
mf50out=0.3*min(ativar50_51_52,th1);
mf51out=0.6*min(ativar50_51_52,th2);
mf52out=0.1*min(ativar50_51_52,th3);
mf53out=0.9*min(ativar53_54,th1);
mf54out=0.1*min(ativar53_54,th2);
mf55out=0.9*min(ativar55_56,th1);
mf56out=0.1*min(ativar55_56,th2);
mf57out=min(ativar57,th1);

%Etapa de agregação%
ConjFuzzyRegras=[mf1out;mf2out;mf3out;mf4out;mf5out;
```

mf6out;mf7out;mf8out;mf9out;mf10out;mf11out;mf12out;
mf13out;mf14out;mf15out;mf16out;mf17out;mf18out;mf19out;
mf20out;mf21out;mf22out;mf23out;mf24out;mf25out;mf26out;
mf27out;mf28out;mf29out;mf30out;mf31out;mf32out;mf33out;
mf34out;mf35out;mf36out;mf37out;mf38out;mf39out;mf40out;
mf41out;mf42out;mf43out;mf44out;mf45out;mf46out;mf47out;
mf48out;mf49out;mf50out;mf51out;mf52out;mf53out;mf54out;
mf55out;mf56out;mf57out];

%Defuzzificar cada regra duas vezes (lom e som), gerando uma margem de segurança por regra%

%Maior dos menores limites inferiores para ser o limite inferior da margem de segurança%

SOM=[];

SOM1=[];

SOM2=[];

SOM3=[];

SOM4=[];

SOM5=[];

SOM6=[];

SOM7=[];

SOM8=[];

SOM9=[];

SOM10=[];

SOM11=[];

SOM12=[];

SOM13=[];

SOM14=[];

SOM15=[];

SOM16=[];

SOM17=[];

SOM18=[];

SOM19=[];

SOM20=[];

SOM21=[];

SOM22=[];

SOM23=[];

SOM24=[];

```
SOM25=[];  
SOM26=[];  
SOM27=[];  
SOM28=[];  
SOM29=[];  
SOM30=[];  
SOM31=[];  
SOM32=[];  
SOM33=[];  
SOM34=[];  
SOM35=[];  
SOM36=[];  
SOM37=[];  
SOM38=[];  
SOM39=[];  
SOM40=[];  
SOM41=[];  
SOM42=[];  
SOM43=[];  
SOM44=[];  
SOM45=[];  
SOM46=[];  
SOM47=[];  
SOM48=[];  
SOM49=[];  
SOM50=[];  
SOM51=[];  
SOM52=[];  
SOM53=[];  
SOM54=[];  
SOM55=[];  
SOM56=[];  
SOM57=[];  
SOM1=defuzz(y,mf1out,'som');  
SOM2=defuzz(y,mf2out,'som');  
SOM3=defuzz(y,mf3out,'som');  
SOM4=defuzz(y,mf4out,'som');
```

```
SOM5=defuzz(y,mf5out,'som');
SOM6=defuzz(y,mf6out,'som');
SOM7=defuzz(y,mf7out,'som');
SOM8=defuzz(y,mf8out,'som');
SOM9=defuzz(y,mf9out,'som');
SOM10=defuzz(y,mf10out,'som');
SOM11=defuzz(y,mf11out,'som');
SOM12=defuzz(y,mf12out,'som');
SOM13=defuzz(y,mf13out,'som');
SOM14=defuzz(y,mf14out,'som');
SOM15=defuzz(y,mf15out,'som');
SOM16=defuzz(y,mf16out,'som');
SOM17=defuzz(y,mf17out,'som');
SOM18=defuzz(y,mf18out,'som');
SOM19=defuzz(y,mf19out,'som');
SOM20=defuzz(y,mf20out,'som');
SOM21=defuzz(y,mf21out,'som');
SOM22=defuzz(y,mf22out,'som');
SOM23=defuzz(y,mf23out,'som');
SOM24=defuzz(y,mf24out,'som');
SOM25=defuzz(y,mf25out,'som');
SOM26=defuzz(y,mf26out,'som');
SOM27=defuzz(y,mf27out,'som');
SOM28=defuzz(y,mf28out,'som');
SOM29=defuzz(y,mf29out,'som');
SOM30=defuzz(y,mf30out,'som');
SOM31=defuzz(y,mf31out,'som');
SOM32=defuzz(y,mf32out,'som');
SOM33=defuzz(y,mf33out,'som');
SOM34=defuzz(y,mf34out,'som');
SOM35=defuzz(y,mf35out,'som');
SOM36=defuzz(y,mf36out,'som');
SOM37=defuzz(y,mf37out,'som');
SOM38=defuzz(y,mf38out,'som');
SOM39=defuzz(y,mf39out,'som');
SOM40=defuzz(y,mf40out,'som');
SOM41=defuzz(y,mf41out,'som');
```

```
SOM42=defuzz(y,mf42out,'som');
SOM43=defuzz(y,mf43out,'som');
SOM44=defuzz(y,mf44out,'som');
SOM45=defuzz(y,mf45out,'som');
SOM46=defuzz(y,mf46out,'som');
SOM47=defuzz(y,mf47out,'som');
SOM48=defuzz(y,mf48out,'som');
SOM49=defuzz(y,mf49out,'som');
SOM50=defuzz(y,mf50out,'som');
SOM51=defuzz(y,mf51out,'som');
SOM52=defuzz(y,mf52out,'som');
SOM53=defuzz(y,mf53out,'som');
SOM54=defuzz(y,mf54out,'som');
SOM55=defuzz(y,mf55out,'som');
SOM56=defuzz(y,mf56out,'som');
SOM57=defuzz(y,mf57out,'som');
SOM=[SOM1; SOM2; SOM3; SOM4; SOM5; SOM6; SOM7; SOM8;
SOM9; SOM10; SOM11; SOM12; SOM13; SOM14; SOM15; SOM16;
SOM17; SOM18; SOM19; SOM20; SOM21; SOM22; SOM23;
SOM24; SOM25; SOM26; SOM27; SOM28; SOM29; SOM30;
SOM31; SOM32; SOM33; SOM34; SOM35; SOM36; SOM37;
SOM38; SOM39; SOM40; SOM41; SOM42; SOM43; SOM44;
SOM45; SOM46; SOM47; SOM48; SOM49; SOM50; SOM51;
SOM52; SOM53; SOM54; SOM55; SOM56; SOM57];

%Menor dos maiores para ser o limite superior da margem de segurança%
LOM=[];
LOM1=[];
LOM2=[];
LOM3=[];
LOM4=[];
LOM5=[];
LOM6=[];
LOM7=[];
LOM8=[];
LOM9=[];
LOM10=[];
```

LOM11=[];
LOM12=[];
LOM13=[];
LOM14=[];
LOM15=[];
LOM16=[];
LOM17=[];
LOM18=[];
LOM19=[];
LOM20=[];
LOM21=[];
LOM22=[];
LOM23=[];
LOM24=[];
LOM25=[];
LOM26=[];
LOM27=[];
LOM28=[];
LOM29=[];
LOM30=[];
LOM31=[];
LOM32=[];
LOM33=[];
LOM34=[];
LOM35=[];
LOM36=[];
LOM37=[];
LOM38=[];
LOM39=[];
LOM40=[];
LOM41=[];
LOM42=[];
LOM43=[];
LOM44=[];
LOM45=[];
LOM46=[];
LOM47=[];

```
LOM48=[];
LOM49=[];
LOM50=[];
LOM51=[];
LOM52=[];
LOM53=[];
LOM54=[];
LOM55=[];
LOM56=[];
LOM57=[];
LOM1=defuzz(y,mf1out,'lom');
LOM2=defuzz(y,mf2out,'lom');
LOM3=defuzz(y,mf3out,'lom');
LOM4=defuzz(y,mf4out,'lom');
LOM5=defuzz(y,mf5out,'lom');
LOM6=defuzz(y,mf6out,'lom');
LOM7=defuzz(y,mf7out,'lom');
LOM8=defuzz(y,mf8out,'lom');
LOM9=defuzz(y,mf9out,'lom');
LOM10=defuzz(y,mf10out,'lom');
LOM11=defuzz(y,mf11out,'lom');
LOM12=defuzz(y,mf12out,'lom');
LOM13=defuzz(y,mf13out,'lom');
LOM14=defuzz(y,mf14out,'lom');
LOM15=defuzz(y,mf15out,'lom');
LOM16=defuzz(y,mf16out,'lom');
LOM17=defuzz(y,mf17out,'lom');
LOM18=defuzz(y,mf18out,'lom');
LOM19=defuzz(y,mf19out,'lom');
LOM20=defuzz(y,mf20out,'lom');
LOM21=defuzz(y,mf21out,'lom');
LOM22=defuzz(y,mf22out,'lom');
LOM23=defuzz(y,mf23out,'lom');
LOM24=defuzz(y,mf24out,'lom');
LOM25=defuzz(y,mf25out,'lom');
LOM26=defuzz(y,mf26out,'lom');
LOM27=defuzz(y,mf27out,'lom');
```

```
LOM28=defuzz(y,mf28out,'lom');
LOM29=defuzz(y,mf29out,'lom');
LOM30=defuzz(y,mf30out,'lom');
LOM31=defuzz(y,mf31out,'lom');
LOM32=defuzz(y,mf32out,'lom');
LOM33=defuzz(y,mf33out,'lom');
LOM34=defuzz(y,mf34out,'lom');
LOM35=defuzz(y,mf35out,'lom');
LOM36=defuzz(y,mf36out,'lom');
LOM37=defuzz(y,mf37out,'lom');
LOM38=defuzz(y,mf38out,'lom');
LOM39=defuzz(y,mf39out,'lom');
LOM40=defuzz(y,mf40out,'lom');
LOM41=defuzz(y,mf41out,'lom');
LOM42=defuzz(y,mf42out,'lom');
LOM43=defuzz(y,mf43out,'lom');
LOM44=defuzz(y,mf44out,'lom');
LOM45=defuzz(y,mf45out,'lom');
LOM46=defuzz(y,mf46out,'lom');
LOM47=defuzz(y,mf47out,'lom');
LOM48=defuzz(y,mf48out,'lom');
LOM49=defuzz(y,mf49out,'lom');
LOM50=defuzz(y,mf50out,'lom');
LOM51=defuzz(y,mf51out,'lom');
LOM52=defuzz(y,mf52out,'lom');
LOM53=defuzz(y,mf53out,'lom');
LOM54=defuzz(y,mf54out,'lom');
LOM55=defuzz(y,mf55out,'lom');
LOM56=defuzz(y,mf56out,'lom');
LOM57=defuzz(y,mf57out,'lom');
LOM=[LOM1; LOM2; LOM3; LOM4; LOM5; LOM6; LOM7; LOM8;
LOM9; LOM10; LOM11; LOM12; LOM13; LOM14; LOM15; LOM16;
LOM17; LOM18; LOM19; LOM20; LOM21; LOM22; LOM23;
LOM24; LOM25; LOM26; LOM27; LOM28; LOM29; LOM30;
LOM31; LOM32; LOM33; LOM34; LOM35; LOM36; LOM37;
LOM38; LOM39; LOM40; LOM41; LOM42; LOM43; LOM44;
LOM45; LOM46; LOM47; LOM48; LOM49; LOM50; LOM51;
```

LOM52; LOM53; LOM54; LOM55; LOM56; LOM57];

interval=[max(SOM), min(LOM)];

δ_v UTILIZANDO O MAIOR ENTRE OS MENORES DOS MÁXIMOS E O MENOR ENTRE OS MAIORES DOS MÁXIMOS

```

%Definição dos valores de cada entrada%
x1 = input('Entre com o valor de Kn:');
x2 = input('Entre com o valor de sn0:');
x3 = input('Entre com o valor de JRC:');
x4 = input('Entre com o valor de sc:');
x5 = input('Entre com o valor de fb:');
x6 = input('Entre com o valor de dh:');

%Definição das funções de pertinência de Kn%
mf11in=trapmf(x1,[-1000 0 0 1000]); %Kn1%
mf12in=trapmf(x1,[3000 7500 8000 13000]); %Kn4%
mf13in=trimf(x1,[0 1000 3000]); %Kn2%
mf14in=trimf(x1,[1000 3000 7500]); %Kn3%

%Definição das funções de pertinência de sn0%
mf21in=trapmf(x2,[-0.5 0 0.5 1]); %sn01%
mf22in=trapmf(x2,[2 2.5 3 3.5]); %sn04%
mf23in=trimf(x2,[0.5 1 2]); %sn02%
mf24in=trimf(x2,[1 2 2.5]); %sn03%

%Definição das funções de pertinência de JRC%
mf31in=trapmf(x3,[-4 0 2 6]); %JRC1%
mf32in=trapmf(x3,[12 18 20 26]); %JRC4%
mf33in=trimf(x3,[2 6 12]); %JRC2%
mf34in=trimf(x3,[6 12 18]); %JRC3%

%Definição das funções de pertinência de sc%
mf41in=trapmf(x4,[-20 0 10 30]); %sc1%
mf42in=trapmf(x4,[60 120 120 180]); %sc4%
mf43in=trimf(x4,[10 30 60]); %sc2%
mf44in=trimf(x4,[30 60 120]); %sc3%

```

%Definição das funções de pertinência de fb%

mf51in=trapmf(x5,[0 20 27 34]); %fb1%

mf52in=trapmf(x5,[34 40 40 46]); %fb3%

mf53in=trimf(x5,[27 34 40]); %fb2%

%Definição das funções de pertinência de dh%

mf61in=trapmf(x6,[-20 0 5 25]); %dh1%

mf62in=trapmf(x6,[5 25 30 50]); %dh2%

%Etapa de ativação das regras%

ativar1=min(min(min(min(min(mf12in,mf23in),mf32in),mf44in),mf53in),mf61in);

ativar2_3=min(min(min(min(min(mf14in,mf23in),mf33in),mf43in),mf53in),mf61in);

ativar4=min(min(min(min(min(mf14in,mf23in),mf33in),mf43in),mf53in),mf62in);

ativar5_6=min(min(min(min(min(mf13in,mf23in),mf33in),mf43in),mf53in),mf61in);

ativar7=min(min(min(min(min(mf13in,mf23in),mf33in),mf43in),mf53in),mf62in);

ativar8=min(min(min(min(min(mf11in,mf23in),mf34in),mf44in),mf53in),mf61in);

ativar9=min(min(min(min(min(mf11in,mf23in),mf33in),mf43in),mf53in),mf61in);

ativar10=min(min(min(min(min(mf11in,mf23in),mf33in),mf43in),mf53in),mf62in);

ativar11=min(min(min(min(min(mf11in,mf22in),mf34in),mf41in),mf52in),mf61in);

ativar12_13=min(min(min(min(min(mf11in,mf22in),mf33in),mf41in),mf52in),mf61in);

ativar14=min(min(min(min(min(mf11in,mf22in),mf31in),mf41in),mf52in),mf62in);

ativar15=min(min(min(min(min(mf11in,mf22in),mf31in),mf41in),mf52in),mf61in);

ativar16=min(min(min(min(min(mf11in,mf22in),mf31in),mf41in),mf53in),mf61in);

ativar17=min(min(min(min(min(mf11in,mf24in),mf34in),mf41in),mf52in),mf61in);

ativar18=min(min(min(min(min(mf11in,mf24in),mf33in),mf41in),mf52in),mf61in);

ativar19=min(min(min(min(min(mf11in,mf24in),mf33in),mf41in),mf52in),mf62in);

ativar20=min(min(min(min(min(mf11in,mf24in),mf31in),mf41in),mf52in),mf62in);

ativar21=min(min(min(min(min(mf11in,mf24in),mf31in),mf41in),mf52in),mf61in);

ativar22=min(min(min(min(min(mf11in,mf24in),mf31in),mf41in),mf53in),mf61in);

ativar23=min(min(min(min(min(mf11in,mf23in),mf34in),mf41in),mf52in),mf61in);

ativar24=min(min(min(min(min(mf11in,mf23in),mf33in),mf41in),mf52in),mf62in);

ativar25=min(min(min(min(min(mf11in,mf23in),mf33in),mf41in),mf52in),mf61in);

ativar26=min(min(min(min(min(mf11in,mf23in),mf31in),mf41in),mf52in),mf62in);

ativar27_28=min(min(min(min(min(mf11in,mf23in),mf31in),mf41in),mf53in),mf61in);

ativar29=min(min(min(min(min(mf11in,mf23in),mf31in),mf41in),mf52in),mf61in);

ativar30_31=min(min(min(min(min(mf11in,mf21in),mf34in),mf41in),mf51in),mf61in);

ativar32=min(min(min(min(min(mf11in,mf21in),mf34in),mf41in),mf52in),mf61in);

```

ativar33=min(min(min(min(min(mf11in,mf21in),mf34in),mf41in),mf51in),mf62in);
ativar34=min(min(min(min(min(mf11in,mf21in),mf33in),mf41in),mf52in),mf62in);
ativar35=min(min(min(min(min(mf11in,mf21in),mf33in),mf41in),mf52in),mf61in);
ativar36=min(min(min(min(min(mf11in,mf21in),mf31in),mf41in),mf52in),mf62in);
ativar37=min(min(min(min(min(mf11in,mf21in),mf31in),mf41in),mf52in),mf61in);
ativar38_39=min(min(min(min(min(mf11in,mf21in),mf31in),mf41in),mf53in),mf61in);

```

```
%Definição das funções de pertinência de dv%
```

```
y=-5:0.01:5;
```

```
C=trapmf(y,[-6 -5 -0.5 0.5]);%dv1%
```

```
D=trapmf(y,[-0.5 0.5 5 6]);%dv2%
```

```
%Etapa de implicação%
```

```
mf1out=min(ativar1,D);
```

```
mf2out=0.8*min(ativar2_3,D);
```

```
mf3out=0.2*min(ativar2_3,C);
```

```
mf4out=min(ativar4,D);
```

```
mf5out=0.8*min(ativar5_6,D);
```

```
mf6out=0.2*min(ativar2_3,C);
```

```
mf7out=min(ativar7,D);
```

```
mf8out=min(ativar8,D);
```

```
mf9out=min(ativar9,D);
```

```
mf10out=min(ativar10,D);
```

```
mf11out=min(ativar11,D);
```

```
mf12out=0.9*min(ativar12_13,D);
```

```
mf13out=0.1*min(ativar12_13,C);
```

```
mf14out=min(ativar14,D);
```

```
mf15out=min(ativar15,D);
```

```
mf16out=min(ativar16,C);
```

```
mf17out=min(ativar17,D);
```

```
mf18out=min(ativar18,D);
```

```
mf19out=min(ativar19,D);
```

```
mf20out=min(ativar20,D);
```

```
mf21out=min(ativar21,D);
```

```
mf22out=min(ativar22,C);
```

```
mf23out=min(ativar23,D);
```

```
mf24out=min(ativar24,D);
```

```

mf25out=min(ativar25,D);
mf26out=min(ativar26,D);
mf27out=0.8*min(ativar27_28,D);
mf28out=0.2*min(ativar27_28,C);
mf29out=min(ativar29,D);
mf30out=0.7*min(ativar30_31,D);
mf31out=0.3*min(ativar30_31,C);
mf32out=min(ativar32,D);
mf33out=min(ativar33,D);
mf34out=min(ativar34,D);
mf35out=min(ativar35,D);
mf36out=min(ativar36,D);
mf37out=min(ativar37,D);
mf38out=0.6*min(ativar38_39,D);
mf39out=0.4*min(ativar38_39,C);

```

```
%Etapa de agregação%
```

```

ConjFuzzyRegras=[mf1out;mf2out;mf3out;mf4out;mf5out;
mf6out;mf7out;mf8out;mf9out;mf10out;mf11out;mf12out;
mf13out;mf14out;mf15out;mf16out;mf17out;mf18out;mf19out;
mf20out;mf21out;mf22out;mf23out;mf24out;mf25out;mf26out;
mf27out;mf28out;mf29out;mf30out;mf31out;mf32out;mf33out;
mf34out;mf35out;mf36out;mf37out;mf38out;mf39out];

```

```
%Defuzzificar cada regra duas vezes (lom e som), gerando uma margem de segurança por regra%
```

```
%Maior dos menores limites inferiores para ser o limite inferior da margem de segurança%
```

```

SOM=[];
SOM1=[];
SOM2=[];
SOM3=[];
SOM4=[];
SOM5=[];
SOM6=[];
SOM7=[];
SOM8=[];
SOM9=[];

```

```
SOM10=[];
SOM11=[];
SOM12=[];
SOM13=[];
SOM14=[];
SOM15=[];
SOM16=[];
SOM17=[];
SOM18=[];
SOM19=[];
SOM20=[];
SOM21=[];
SOM22=[];
SOM23=[];
SOM24=[];
SOM25=[];
SOM26=[];
SOM27=[];
SOM28=[];
SOM29=[];
SOM30=[];
SOM31=[];
SOM32=[];
SOM33=[];
SOM34=[];
SOM35=[];
SOM36=[];
SOM37=[];
SOM38=[];
SOM39=[];
SOM1=defuzz(y,mf1out,'som');
SOM2=defuzz(y,mf2out,'som');
SOM3=defuzz(y,mf3out,'som');
SOM4=defuzz(y,mf4out,'som');
SOM5=defuzz(y,mf5out,'som');
SOM6=defuzz(y,mf6out,'som');
SOM7=defuzz(y,mf7out,'som');
```

```
SOM8=defuzz(y,mf8out,'som');
SOM9=defuzz(y,mf9out,'som');
SOM10=defuzz(y,mf10out,'som');
SOM11=defuzz(y,mf11out,'som');
SOM12=defuzz(y,mf12out,'som');
SOM13=defuzz(y,mf13out,'som');
SOM14=defuzz(y,mf14out,'som');
SOM15=defuzz(y,mf15out,'som');
SOM16=defuzz(y,mf16out,'som');
SOM17=defuzz(y,mf17out,'som');
SOM18=defuzz(y,mf18out,'som');
SOM19=defuzz(y,mf19out,'som');
SOM20=defuzz(y,mf20out,'som');
SOM21=defuzz(y,mf21out,'som');
SOM22=defuzz(y,mf22out,'som');
SOM23=defuzz(y,mf23out,'som');
SOM24=defuzz(y,mf24out,'som');
SOM25=defuzz(y,mf25out,'som');
SOM26=defuzz(y,mf26out,'som');
SOM27=defuzz(y,mf27out,'som');
SOM28=defuzz(y,mf28out,'som');
SOM29=defuzz(y,mf29out,'som');
SOM30=defuzz(y,mf30out,'som');
SOM31=defuzz(y,mf31out,'som');
SOM32=defuzz(y,mf32out,'som');
SOM33=defuzz(y,mf33out,'som');
SOM34=defuzz(y,mf34out,'som');
SOM35=defuzz(y,mf35out,'som');
SOM36=defuzz(y,mf36out,'som');
SOM37=defuzz(y,mf37out,'som');
SOM38=defuzz(y,mf38out,'som');
SOM39=defuzz(y,mf39out,'som');
SOM=[SOM1; SOM2; SOM3; SOM4; SOM5; SOM6; SOM7; SOM8;
SOM9; SOM10; SOM11; SOM12; SOM13; SOM14; SOM15; SOM16;
SOM17; SOM18; SOM19; SOM20; SOM21; SOM22; SOM23;
SOM24; SOM25; SOM26; SOM27; SOM28; SOM29; SOM30;
SOM31; SOM32; SOM33; SOM34; SOM35; SOM36; SOM37;
```

SOM38; SOM39];

%Menor dos maiores para ser o limite superior da margem de segurança%

LOM=[];

LOM1=[];

LOM2=[];

LOM3=[];

LOM4=[];

LOM5=[];

LOM6=[];

LOM7=[];

LOM8=[];

LOM9=[];

LOM10=[];

LOM11=[];

LOM12=[];

LOM13=[];

LOM14=[];

LOM15=[];

LOM16=[];

LOM17=[];

LOM18=[];

LOM19=[];

LOM20=[];

LOM21=[];

LOM22=[];

LOM23=[];

LOM24=[];

LOM25=[];

LOM26=[];

LOM27=[];

LOM28=[];

LOM29=[];

LOM30=[];

LOM31=[];

LOM32=[];

LOM33=[];

```
LOM34=[];
LOM35=[];
LOM36=[];
LOM37=[];
LOM38=[];
LOM39=[];
LOM1=defuzz(y,mf1out,'lom');
LOM2=defuzz(y,mf2out,'lom');
LOM3=defuzz(y,mf3out,'lom');
LOM4=defuzz(y,mf4out,'lom');
LOM5=defuzz(y,mf5out,'lom');
LOM6=defuzz(y,mf6out,'lom');
LOM7=defuzz(y,mf7out,'lom');
LOM8=defuzz(y,mf8out,'lom');
LOM9=defuzz(y,mf9out,'lom');
LOM10=defuzz(y,mf10out,'lom');
LOM11=defuzz(y,mf11out,'lom');
LOM12=defuzz(y,mf12out,'lom');
LOM13=defuzz(y,mf13out,'lom');
LOM14=defuzz(y,mf14out,'lom');
LOM15=defuzz(y,mf15out,'lom');
LOM16=defuzz(y,mf16out,'lom');
LOM17=defuzz(y,mf17out,'lom');
LOM18=defuzz(y,mf18out,'lom');
LOM19=defuzz(y,mf19out,'lom');
LOM20=defuzz(y,mf20out,'lom');
LOM21=defuzz(y,mf21out,'lom');
LOM22=defuzz(y,mf22out,'lom');
LOM23=defuzz(y,mf23out,'lom');
LOM24=defuzz(y,mf24out,'lom');
LOM25=defuzz(y,mf25out,'lom');
LOM26=defuzz(y,mf26out,'lom');
LOM27=defuzz(y,mf27out,'lom');
LOM28=defuzz(y,mf28out,'lom');
LOM29=defuzz(y,mf29out,'lom');
LOM30=defuzz(y,mf30out,'lom');
LOM31=defuzz(y,mf31out,'lom');
```

```
LOM32=defuzz(y,mf32out,'lom');
LOM33=defuzz(y,mf33out,'lom');
LOM34=defuzz(y,mf34out,'lom');
LOM35=defuzz(y,mf35out,'lom');
LOM36=defuzz(y,mf36out,'lom');
LOM37=defuzz(y,mf37out,'lom');
LOM38=defuzz(y,mf38out,'lom');
LOM39=defuzz(y,mf39out,'lom');
LOM=[LOM1; LOM2; LOM3; LOM4; LOM5; LOM6; LOM7; LOM8;
LOM9; LOM10; LOM11; LOM12; LOM13; LOM14; LOM15; LOM16;
LOM17; LOM18; LOM19; LOM20; LOM21; LOM22; LOM23;
LOM24; LOM25; LOM26; LOM27; LOM28; LOM29; LOM30;
LOM31; LOM32; LOM33; LOM34; LOM35; LOM36; LOM37;
LOM38; LOM39];

interval=[max(SOM), min(LOM)];
```

**APÊNDICE C – DESVIOS ABSOLUTOS DOS MODELOS CALCULADOS A PARTIR
DOS DADOS DE VALIDAÇÃO**

Tabela B.1 – Dados de validação

Kn (kPa/mm)	σ_{n0} (MPa)	JRC	σ_c (MPa)	ϕ_b (grau)	δh (mm)	τ_h (kPa)	δv (mm)
0	0,16	4	12	37,5	2	194	0,32
0	0,16	4	12	37,5	5	210	0,79
0	0,16	4	12	37,5	6	218	0,95
0	0,16	4	12	37,5	7	218	1,13
0	0,16	4	12	37,5	8	223	1,29
0	0,3	4	12	37,5	3	356	0,46
0	0,3	4	12	37,5	8	377	1,18
0	0,3	4	12	37,5	10	368	1,45
0	0,3	4	12	37,5	11	377	1,58
0	0,3	4	12	37,5	12	364	1,70
0	0,3	4	12	37,5	13	352	1,83
0	0,56	4	12	37,5	5	656	0,64
0	0,56	4	12	37,5	14	626	1,72
0	0,56	4	12	37,5	17	539	1,85
0	0,56	4	12	37,5	19	435	1,72
0	1,1	4	12	37,5	2	1172	0,18
0	1,1	4	12	37,5	11	1267	1,10
0	1,63	4	12	37,5	1	1068	0,09
0	1,63	4	12	37,5	5	1783	0,45
0	1,63	4	12	37,5	17	1480	1,09
0	2,43	4	12	37,5	3	2463	0,18
0	2,43	4	12	37,5	7	2369	0,44
0	2,43	4	12	37,5	13	2048	0,70
0	0,3	6	12	37,5	2	410	0,25
0	0,3	6	12	37,5	13	465	3,30
0	0,56	6	12	37,5	7	836	1,51
0	0,56	6	12	37,5	10	841	2,15
0	0,56	6	12	37,5	13	847	2,75
0	0,56	6	12	37,5	17	814	3,50
0	1,2	6	12	37,5	4	1725	0,90
0	1,2	6	12	37,5	8	1713	1,77
0	1,2	6	12	37,5	9	1688	1,97
0	1,2	6	12	37,5	10	1671	2,16
0	1,2	6	12	37,5	14	1629	2,94
0	1,2	6	12	37,5	19	1600	3,86
453	0,16	4	12	37,5	2	206	0,24
453	0,16	4	12	37,5	3	235,1	0,36

Kn (kPa/mm)	σ_n0 (MPa)	JRC	σ_c (MPa)	ϕ_b (grau)	δh (mm)	τ_h (kPa)	δv (mm)
453	0,16	4	12	37,5	5	285	0,64
453	0,16	4	12	37,5	6	301,7	0,76
453	0,16	4	12	37,5	7	322,5	0,93
453	0,16	4	12	37,5	14	472,3	1,44
453	0,3	4	12	37,5	5	493,1	0,63
453	0,3	4	12	37,5	8	584,7	0,96
453	0,56	4	12	37,5	4	784,5	0,45
453	0,56	4	12	37,5	5	834,4	0,55
453	0,56	4	12	37,5	7	905,2	0,74
453	0,56	4	12	37,5	10	971,8	0,99
453	0,56	4	12	37,5	14	959,3	1,18
453	0,56	4	12	37,5	15	917,7	1,18
453	0,56	4	12	37,5	17	797	1,16
453	0,56	4	12	37,5	19	688,7	1,05
453	1,1	4	12	37,5	14	1413	1,01
453	1,63	4	12	37,5	8	1838	0,58
453	1,63	4	12	37,5	14	1721	0,79
453	2,43	4	12	37,5	12	2613	0,28
453	2,43	4	12	37,5	17	2507	0,27
453	2,43	4	12	37,5	19	2369	0,24
453	0,3	6	12	37,5	1	335	-0,12
453	0,3	6	12	37,5	7	917,7	1,27
453	0,3	6	12	37,5	8	963,5	1,47
453	0,3	6	12	37,5	12	1113	2,01
453	0,3	6	12	37,5	19	1355	2,83
453	0,3	6	12	37,5	21	1417	3,03
453	0,3	6	12	37,5	25	1496	3,37
453	0,56	6	12	37,5	10	1584	1,47
453	0,56	6	12	37,5	11	1675	1,62
453	0,56	6	12	37,5	12	1746	1,73
453	0,56	6	12	37,5	15	1825	2,06
453	0,56	6	12	37,5	19	1925	2,38
453	0,56	6	12	37,5	20	1921	2,45
453	0,56	6	12	37,5	23	1933	2,60
453	0,56	6	12	37,5	24	1904	2,64
453	1,2	6	12	37,5	9	2108	0,71
453	1,2	6	12	37,5	16	2150	1,09
453	0,16	8	12	37,5	4	609,8	1,14
453	0,16	8	12	37,5	10	1285	2,60
453	0,3	8	12	37,5	5	906,7	1,30
453	0,3	8	12	37,5	12	1263	2,57
453	0,3	8	12	37,5	14	1139	2,68
453	0,3	8	12	37,5	19	750,1	2,50

Kn (kPa/mm)	σ_n0 (MPa)	JRC	σ_c (MPa)	ϕ_b (grau)	δh (mm)	τh (kPa)	δv (mm)
453	0,56	8	12	37,5	3	1252	0,68
453	0,56	8	12	37,5	17	1177	2,30
453	1,1	8	12	37,5	1	971,5	0,02
453	1,1	8	12	37,5	11	2008	1,54
453	1,63	8	12	37,5	6	2424	0,70
453	1,63	8	12	37,5	8	2418	0,89
453	1,63	8	12	37,5	11	2246	1,12
453	1,63	8	12	37,5	13	2057	1,18
453	2,43	8	12	37,5	2	2694	0,11
453	2,43	8	12	37,5	6	3007	0,32
453	2,43	8	12	37,5	13	2300	0,31
453	2,43	8	12	37,5	15	2127	0,22
453	0,3	13	12	37,5	3	1088	0,89
453	0,3	13	12	37,5	6	1527	1,84
453	0,3	13	12	37,5	14	971,5	2,49
453	0,56	13	12	37,5	3	1353	0,80
453	0,56	13	12	37,5	11	1120	1,67
453	0,56	13	12	37,5	13	1023	1,58
453	1,63	13	12	37,5	8	2296	0,84
453	1,63	13	12	37,5	11	1986	0,90
453	2,43	13	12	37,5	2	2639	0,13
453	2,43	13	12	37,5	11	2348	0,63
453	2,43	13	12	37,5	13	2141	0,53
453	0,56	2	20	32	2	461,7	-0,11
453	0,56	2	20	32	3	435,9	-0,05
453	0,56	2	20	32	4	423	-0,01
453	0,56	2	20	32	5	410,1	0,02
453	0,56	2	20	32	6	410,1	0,05
453	1,1	2	20	32	3	761,1	0,00
453	1,1	2	20	32	4	738,6	0,03
453	1,63	2	20	32	3	1025	-0,12
453	1,63	2	20	32	5	1035	-0,07
453	2,16	2	20	32	6	1115	-0,18
453	2,16	2	20	32	7	1080	-0,19
453	2,16	2	20	32	10	1022	-0,20
453	2,69	2	20	32	4	1553	-0,29
453	2,69	2	20	32	5	1515	-0,29
453	2,69	2	20	32	7	1408	-0,29
0	1	9	27,5	37	2	1206	0,10
133,33	1	9	27,5	37	2	1286	0,10
1033,33	1	9	27,5	37	1	1276	-0,06
315	1	14	90	35	1	3684	0,45
7515	1	20	90	35	4	5856	0,99

Kn (kPa/mm)	σ_{n0} (MPa)	JRC	σ_c (MPa)	ϕ_b (grau)	δh (mm)	τ_h (kPa)	δv (mm)
7515	1	20	90	35	8	6653	1,17
0	0,05	12	3,5	30	0,7	30,11	0,00
0	0,05	12	3,5	30	8,75	54,05	0,89
0	0,05	12	3,5	30	17,5	49,54	1,75
0	0,1	12	3,5	30	3,75	98,34	-0,16
0	0,1	12	3,5	30	7,5	99,95	0,28
0	0,1	12	3,5	30	15	93,91	1,05
453	0,8	8	21,5	35,5	2,6209	1289	0,48
453	0,8	8	21,5	35,5	9,7616	1479	1,54
453	0,8	8	21,5	35,5	11,557	1353	1,56
453	0,8	8	21,5	35,5	16,927	1092	1,45

Tabela B.2 – Desvios absolutos do modelo fuzzy Mamdani

Kn (kPa/mm)	σ_n0 (MPa)	JRC	σ_c (MPa)	ϕ_b (grau)	δh (mm)	τ_h (kPa)	Desvio (kPa)	δv (mm)	Desvio (mm)
0	0,16	4	12	37,5	2	1082	888,02	1,24	0,92
0	0,16	4	12	37,5	5	1082	871,42	1,24	0,45
0	0,16	4	12	37,5	6	1082	863,12	1,24	0,29
0	0,16	4	12	37,5	7	1082	863,12	1,24	0,11
0	0,16	4	12	37,5	8	1082	858,92	1,24	0,05
0	0,3	4	12	37,5	3	1082	725,72	1,24	0,78
0	0,3	4	12	37,5	8	1082	704,92	1,24	0,06
0	0,3	4	12	37,5	10	1188	819,54	1,24	0,21
0	0,3	4	12	37,5	11	1243	866,14	1,24	0,34
0	0,3	4	12	37,5	12	1294	930,07	1,24	0,46
0	0,3	4	12	37,5	13	1341	989,41	1,24	0,59
0	0,56	4	12	37,5	5	1495	839,56	1,24	0,60
0	0,56	4	12	37,5	14	1495	868,76	1,24	0,48
0	0,56	4	12	37,5	17	1504	964,61	1,28	0,57
0	0,56	4	12	37,5	19	1504	1068,61	1,51	0,21
0	1,1	4	12	37,5	2	1865	692,76	1,64	1,46
0	1,1	4	12	37,5	11	1865	597,76	1,64	0,54
0	1,63	4	12	37,5	1	1868	800,35	0,23	0,14
0	1,63	4	12	37,5	5	1868	85,35	0,23	0,22
0	1,63	4	12	37,5	17	1894	414,17	0,28	0,81
0	2,43	4	12	37,5	3	3069	606,19	0,23	0,05
0	2,43	4	12	37,5	7	3069	700,19	0,23	0,21
0	2,43	4	12	37,5	13	3069	1021,19	0,23	0,47
0	0,3	6	12	37,5	2	1369	959,54	2,42	2,16
0	0,3	6	12	37,5	13	1599	1134,40	2,42	0,89
0	0,56	6	12	37,5	7	1749	912,72	2,42	0,91
0	0,56	6	12	37,5	10	1749	907,22	2,42	0,27
0	0,56	6	12	37,5	13	1749	901,62	2,42	0,33
0	0,56	6	12	37,5	17	1857	1043,18	2,42	1,09
0	1,2	6	12	37,5	4	2329	604,25	2,42	1,52
0	1,2	6	12	37,5	8	2315	602,19	2,42	0,65
0	1,2	6	12	37,5	9	2315	627,19	2,42	0,45
0	1,2	6	12	37,5	10	2315	644,19	2,42	0,25
0	1,2	6	12	37,5	14	2294	664,59	2,41	0,53
0	1,2	6	12	37,5	19	2266	665,92	2,42	1,44
453	0,16	4	12	37,5	2	1082	875,62	1,24	1,00
453	0,16	4	12	37,5	3	1082	846,42	1,24	0,88
453	0,16	4	12	37,5	5	1082	796,52	1,24	0,60
453	0,16	4	12	37,5	6	1082	779,82	1,24	0,48
453	0,16	4	12	37,5	7	1082	759,02	1,24	0,31
453	0,16	4	12	37,5	14	1384	912,08	1,24	0,20

Kn (kPa/mm)	σ_{n0} (MPa)	JRC	σ_c (MPa)	ϕ_b (grau)	δh (mm)	τ_h (kPa)	Desvio (kPa)	δv (mm)	Desvio (mm)
453	0,3	4	12	37,5	5	1082	588,42	1,24	0,61
453	0,3	4	12	37,5	8	1082	496,82	1,24	0,28
453	0,56	4	12	37,5	4	1495	710,56	1,24	0,79
453	0,56	4	12	37,5	5	1495	660,66	1,24	0,69
453	0,56	4	12	37,5	7	1495	589,86	1,24	0,50
453	0,56	4	12	37,5	10	1495	523,26	1,24	0,25
453	0,56	4	12	37,5	14	1495	535,76	1,24	0,06
453	0,56	4	12	37,5	15	1495	577,36	1,24	0,06
453	0,56	4	12	37,5	17	1504	706,51	1,28	0,11
453	0,56	4	12	37,5	19	1504	814,81	1,51	0,46
453	1,1	4	12	37,5	14	1847	433,90	1,64	0,63
453	1,63	4	12	37,5	8	1868	30,35	0,23	0,35
453	1,63	4	12	37,5	14	1868	147,35	0,23	0,56
453	2,43	4	12	37,5	12	3069	456,19	0,23	0,05
453	2,43	4	12	37,5	17	2941	433,56	0,28	0,01
453	2,43	4	12	37,5	19	2841	471,73	0,63	0,38
453	0,3	6	12	37,5	1	1371	1035,96	2,41	2,53
453	0,3	6	12	37,5	7	1371	453,26	2,41	1,14
453	0,3	6	12	37,5	8	1371	407,46	2,41	0,94
453	0,3	6	12	37,5	12	1577	463,56	2,41	0,40
453	0,3	6	12	37,5	19	1851	496,41	2,41	0,42
453	0,3	6	12	37,5	21	1851	434,41	2,41	0,62
453	0,3	6	12	37,5	25	1851	355,41	2,41	0,96
453	0,56	6	12	37,5	10	1775	191,32	2,25	0,78
453	0,56	6	12	37,5	11	1775	100,32	2,25	0,64
453	0,56	6	12	37,5	12	1775	29,32	2,25	0,52
453	0,56	6	12	37,5	15	1813	12,03	2,23	0,17
453	0,56	6	12	37,5	19	1886	38,76	2,25	0,13
453	0,56	6	12	37,5	20	1886	34,76	2,25	0,19
453	0,56	6	12	37,5	23	1851	81,59	2,25	0,35
453	0,56	6	12	37,5	24	1851	52,59	2,33	0,31
453	1,2	6	12	37,5	9	2318	210,17	2,25	1,54
453	1,2	6	12	37,5	16	2274	123,71	2,25	1,16
453	0,16	8	12	37,5	4	1371	761,16	2,41	1,27
453	0,16	8	12	37,5	10	1464	179,35	2,41	0,19
453	0,3	8	12	37,5	5	1371	464,26	2,41	1,11
453	0,3	8	12	37,5	12	1577	313,56	2,41	0,16
453	0,3	8	12	37,5	14	1668	528,87	2,41	0,27
453	0,3	8	12	37,5	19	1851	1101,31	2,41	0,09
453	0,56	8	12	37,5	3	1775	523,32	2,25	1,57
453	0,56	8	12	37,5	17	1874	696,50	2,25	0,05
453	1,1	8	12	37,5	1	2318	1346,67	2,25	2,24
453	1,1	8	12	37,5	11	2318	310,17	2,25	0,72

Kn (kPa/mm)	σ_{n0} (MPa)	JRC	σ_c (MPa)	ϕ_b (grau)	δh (mm)	τ_h (kPa)	Desvio (kPa)	δv (mm)	Desvio (mm)
453	1,63	8	12	37,5	6	2318	105,83	2,25	1,55
453	1,63	8	12	37,5	8	2318	99,83	2,25	1,36
453	1,63	8	12	37,5	11	2318	72,17	2,25	1,13
453	1,63	8	12	37,5	13	2304	246,78	2,25	1,08
453	2,43	8	12	37,5	2	3473	778,73	1,94	1,83
453	2,43	8	12	37,5	6	3473	465,73	1,94	1,62
453	2,43	8	12	37,5	13	3473	1172,73	1,94	1,63
453	2,43	8	12	37,5	15	3460	1333,38	1,94	1,72
453	0,3	13	12	37,5	3	1411	323,07	2,41	1,52
453	0,3	13	12	37,5	6	1411	115,93	2,41	0,57
453	0,3	13	12	37,5	14	1411	439,57	2,41	0,07
453	0,56	13	12	37,5	3	1706	352,81	2,41	1,61
453	0,56	13	12	37,5	11	1706	585,81	2,41	0,74
453	0,56	13	12	37,5	13	1706	682,81	2,41	0,83
453	1,63	13	12	37,5	8	2304	7,78	2,41	1,57
453	1,63	13	12	37,5	11	2304	317,78	2,41	1,51
453	2,43	13	12	37,5	2	3539	900,41	2,41	2,28
453	2,43	13	12	37,5	11	3539	1191,41	2,41	1,78
453	2,43	13	12	37,5	13	3539	1398,41	2,41	1,88
453	0,56	2	20	32	2	509	47,34	0,50	0,61
453	0,56	2	20	32	3	509	73,14	0,50	0,55
453	0,56	2	20	32	4	509	86,04	0,50	0,51
453	0,56	2	20	32	5	509	98,94	0,50	0,48
453	0,56	2	20	32	6	509	98,94	0,50	0,45
453	1,1	2	20	32	3	648	113,03	1,47	1,46
453	1,1	2	20	32	4	648	90,53	1,47	1,44
453	1,63	2	20	32	3	956	68,94	-0,55	0,43
453	1,63	2	20	32	5	956	78,94	-0,55	0,48
453	2,16	2	20	32	6	1697	582,21	-2,40	2,22
453	2,16	2	20	32	7	1697	617,21	-2,40	2,21
453	2,16	2	20	32	10	1697	675,21	-2,40	2,19
453	2,69	2	20	32	4	1882	329,19	-2,40	2,11
453	2,69	2	20	32	5	1882	367,19	-2,40	2,11
453	2,69	2	20	32	7	1882	474,19	-2,40	2,11
0	1	9	27,5	37	2	1739	533,36	2,40	2,30
133,33	1	9	27,5	37	2	1739	453,36	2,17	2,07
1033,33	1	9	27,5	37	1	1882	606,19	1,47	1,53
315	1	14	90	35	1	4758	1074,11	2,40	1,95
7515	1	20	90	35	4	4758	1097,89	2,40	1,41
7515	1	20	90	35	8	4758	1894,89	2,40	1,23
0	0,05	12	3,5	30	0,7	415	385,22	0,99	0,99
0	0,05	12	3,5	30	8,75	415	361,28	0,99	0,10
0	0,05	12	3,5	30	17,5	415	365,79	1,66	0,10

Kn (kPa/mm)	σ_{n0} (MPa)	JRC	σ_c (MPa)	ϕ_b (grau)	δh (mm)	τ_h (kPa)	Desvio (kPa)	δv (mm)	Desvio (mm)
0	0,1	12	3,5	30	3,75	415	316,99	0,99	1,15
0	0,1	12	3,5	30	7,5	415	315,38	0,99	0,71
0	0,1	12	3,5	30	15	423	329,32	1,33	0,28
453	0,8	8	21,5	35,5	2,6209	1868	579,32	1,76	1,27
453	0,8	8	21,5	35,5	9,7616	1889	409,99	1,76	0,22
453	0,8	8	21,5	35,5	11,557	1980	627,05	1,76	0,20
453	0,8	8	21,5	35,5	16,927	1990	897,78	1,82	0,37

Tabela B.3 – Desvios absolutos do modelo fuzzy Takagi-Sugeno de ordem zero

Kn (kPa/mm)	σ_{n0} (MPa)	JRC	σ_c (MPa)	ϕ_b (grau)	δh (mm)	τ_h (kPa)	Desvio (kPa)	δv (mm)	Desvio (mm)
0	0,16	4	12	37,5	2	637	443,60	1,92	1,61
0	0,16	4	12	37,5	5	637	427,00	1,92	1,14
0	0,16	4	12	37,5	6	655	436,32	1,96	1,01
0	0,16	4	12	37,5	7	670	451,75	2,00	0,87
0	0,16	4	12	37,5	8	684	461,19	2,03	0,74
0	0,3	4	12	37,5	3	637	281,30	1,92	1,47
0	0,3	4	12	37,5	8	684	307,19	2,03	0,85
0	0,3	4	12	37,5	10	707	338,50	2,08	0,63
0	0,3	4	12	37,5	11	717	339,99	2,10	0,52
0	0,3	4	12	37,5	12	725	361,36	2,12	0,42
0	0,3	4	12	37,5	13	734	381,93	2,14	0,31
0	0,56	4	12	37,5	5	884	228,94	2,03	1,38
0	0,56	4	12	37,5	14	976	349,84	2,22	0,50
0	0,56	4	12	37,5	17	990	451,52	2,22	0,37
0	0,56	4	12	37,5	19	1026	591,14	2,26	0,53
0	1,1	4	12	37,5	2	1503	330,52	2,01	1,83
0	1,1	4	12	37,5	11	1533	266,06	2,18	1,08
0	1,63	4	12	37,5	1	1657	589,16	1,60	1,51
0	1,63	4	12	37,5	5	1657	125,84	1,60	1,15
0	1,63	4	12	37,5	17	1655	175,20	1,97	0,87
0	2,43	4	12	37,5	3	2222	240,60	0,85	0,67
0	2,43	4	12	37,5	7	2196	172,52	1,07	0,63
0	2,43	4	12	37,5	13	2188	139,64	1,33	0,62
0	0,3	6	12	37,5	2	1045	635,36	2,52	2,26
0	0,3	6	12	37,5	13	1172	707,31	2,52	0,79
0	0,56	6	12	37,5	7	1389	553,29	2,52	1,00
0	0,56	6	12	37,5	10	1427	585,98	2,52	0,37
0	0,56	6	12	37,5	13	1421	573,80	2,52	0,24
0	0,56	6	12	37,5	17	1457	643,22	2,52	0,99
0	1,2	6	12	37,5	4	2124	399,24	2,52	1,62
0	1,2	6	12	37,5	8	2058	344,63	2,52	0,75
0	1,2	6	12	37,5	9	2065	376,91	2,52	0,55
0	1,2	6	12	37,5	10	2062	391,07	2,52	0,35
0	1,2	6	12	37,5	14	2049	420,02	2,52	0,43
0	1,2	6	12	37,5	19	2015	414,87	2,52	1,34
453	0,16	4	12	37,5	2	637	431,20	1,92	1,69
453	0,16	4	12	37,5	3	637	402,00	1,92	1,57
453	0,16	4	12	37,5	5	637	352,10	1,92	1,29
453	0,16	4	12	37,5	6	655	353,02	1,96	1,20
453	0,16	4	12	37,5	7	670	347,65	2,00	1,07
453	0,16	4	12	37,5	14	741	268,60	2,15	0,71

Kn (kPa/mm)	σ_{n0} (MPa)	JRC	σ_c (MPa)	ϕ_b (grau)	δh (mm)	τ_h (kPa)	Desvio (kPa)	δv (mm)	Desvio (mm)
453	0,3	4	12	37,5	5	637	144,00	1,92	1,29
453	0,3	4	12	37,5	8	684	99,09	2,03	1,06
453	0,56	4	12	37,5	4	913	128,48	2,00	1,56
453	0,56	4	12	37,5	5	913	78,58	2,00	1,45
453	0,56	4	12	37,5	7	1019	113,63	2,11	1,37
453	0,56	4	12	37,5	10	1042	70,23	2,17	1,18
453	0,56	4	12	37,5	14	1027	67,90	2,21	1,03
453	0,56	4	12	37,5	15	1024	106,28	2,22	1,04
453	0,56	4	12	37,5	17	1042	245,35	2,21	1,05
453	0,56	4	12	37,5	19	1081	391,83	2,24	1,19
453	1,1	4	12	37,5	14	1561	148,37	2,20	1,19
453	1,63	4	12	37,5	8	1669	168,98	1,80	1,22
453	1,63	4	12	37,5	14	1684	36,75	1,97	1,18
453	2,43	4	12	37,5	12	2185	427,99	1,30	1,02
453	2,43	4	12	37,5	17	2157	349,97	1,32	1,05
453	2,43	4	12	37,5	19	2136	233,03	1,41	1,16
453	0,3	6	12	37,5	1	1045	709,96	2,52	2,64
453	0,3	6	12	37,5	7	1093	175,61	2,52	1,25
453	0,3	6	12	37,5	8	1112	148,79	2,52	1,05
453	0,3	6	12	37,5	12	1167	54,02	2,52	0,51
453	0,3	6	12	37,5	19	1247	108,01	2,52	0,32
453	0,3	6	12	37,5	21	1274	142,97	2,52	0,51
453	0,3	6	12	37,5	25	1358	138,22	2,52	0,85
453	0,56	6	12	37,5	10	1498	85,67	2,45	0,98
453	0,56	6	12	37,5	11	1494	180,94	2,46	0,84
453	0,56	6	12	37,5	12	1490	255,96	2,46	0,73
453	0,56	6	12	37,5	15	1491	334,36	2,46	0,40
453	0,56	6	12	37,5	19	1541	384,03	2,46	0,07
453	0,56	6	12	37,5	20	1557	364,50	2,45	0,01
453	0,56	6	12	37,5	23	1564	368,54	2,44	0,16
453	0,56	6	12	37,5	24	1568	336,10	2,47	0,17
453	1,2	6	12	37,5	9	2043	64,73	2,45	1,74
453	1,2	6	12	37,5	16	2022	127,64	2,46	1,37
453	0,16	8	12	37,5	4	1075	465,30	2,52	1,37
453	0,16	8	12	37,5	10	1138	147,38	2,52	0,08
453	0,3	8	12	37,5	5	1075	168,40	2,52	1,21
453	0,3	8	12	37,5	12	1156	107,48	2,52	0,05
453	0,3	8	12	37,5	14	1171	31,72	2,52	0,17
453	0,3	8	12	37,5	19	1215	464,86	2,52	0,02
453	0,56	8	12	37,5	3	1404	151,87	2,45	1,77
453	0,56	8	12	37,5	17	1497	320,16	2,47	0,17
453	1,1	8	12	37,5	1	2038	1066,02	2,44	2,42
453	1,1	8	12	37,5	11	2014	6,06	2,46	0,93

Kn (kPa/mm)	σ_{n0} (MPa)	JRC	σ_c (MPa)	ϕ_b (grau)	δh (mm)	τ_h (kPa)	Desvio (kPa)	δv (mm)	Desvio (mm)
453	1,63	8	12	37,5	6	2077	347,30	2,47	1,77
453	1,63	8	12	37,5	8	2070	348,36	2,47	1,58
453	1,63	8	12	37,5	11	2080	166,18	2,48	1,36
453	1,63	8	12	37,5	13	2085	28,40	2,48	1,31
453	2,43	8	12	37,5	2	2812	117,61	2,30	2,19
453	2,43	8	12	37,5	6	2794	213,37	2,31	1,99
453	2,43	8	12	37,5	13	2747	446,98	2,33	2,02
453	2,43	8	12	37,5	15	2735	607,55	2,34	2,12
453	0,3	13	12	37,5	3	1125	36,56	2,52	1,63
453	0,3	13	12	37,5	6	1125	402,44	2,52	0,68
453	0,3	13	12	37,5	14	1125	153,06	2,52	0,03
453	0,56	13	12	37,5	3	1355	1,51	2,52	1,72
453	0,56	13	12	37,5	11	1355	234,51	2,52	0,84
453	0,56	13	12	37,5	13	1355	331,51	2,52	0,94
453	1,63	13	12	37,5	8	2118	177,86	2,52	1,68
453	1,63	13	12	37,5	11	2118	132,14	2,52	1,61
453	2,43	13	12	37,5	2	2797	158,21	2,52	2,38
453	2,43	13	12	37,5	11	2797	449,21	2,52	1,89
453	2,43	13	12	37,5	13	2797	656,21	2,52	1,99
453	0,56	2	20	32	2	417	45,01	0,79	0,90
453	0,56	2	20	32	3	417	19,21	0,79	0,84
453	0,56	2	20	32	4	417	6,31	0,79	0,80
453	0,56	2	20	32	5	417	6,59	0,79	0,77
453	0,56	2	20	32	6	417	6,59	0,79	0,74
453	1,1	2	20	32	3	637	124,58	0,84	0,84
453	1,1	2	20	32	4	637	102,08	0,84	0,81
453	1,63	2	20	32	3	884	140,87	-0,73	0,60
453	1,63	2	20	32	5	884	150,87	-0,73	0,65
453	2,16	2	20	32	6	1323	207,61	-2,52	2,34
453	2,16	2	20	32	7	1323	242,61	-2,52	2,33
453	2,16	2	20	32	10	1323	300,61	-2,52	2,31
453	2,69	2	20	32	4	1517	36,03	-2,52	2,23
453	2,69	2	20	32	5	1517	1,97	-2,52	2,23
453	2,69	2	20	32	7	1517	108,97	-2,52	2,23
0	1	9	27,5	37	2	1634	427,58	2,52	2,42
133,33	1	9	27,5	37	2	1616	329,98	2,36	2,27
1033,33	1	9	27,5	37	1	1524	248,48	1,51	1,57
315	1	14	90	35	1	4976	1292,06	2,52	2,06
7515	1	20	90	35	4	4976	879,94	2,52	1,53
7515	1	20	90	35	8	4976	1676,94	2,52	1,35
0	0,05	12	3,5	30	0,7	371	341,10	1,01	1,00
0	0,05	12	3,5	30	8,75	371	317,16	1,38	0,49
0	0,05	12	3,5	30	17,5	371	321,67	1,92	0,16

Kn (kPa/mm)	σ_{n0} (MPa)	JRC	σ_c (MPa)	ϕ_b (grau)	δh (mm)	τ_h (kPa)	Desvio (kPa)	δv (mm)	Desvio (mm)
0	0,1	12	3,5	30	3,75	371	272,87	1,01	1,17
0	0,1	12	3,5	30	7,5	371	271,26	1,28	1,00
0	0,1	12	3,5	30	15	371	277,30	1,76	0,71
453	0,8	8	21,5	35,5	2,6209	1523	233,79	2,29	1,80
453	0,8	8	21,5	35,5	9,7616	1584	104,63	2,36	0,82
453	0,8	8	21,5	35,5	11,557	1594	240,67	2,37	0,81
453	0,8	8	21,5	35,5	16,927	1603	510,60	2,39	0,94

Tabela B.4 – Desvios absolutos do modelo fuzzy Takagi-Sugeno de ordem um

Kn (kPa/mm)	σ_{n0} (MPa)	JRC	σ_c (MPa)	ϕ_b (grau)	δh (mm)	τ_h (kPa)	Desvio (kPa)	δv (mm)	Desvio (mm)
0	0,16	4	12	37,5	2	393	199,17	0,86	0,54
0	0,16	4	12	37,5	5	438	227,55	1,14	0,36
0	0,16	4	12	37,5	6	453	234,73	1,24	0,28
0	0,16	4	12	37,5	7	469	250,13	1,33	0,20
0	0,16	4	12	37,5	8	484	261,28	1,42	0,13
0	0,3	4	12	37,5	3	507	151,67	0,88	0,42
0	0,3	4	12	37,5	8	584	207,04	1,35	0,18
0	0,3	4	12	37,5	10	614	245,89	1,54	0,09
0	0,3	4	12	37,5	11	629	252,82	1,64	0,05
0	0,3	4	12	37,5	12	645	280,52	1,73	0,03
0	0,3	4	12	37,5	13	660	308,20	1,82	0,00
0	0,56	4	12	37,5	5	727	71,90	0,94	0,30
0	0,56	4	12	37,5	14	864	238,12	1,79	0,07
0	0,56	4	12	37,5	17	909	370,60	2,07	0,22
0	0,56	4	12	37,5	19	940	505,24	2,26	0,54
0	1,1	4	12	37,5	2	1080	92,26	0,38	0,20
0	1,1	4	12	37,5	11	1214	52,66	1,23	0,13
0	1,63	4	12	37,5	1	1441	373,32	0,02	0,07
0	1,63	4	12	37,5	5	1501	282,30	0,40	0,05
0	1,63	4	12	37,5	17	1679	198,56	1,53	0,44
0	2,43	4	12	37,5	3	2023	439,79	-0,20	0,38
0	2,43	4	12	37,5	7	2085	284,10	0,18	0,26
0	2,43	4	12	37,5	13	2177	128,70	0,74	0,04
0	0,3	6	12	37,5	2	639	229,40	0,84	0,58
0	0,3	6	12	37,5	13	804	339,26	1,88	1,43
0	0,56	6	12	37,5	7	901	65,63	1,18	0,34
0	0,56	6	12	37,5	10	946	104,73	1,46	0,69
0	0,56	6	12	37,5	13	990	143,60	1,74	1,01
0	0,56	6	12	37,5	17	1050	236,68	2,12	1,38
0	1,2	6	12	37,5	4	1318	407,09	0,57	0,33
0	1,2	6	12	37,5	8	1377	336,43	0,95	0,82
0	1,2	6	12	37,5	9	1392	296,49	1,04	0,92
0	1,2	6	12	37,5	10	1406	264,67	1,14	1,03
0	1,2	6	12	37,5	14	1466	163,43	1,51	1,43
0	1,2	6	12	37,5	19	1539	60,64	1,99	1,87
453	0,16	4	12	37,5	2	482	275,77	0,81	0,58
453	0,16	4	12	37,5	3	497	261,57	0,91	0,55
453	0,16	4	12	37,5	5	527	241,66	1,10	0,46
453	0,16	4	12	37,5	6	542	240,08	1,19	0,43
453	0,16	4	12	37,5	7	557	234,39	1,28	0,36
453	0,16	4	12	37,5	14	662	189,95	1,94	0,50

Kn (kPa/mm)	σ_0 (MPa)	JRC	σ_c (MPa)	ϕ_b (grau)	δh (mm)	τ_h (kPa)	Desvio (kPa)	δv (mm)	Desvio (mm)
453	0,3	4	12	37,5	5	626	133,36	1,03	0,39
453	0,3	4	12	37,5	8	672	87,03	1,31	0,34
453	0,56	4	12	37,5	4	799	14,24	0,80	0,35
453	0,56	4	12	37,5	5	814	20,71	0,89	0,34
453	0,56	4	12	37,5	7	844	60,71	1,08	0,34
453	0,56	4	12	37,5	10	889	82,60	1,36	0,38
453	0,56	4	12	37,5	14	949	10,57	1,74	0,56
453	0,56	4	12	37,5	15	964	45,93	1,84	0,66
453	0,56	4	12	37,5	17	993	196,48	2,02	0,86
453	0,56	4	12	37,5	19	1024	334,82	2,21	1,16
453	1,1	4	12	37,5	14	1331	81,59	1,47	0,46
453	1,63	4	12	37,5	8	1614	224,41	0,63	0,05
453	1,63	4	12	37,5	14	1703	18,25	1,20	0,41
453	2,43	4	12	37,5	12	2217	395,70	0,61	0,32
453	2,43	4	12	37,5	17	2294	213,21	1,08	0,81
453	2,43	4	12	37,5	19	2325	44,07	1,27	1,02
453	0,3	6	12	37,5	1	710	375,23	0,70	0,81
453	0,3	6	12	37,5	7	799	119,10	1,26	0,00
453	0,3	6	12	37,5	8	813	150,33	1,36	0,11
453	0,3	6	12	37,5	12	872	241,22	1,74	0,28
453	0,3	6	12	37,5	19	975	380,45	2,40	0,43
453	0,3	6	12	37,5	21	1004	413,15	2,59	0,44
453	0,3	6	12	37,5	25	1062	433,95	2,96	0,40
453	0,56	6	12	37,5	10	1023	560,97	1,42	0,05
453	0,56	6	12	37,5	11	1038	637,15	1,51	0,11
453	0,56	6	12	37,5	12	1053	693,32	1,60	0,13
453	0,56	6	12	37,5	15	1097	727,98	1,89	0,17
453	0,56	6	12	37,5	19	1156	769,30	2,27	0,12
453	0,56	6	12	37,5	20	1170	750,66	2,36	0,08
453	0,56	6	12	37,5	23	1214	718,61	2,64	0,04
453	0,56	6	12	37,5	24	1229	675,00	2,74	0,10
453	1,2	6	12	37,5	9	1448	660,19	1,00	0,28
453	1,2	6	12	37,5	16	1552	597,70	1,66	0,57
453	0,16	8	12	37,5	4	788	178,12	1,11	0,04
453	0,16	8	12	37,5	10	876	409,44	1,67	0,93
453	0,3	8	12	37,5	5	902	5,15	1,13	0,17
453	0,3	8	12	37,5	12	1004	259,36	1,79	0,78
453	0,3	8	12	37,5	14	1033	106,02	1,98	0,70
453	0,3	8	12	37,5	19	1106	356,33	2,45	0,05
453	0,56	8	12	37,5	3	1052	200,45	0,81	0,12
453	0,56	8	12	37,5	17	1257	79,89	2,13	0,17
453	1,1	8	12	37,5	1	1387	415,77	0,35	0,33
453	1,1	8	12	37,5	11	1536	471,59	1,29	0,24

Kn (kPa/mm)	σ_{n0} (MPa)	JRC	σ_c (MPa)	ϕ_b (grau)	δh (mm)	τ_h (kPa)	Desvio (kPa)	δv (mm)	Desvio (mm)
453	1,63	8	12	37,5	6	1834	590,32	0,55	0,15
453	1,63	8	12	37,5	8	1864	554,43	0,74	0,15
453	1,63	8	12	37,5	11	1908	338,14	1,02	0,10
453	1,63	8	12	37,5	13	1937	119,60	1,21	0,04
453	2,43	8	12	37,5	2	2294	400,30	-0,23	0,34
453	2,43	8	12	37,5	6	2355	652,11	0,14	0,18
453	2,43	8	12	37,5	13	2462	161,76	0,81	0,49
453	2,43	8	12	37,5	15	2492	365,25	0,99	0,78
453	0,3	13	12	37,5	3	1200	111,59	1,08	0,19
453	0,3	13	12	37,5	6	1244	283,01	1,36	0,48
453	0,3	13	12	37,5	14	1362	390,89	2,12	0,37
453	0,56	13	12	37,5	3	1379	25,68	0,94	0,15
453	0,56	13	12	37,5	11	1497	377,14	1,70	0,03
453	0,56	13	12	37,5	13	1527	503,75	1,89	0,31
453	1,63	13	12	37,5	8	2183	112,84	0,88	0,03
453	1,63	13	12	37,5	11	2228	241,76	1,16	0,26
453	2,43	13	12	37,5	2	2623	16,25	-0,10	0,23
453	2,43	13	12	37,5	11	2757	408,89	0,75	0,13
453	2,43	13	12	37,5	13	2787	645,70	0,94	0,41
453	0,56	2	20	32	2	299	162,56	-0,07	0,04
453	0,56	2	20	32	3	314	121,67	0,03	0,08
453	0,56	2	20	32	4	329	93,69	0,12	0,13
453	0,56	2	20	32	5	344	65,70	0,21	0,19
453	0,56	2	20	32	6	359	50,62	0,31	0,26
453	1,1	2	20	32	3	706	54,94	-0,25	0,26
453	1,1	2	20	32	4	721	17,47	-0,16	0,19
453	1,63	2	20	32	3	1086	61,05	-0,52	0,39
453	1,63	2	20	32	5	1116	80,73	-0,33	0,25
453	2,16	2	20	32	6	1500	385,49	-0,50	0,33
453	2,16	2	20	32	7	1515	435,21	-0,41	0,22
453	2,16	2	20	32	10	1559	537,39	-0,12	0,08
453	2,69	2	20	32	4	1837	284,11	-0,97	0,68
453	2,69	2	20	32	5	1852	336,87	-0,88	0,59
453	2,69	2	20	32	7	1881	473,39	-0,69	0,40
0	1	9	27,5	37	2	1815	609,30	0,60	0,50
133,33	1	9	27,5	37	2	1836	550,49	0,59	0,49
1033,33	1	9	27,5	37	1	1973	697,41	0,41	0,47
315	1	14	90	35	1	4195	511,30	0,77	0,32
7515	1	20	90	35	4	5389	466,70	0,50	0,49
7515	1	20	90	35	8	5449	1203,70	0,87	0,29
0	0,05	12	3,5	30	0,7	-276	306,42	0,01	0,01
0	0,05	12	3,5	30	8,75	-155	208,81	0,77	0,12
0	0,05	12	3,5	30	17,5	-23	72,17	1,60	0,15

Kn (kPa/mm)	σ_{n0} (MPa)	JRC	σ_c (MPa)	ϕ_b (grau)	δh (mm)	τ_h (kPa)	Desvio (kPa)	δv (mm)	Desvio (mm)
0	0,1	12	3,5	30	3,75	-194	292,73	0,27	0,43
0	0,1	12	3,5	30	7,5	-138	237,71	0,63	0,35
0	0,1	12	3,5	30	15	-25	118,42	1,34	0,29
453	0,8	8	21,5	35,5	2,6209	1317	28,40	0,46	0,02
453	0,8	8	21,5	35,5	9,7616	1422	57,42	1,14	0,40
453	0,8	8	21,5	35,5	11,557	1448	94,98	1,31	0,25
453	0,8	8	21,5	35,5	16,927	1527	435,31	1,82	0,36

Tabela B.5 – Desvios absolutos do modelo neuro-fuzzy ANFIS com quatro variáveis de entrada utilizando a técnica de agrupamento subtrativo

Kn (kPa/mm)	σ_n0 (MPa)	JRC	σ_c (MPa)	ϕ_b (grau)	δh (mm)	τ_h (kPa)	Desvio (kPa)	δv (mm)	Desvio (mm)
0	0,16	4	12	37,5	2	417	223,30	0,12	0,20
0	0,16	4	12	37,5	5	610	399,90	0,54	0,24
0	0,16	4	12	37,5	6	660	441,50	0,69	0,26
0	0,16	4	12	37,5	7	696	477,96	0,85	0,28
0	0,16	4	12	37,5	8	714	491,78	1,00	0,29
0	0,3	4	12	37,5	3	589	232,72	0,25	0,20
0	0,3	4	12	37,5	8	837	460,17	1,00	0,18
0	0,3	4	12	37,5	10	822	454,06	1,29	0,17
0	0,3	4	12	37,5	11	778	401,31	1,41	0,18
0	0,3	4	12	37,5	12	714	350,21	1,51	0,19
0	0,3	4	12	37,5	13	643	290,98	1,60	0,23
0	0,56	4	12	37,5	5	914	258,69	0,54	0,10
0	0,56	4	12	37,5	14	860	233,40	1,67	0,04
0	0,56	4	12	37,5	17	722	183,17	1,84	0,01
0	0,56	4	12	37,5	19	720	284,67	1,94	0,21
0	1,1	4	12	37,5	2	1347	174,51	0,12	0,06
0	1,1	4	12	37,5	11	1497	229,89	1,41	0,31
0	1,63	4	12	37,5	1	1933	865,29	-0,02	0,10
0	1,63	4	12	37,5	5	1880	96,57	0,54	0,09
0	1,63	4	12	37,5	17	1698	218,14	1,84	0,75
0	2,43	4	12	37,5	3	2476	12,88	0,25	0,08
0	2,43	4	12	37,5	7	2404	35,07	0,85	0,41
0	2,43	4	12	37,5	13	2297	248,70	1,60	0,90
0	0,3	6	12	37,5	2	520	110,41	0,38	0,13
0	0,3	6	12	37,5	13	643	177,68	2,04	1,26
0	0,56	6	12	37,5	7	1016	180,23	1,12	0,39
0	0,56	6	12	37,5	10	1070	229,03	1,62	0,52
0	0,56	6	12	37,5	13	930	83,31	2,04	0,71
0	0,56	6	12	37,5	17	722	91,63	2,39	1,11
0	1,2	6	12	37,5	4	1492	233,30	0,66	0,25
0	1,2	6	12	37,5	8	1543	170,11	1,29	0,48
0	1,2	6	12	37,5	9	1554	133,93	1,46	0,51
0	1,2	6	12	37,5	10	1561	109,97	1,62	0,54
0	1,2	6	12	37,5	14	1489	140,09	2,15	0,79
0	1,2	6	12	37,5	19	1288	312,44	2,51	1,35
453	0,16	4	12	37,5	2	495	289,40	0,07	0,17
453	0,16	4	12	37,5	3	566	330,48	0,21	0,15
453	0,16	4	12	37,5	5	695	410,01	0,48	0,16
453	0,16	4	12	37,5	6	750	447,89	0,62	0,14
453	0,16	4	12	37,5	7	793	470,41	0,76	0,17

Kn (kPa/mm)	σ_n0 (MPa)	JRC	σ_c (MPa)	ϕ_b (grau)	δh (mm)	τ_h (kPa)	Desvio (kPa)	δv (mm)	Desvio (mm)
453	0,16	4	12	37,5	14	635	162,53	1,47	0,02
453	0,3	4	12	37,5	5	799	305,87	0,48	0,15
453	0,3	4	12	37,5	8	939	353,96	0,90	0,06
453	0,56	4	12	37,5	4	938	153,11	0,34	0,10
453	0,56	4	12	37,5	5	998	163,94	0,48	0,07
453	0,56	4	12	37,5	7	1107	201,53	0,76	0,02
453	0,56	4	12	37,5	10	1188	215,81	1,15	0,16
453	0,56	4	12	37,5	14	1051	92,13	1,47	0,29
453	0,56	4	12	37,5	15	1006	88,54	1,52	0,34
453	0,56	4	12	37,5	17	958	160,52	1,61	0,45
453	0,56	4	12	37,5	19	968	279,74	1,70	0,65
453	1,1	4	12	37,5	14	1563	149,56	1,47	0,46
453	1,63	4	12	37,5	8	1964	126,43	0,90	0,32
453	1,63	4	12	37,5	14	1896	174,80	1,47	0,68
453	2,43	4	12	37,5	12	2437	175,60	1,33	1,05
453	2,43	4	12	37,5	17	2349	158,44	1,61	1,34
453	2,43	4	12	37,5	19	2315	54,25	1,70	1,46
453	0,3	6	12	37,5	1	528	192,99	0,21	0,32
453	0,3	6	12	37,5	7	904	13,54	1,03	0,24
453	0,3	6	12	37,5	8	939	24,84	1,18	0,28
453	0,3	6	12	37,5	12	881	231,82	1,74	0,27
453	0,3	6	12	37,5	19	745	609,73	2,27	0,56
453	0,3	6	12	37,5	21	804	612,51	2,38	0,65
453	0,3	6	12	37,5	25	961	535,39	2,57	0,80
453	0,56	6	12	37,5	10	1188	396,39	1,48	0,01
453	0,56	6	12	37,5	11	1177	497,51	1,62	0,00
453	0,56	6	12	37,5	12	1147	598,90	1,74	0,01
453	0,56	6	12	37,5	15	1006	818,76	2,02	0,03
453	0,56	6	12	37,5	19	968	956,56	2,27	0,11
453	0,56	6	12	37,5	20	990	930,87	2,33	0,12
453	0,56	6	12	37,5	23	1089	843,51	2,47	0,13
453	0,56	6	12	37,5	24	1129	775,35	2,52	0,12
453	1,2	6	12	37,5	9	1663	445,29	1,34	0,62
453	1,2	6	12	37,5	16	1572	577,61	2,10	1,00
453	0,16	8	12	37,5	4	633	22,98	0,71	0,43
453	0,16	8	12	37,5	10	814	470,64	1,51	1,09
453	0,3	8	12	37,5	5	799	107,73	0,83	0,48
453	0,3	8	12	37,5	12	881	381,82	1,83	0,74
453	0,3	8	12	37,5	14	781	357,65	2,13	0,55
453	0,3	8	12	37,5	19	745	4,83	2,68	0,18
453	0,56	8	12	37,5	3	875	376,93	0,60	0,08
453	0,56	8	12	37,5	17	958	219,48	2,49	0,19
453	1,1	8	12	37,5	1	1435	463,28	0,39	0,38

Kn (kPa/mm)	σ_n (MPa)	JRC	σ_c (MPa)	ϕ_b (grau)	δh (mm)	τ_h (kPa)	Desvio (kPa)	δv (mm)	Desvio (mm)
453	1,1	8	12	37,5	11	1614	394,12	1,67	0,14
453	1,63	8	12	37,5	6	1987	437,13	0,94	0,25
453	1,63	8	12	37,5	8	1964	453,57	1,21	0,32
453	1,63	8	12	37,5	11	1933	313,49	1,67	0,55
453	1,63	8	12	37,5	13	1909	147,82	1,99	0,81
453	2,43	8	12	37,5	2	2617	77,35	0,50	0,39
453	2,43	8	12	37,5	6	2545	462,23	0,94	0,62
453	2,43	8	12	37,5	13	2420	119,54	1,99	1,68
453	2,43	8	12	37,5	15	2384	256,88	2,26	2,05
453	0,3	13	12	37,5	3	668	419,72	0,85	0,03
453	0,3	13	12	37,5	6	856	670,76	0,88	0,96
453	0,3	13	12	37,5	14	781	190,15	1,08	1,41
453	0,56	13	12	37,5	3	875	477,93	0,85	0,05
453	0,56	13	12	37,5	11	1177	57,49	0,96	0,71
453	0,56	13	12	37,5	13	1102	78,87	1,03	0,55
453	1,63	13	12	37,5	8	1964	331,57	0,90	0,06
453	1,63	13	12	37,5	11	1933	53,49	0,96	0,06
453	2,43	13	12	37,5	2	2617	22,35	0,84	0,71
453	2,43	13	12	37,5	11	2455	107,26	0,96	0,34
453	2,43	13	12	37,5	13	2420	278,54	1,03	0,50
453	0,56	2	20	32	2	1298	836,20	-0,35	0,23
453	0,56	2	20	32	3	1369	933,59	-0,23	0,18
453	0,56	2	20	32	4	1438	1015,31	-0,11	0,11
453	0,56	2	20	32	5	1503	1092,46	-0,01	0,03
453	0,56	2	20	32	6	1560	1149,45	0,09	0,03
453	1,1	2	20	32	3	1070	309,20	-0,23	0,23
453	1,1	2	20	32	4	1120	381,58	-0,11	0,14
453	1,63	2	20	32	3	825	199,82	-0,23	0,10
453	1,63	2	20	32	5	816	218,64	-0,01	0,07
453	2,16	2	20	32	6	1035	80,16	0,09	0,26
453	2,16	2	20	32	7	1018	61,78	0,16	0,35
453	2,16	2	20	32	10	969	52,76	0,25	0,45
453	2,69	2	20	32	4	1416	137,09	-0,11	0,18
453	2,69	2	20	32	5	1398	117,08	-0,01	0,28
453	2,69	2	20	32	7	1362	46,04	0,16	0,45
0	1	9	27,5	37	2	865	341,24	0,43	0,33
133,33	1	9	27,5	37	2	893	393,01	0,41	0,31
1033,33	1	9	27,5	37	1	997	278,54	0,21	0,27
315	1	14	90	35	1	3359	324,52	1,23	0,78
7515	1	20	90	35	4	5456	399,96	1,09	0,11
7515	1	20	90	35	8	6243	410,22	1,09	0,07
0	0,05	12	3,5	30	0,7	-450	479,80	0,75	0,74
0	0,05	12	3,5	30	8,75	77	23,09	0,96	0,07

Kn (kPa/mm)	σ_{n0} (MPa)	JRC	σ_c (MPa)	ϕ_b (grau)	δh (mm)	τ_h (kPa)	Desvio (kPa)	δv (mm)	Desvio (mm)
0	0,05	12	3,5	30	17,5	233	183,11	1,91	0,15
0	0,1	12	3,5	30	3,75	-186	284,16	0,82	0,98
0	0,1	12	3,5	30	7,5	59	40,81	0,91	0,63
0	0,1	12	3,5	30	15	219	125,34	1,52	0,47
453	0,8	8	21,5	35,5	2,6209	1346	57,25	0,44	0,04
453	0,8	8	21,5	35,5	9,7616	1732	253,15	1,05	0,49
453	0,8	8	21,5	35,5	11,557	1693	339,86	1,20	0,37
453	0,8	8	21,5	35,5	16,927	1253	160,53	1,60	0,15

Tabela B.6 – Desvios absolutos do modelo neuro-fuzzy ANFIS com quatro variáveis de entrada utilizando a técnica da repartição em grades

Kn (kPa/mm)	σ_{n0} (MPa)	JRC	σ_c (MPa)	ϕ_b (grau)	δh (mm)	τ_h (kPa)	Desvio (kPa)	δv (mm)	Desvio (mm)
0	0,16	4	12	37,5	2	204	10,42	0,23	0,09
0	0,16	4	12	37,5	5	187	22,72	0,53	0,25
0	0,16	4	12	37,5	6	183	35,86	0,63	0,32
0	0,16	4	12	37,5	7	179	39,39	0,73	0,40
0	0,16	4	12	37,5	8	177	45,86	0,84	0,45
0	0,3	4	12	37,5	3	383	27,59	0,33	0,12
0	0,3	4	12	37,5	8	471	94,42	0,84	0,33
0	0,3	4	12	37,5	10	500	132,04	1,08	0,37
0	0,3	4	12	37,5	11	510	133,28	1,20	0,38
0	0,3	4	12	37,5	12	513	149,27	1,30	0,40
0	0,3	4	12	37,5	13	509	157,05	1,38	0,45
0	0,56	4	12	37,5	5	759	103,64	0,53	0,11
0	0,56	4	12	37,5	14	717	90,89	1,42	0,30
0	0,56	4	12	37,5	17	748	209,17	1,31	0,54
0	0,56	4	12	37,5	19	809	374,29	1,26	0,47
0	1,1	4	12	37,5	2	1046	126,16	0,23	0,05
0	1,1	4	12	37,5	11	1258	8,96	1,20	0,10
0	1,63	4	12	37,5	1	1317	248,85	0,11	0,03
0	1,63	4	12	37,5	5	1927	144,40	0,53	0,08
0	1,63	4	12	37,5	17	1582	101,89	1,31	0,22
0	2,43	4	12	37,5	3	2365	97,52	0,33	0,16
0	2,43	4	12	37,5	7	2396	26,76	0,73	0,29
0	2,43	4	12	37,5	13	2095	47,35	1,38	0,68
0	0,3	6	12	37,5	2	364	45,23	0,41	0,15
0	0,3	6	12	37,5	13	509	43,75	2,95	0,35
0	0,56	6	12	37,5	7	745	90,89	1,65	0,14
0	0,56	6	12	37,5	10	690	151,06	2,35	0,20
0	0,56	6	12	37,5	13	705	142,34	2,95	0,20
0	0,56	6	12	37,5	17	748	65,63	3,74	0,23
0	1,2	6	12	37,5	4	1462	262,75	0,90	0,00
0	1,2	6	12	37,5	8	1599	113,71	1,89	0,13
0	1,2	6	12	37,5	9	1572	115,67	2,13	0,16
0	1,2	6	12	37,5	10	1557	113,58	2,35	0,18
0	1,2	6	12	37,5	14	1637	7,84	3,14	0,20
0	1,2	6	12	37,5	19	1232	367,79	4,22	0,36
453	0,16	4	12	37,5	2	457	251,21	0,20	0,03
453	0,16	4	12	37,5	3	588	352,84	0,30	0,06
453	0,16	4	12	37,5	5	795	510,31	0,50	0,14
453	0,16	4	12	37,5	6	857	554,81	0,59	0,17
453	0,16	4	12	37,5	7	883	560,40	0,68	0,25

Kn (kPa/mm)	σ_{n0} (MPa)	JRC	σ_c (MPa)	ϕ_b (grau)	δh (mm)	τ_h (kPa)	Desvio (kPa)	δv (mm)	Desvio (mm)
453	0,16	4	12	37,5	14	595	122,27	1,19	0,25
453	0,3	4	12	37,5	5	973	480,12	0,50	0,14
453	0,3	4	12	37,5	8	1152	567,38	0,77	0,19
453	0,56	4	12	37,5	4	1194	409,16	0,40	0,05
453	0,56	4	12	37,5	5	1305	470,95	0,50	0,06
453	0,56	4	12	37,5	7	1410	504,81	0,68	0,06
453	0,56	4	12	37,5	10	1353	381,34	0,96	0,03
453	0,56	4	12	37,5	14	1323	363,77	1,19	0,01
453	0,56	4	12	37,5	15	1351	433,29	1,19	0,01
453	0,56	4	12	37,5	17	1447	650,46	1,10	0,07
453	0,56	4	12	37,5	19	1590	901,57	0,94	0,11
453	1,1	4	12	37,5	14	1641	227,99	1,19	0,18
453	1,63	4	12	37,5	8	2178	339,50	0,77	0,19
453	1,63	4	12	37,5	14	1863	141,81	1,19	0,40
453	2,43	4	12	37,5	12	2408	204,70	1,11	0,83
453	2,43	4	12	37,5	17	1695	812,33	1,10	0,82
453	2,43	4	12	37,5	19	3672	1303,17	0,94	0,70
453	0,3	6	12	37,5	1	400	64,59	-0,04	0,08
453	0,3	6	12	37,5	7	1125	207,64	0,87	0,39
453	0,3	6	12	37,5	8	1152	188,58	1,00	0,47
453	0,3	6	12	37,5	12	1086	27,03	1,50	0,52
453	0,3	6	12	37,5	19	1125	230,23	2,60	0,23
453	0,3	6	12	37,5	21	1238	179,08	2,86	0,17
453	0,3	6	12	37,5	25	1507	11,34	3,13	0,24
453	0,56	6	12	37,5	10	1353	230,86	1,24	0,23
453	0,56	6	12	37,5	11	1326	348,65	1,36	0,25
453	0,56	6	12	37,5	12	1311	435,18	1,50	0,24
453	0,56	6	12	37,5	15	1351	474,01	1,95	0,11
453	0,56	6	12	37,5	19	1590	334,73	2,60	0,22
453	0,56	6	12	37,5	20	1672	248,96	2,74	0,30
453	0,56	6	12	37,5	23	1909	24,44	3,03	0,43
453	0,56	6	12	37,5	24	1976	72,17	3,08	0,44
453	1,2	6	12	37,5	9	1979	128,54	1,12	0,40
453	1,2	6	12	37,5	16	1794	355,81	2,11	1,02
453	0,16	8	12	37,5	4	703	93,50	0,75	0,39
453	0,16	8	12	37,5	10	798	487,38	1,64	0,96
453	0,3	8	12	37,5	5	973	66,52	0,96	0,35
453	0,3	8	12	37,5	12	1086	177,03	1,84	0,73
453	0,3	8	12	37,5	14	1051	88,31	2,03	0,65
453	0,3	8	12	37,5	19	1125	374,67	1,87	0,63
453	0,56	8	12	37,5	3	1050	202,20	0,53	0,15
453	0,56	8	12	37,5	17	1447	270,46	2,12	0,18
453	1,1	8	12	37,5	1	1114	142,14	0,06	0,04

Kn (kPa/mm)	σ_0 (MPa)	JRC	σ_c (MPa)	ϕ_b (grau)	δh (mm)	τ_h (kPa)	Desvio (kPa)	δv (mm)	Desvio (mm)
453	1,1	8	12	37,5	11	1682	326,15	1,74	0,21
453	1,63	8	12	37,5	6	2306	117,73	1,13	0,44
453	1,63	8	12	37,5	8	2178	240,50	1,42	0,53
453	1,63	8	12	37,5	11	1959	287,00	1,74	0,62
453	1,63	8	12	37,5	13	1904	152,93	1,94	0,76
453	2,43	8	12	37,5	2	2307	387,05	0,30	0,19
453	2,43	8	12	37,5	6	3122	114,62	1,13	0,81
453	2,43	8	12	37,5	13	2316	16,40	1,94	1,63
453	2,43	8	12	37,5	15	1913	214,10	2,10	1,88
453	0,3	13	12	37,5	3	712	375,93	0,66	0,23
453	0,3	13	12	37,5	6	1066	461,18	1,24	0,60
453	0,3	13	12	37,5	14	1051	79,19	1,26	1,23
453	0,56	13	12	37,5	3	1050	303,20	0,66	0,14
453	0,56	13	12	37,5	11	1326	206,35	1,57	0,11
453	0,56	13	12	37,5	13	1310	286,54	1,41	0,17
453	1,63	13	12	37,5	8	2178	118,50	1,47	0,63
453	1,63	13	12	37,5	11	1959	27,00	1,57	0,66
453	2,43	13	12	37,5	2	2307	332,05	0,41	0,28
453	2,43	13	12	37,5	11	2459	111,37	1,57	0,94
453	2,43	13	12	37,5	13	2316	175,40	1,41	0,88
453	0,56	2	20	32	2	498	36,35	-0,16	0,04
453	0,56	2	20	32	3	619	183,24	-0,16	0,11
453	0,56	2	20	32	4	699	276,43	-0,14	0,13
453	0,56	2	20	32	5	727	317,39	-0,09	0,11
453	0,56	2	20	32	6	697	287,15	-0,05	0,10
453	1,1	2	20	32	3	813	51,51	-0,16	0,17
453	1,1	2	20	32	4	852	113,08	-0,14	0,17
453	1,63	2	20	32	3	1018	6,52	-0,16	0,04
453	1,63	2	20	32	5	1060	25,11	-0,09	0,02
453	2,16	2	20	32	6	1139	23,72	-0,05	0,13
453	2,16	2	20	32	7	1054	25,90	-0,03	0,16
453	2,16	2	20	32	10	911	111,08	-0,01	0,19
453	2,69	2	20	32	4	1496	56,53	-0,14	0,15
453	2,69	2	20	32	5	1457	58,44	-0,09	0,20
453	2,69	2	20	32	7	1349	58,88	-0,03	0,26
0	1	9	27,5	37	2	1153	53,10	0,10	0,00
133,33	1	9	27,5	37	2	1249	36,55	0,10	0,00
1033,33	1	9	27,5	37	1	1382	105,73	-0,04	0,02
315	1	14	90	35	1	3809	124,91	0,50	0,05
7515	1	20	90	35	4	5580	275,67	0,97	0,02
7515	1	20	90	35	8	6543	109,69	1,12	0,04
0	0,05	12	3,5	30	0,7	33	2,68	-0,10	0,10
0	0,05	12	3,5	30	8,75	59	5,08	0,67	0,22

Kn (kPa/mm)	σ_n0 (MPa)	JRC	σ_c (MPa)	ϕ_b (grau)	δh (mm)	τ_h (kPa)	Desvio (kPa)	δv (mm)	Desvio (mm)
0	0,05	12	3,5	30	17,5	48	1,98	1,50	0,26
0	0,1	12	3,5	30	3,75	84	14,73	0,09	0,25
0	0,1	12	3,5	30	7,5	101	1,14	0,50	0,22
0	0,1	12	3,5	30	15	97	2,62	1,34	0,29
453	0,8	8	21,5	35,5	2,6209	1305	16,08	0,50	0,01
453	0,8	8	21,5	35,5	9,7616	1490	10,69	1,54	0,00
453	0,8	8	21,5	35,5	11,557	1391	38,10	1,55	0,01
453	0,8	8	21,5	35,5	16,927	1075	17,02	1,49	0,04

Tabela B.7 – Desvios absolutos do modelo neuro-fuzzy ANFIS com seis variáveis de entrada utilizando a técnica de agrupamento subtrativo

Kn (kPa/mm)	σ_{n0} (MPa)	JRC	σ_c (MPa)	ϕ_b (grau)	δh (mm)	τ_h (kPa)	Desvio (kPa)	δv (mm)	Desvio (mm)
0	0,16	4	12	37,5	2	-118	311,43	0,32	0,00
0	0,16	4	12	37,5	5	104	106,32	0,85	0,06
0	0,16	4	12	37,5	6	167	51,73	1,04	0,09
0	0,16	4	12	37,5	7	220	1,73	1,23	0,10
0	0,16	4	12	37,5	8	261	38,47	1,43	0,14
0	0,3	4	12	37,5	3	71	284,99	0,40	0,06
0	0,3	4	12	37,5	8	377	0,72	1,28	0,10
0	0,3	4	12	37,5	10	414	45,64	1,66	0,21
0	0,3	4	12	37,5	11	407	30,29	1,84	0,26
0	0,3	4	12	37,5	12	389	24,52	2,02	0,32
0	0,3	4	12	37,5	13	368	16,74	2,19	0,36
0	0,56	4	12	37,5	5	555	100,21	0,49	0,16
0	0,56	4	12	37,5	14	682	55,22	1,92	0,21
0	0,56	4	12	37,5	17	659	120,48	2,39	0,54
0	0,56	4	12	37,5	19	738	302,69	2,66	0,94
0	1,1	4	12	37,5	2	984	188,46	0,08	0,10
0	1,1	4	12	37,5	11	1324	57,20	1,21	0,11
0	1,63	4	12	37,5	1	1657	589,18	-0,24	0,33
0	1,63	4	12	37,5	5	1653	130,21	0,41	0,04
0	1,63	4	12	37,5	17	1462	18,03	1,56	0,47
0	2,43	4	12	37,5	3	2348	115,19	0,24	0,06
0	2,43	4	12	37,5	7	2259	110,44	0,45	0,01
0	2,43	4	12	37,5	13	2119	70,72	0,63	0,07
0	0,3	6	12	37,5	2	416	6,61	0,65	0,40
0	0,3	6	12	37,5	13	684	218,70	3,08	0,22
0	0,56	6	12	37,5	7	1115	279,63	1,27	0,24
0	0,56	6	12	37,5	10	1192	350,29	1,85	0,29
0	0,56	6	12	37,5	13	1063	215,87	2,50	0,26
0	0,56	6	12	37,5	17	902	88,74	3,32	0,19
0	1,2	6	12	37,5	4	1537	187,89	0,63	0,27
0	1,2	6	12	37,5	8	1704	9,34	1,26	0,51
0	1,2	6	12	37,5	9	1729	40,54	1,41	0,55
0	1,2	6	12	37,5	10	1743	72,46	1,56	0,60
0	1,2	6	12	37,5	14	1662	32,68	2,11	0,83
0	1,2	6	12	37,5	19	1434	166,08	2,54	1,32
453	0,16	4	12	37,5	2	233	27,14	0,16	0,07
453	0,16	4	12	37,5	3	311	75,63	0,33	0,03
453	0,16	4	12	37,5	5	451	166,34	0,65	0,01
453	0,16	4	12	37,5	6	510	208,32	0,80	0,04
453	0,16	4	12	37,5	7	557	234,42	0,93	0,00

Kn (kPa/mm)	σ_{n0} (MPa)	JRC	σ_c (MPa)	ϕ_b (grau)	δh (mm)	τ_h (kPa)	Desvio (kPa)	δv (mm)	Desvio (mm)
453	0,16	4	12	37,5	14	510	37,24	1,21	0,23
453	0,3	4	12	37,5	5	565	71,80	0,54	0,09
453	0,3	4	12	37,5	8	708	122,81	0,94	0,02
453	0,56	4	12	37,5	4	834	49,95	0,25	0,20
453	0,56	4	12	37,5	5	904	70,03	0,38	0,18
453	0,56	4	12	37,5	7	1022	116,94	0,63	0,11
453	0,56	4	12	37,5	10	1092	119,88	1,01	0,02
453	0,56	4	12	37,5	14	937	22,46	1,30	0,12
453	0,56	4	12	37,5	15	903	14,92	1,31	0,13
453	0,56	4	12	37,5	17	900	103,36	1,28	0,12
453	0,56	4	12	37,5	19	977	288,55	1,28	0,23
453	1,1	4	12	37,5	14	1479	65,97	1,01	0,00
453	1,63	4	12	37,5	8	1774	64,01	0,64	0,06
453	1,63	4	12	37,5	14	1664	57,08	0,35	0,44
453	2,43	4	12	37,5	12	2251	362,49	0,01	0,27
453	2,43	4	12	37,5	17	2129	377,92	-0,24	0,51
453	2,43	4	12	37,5	19	2080	288,96	-0,29	0,53
453	0,3	6	12	37,5	1	620	284,80	0,28	0,40
453	0,3	6	12	37,5	7	1057	139,44	1,42	0,15
453	0,3	6	12	37,5	8	1087	123,86	1,58	0,11
453	0,3	6	12	37,5	12	982	130,89	2,00	0,01
453	0,3	6	12	37,5	19	978	376,74	2,46	0,37
453	0,3	6	12	37,5	21	1110	306,52	2,70	0,32
453	0,3	6	12	37,5	25	1413	83,18	3,25	0,12
453	0,56	6	12	37,5	10	1472	111,88	1,60	0,14
453	0,56	6	12	37,5	11	1439	235,81	1,75	0,14
453	0,56	6	12	37,5	12	1381	364,71	1,89	0,16
453	0,56	6	12	37,5	15	1176	648,89	2,15	0,09
453	0,56	6	12	37,5	19	1194	730,96	2,29	0,09
453	0,56	6	12	37,5	20	1247	674,40	2,34	0,10
453	0,56	6	12	37,5	23	1450	483,19	2,60	0,00
453	0,56	6	12	37,5	24	1525	379,13	2,71	0,07
453	1,2	6	12	37,5	9	1954	154,24	1,15	0,44
453	1,2	6	12	37,5	16	1738	411,61	1,42	0,32
453	0,16	8	12	37,5	4	776	166,21	1,19	0,05
453	0,16	8	12	37,5	10	1056	228,56	2,33	0,27
453	0,3	8	12	37,5	5	979	72,09	1,27	0,03
453	0,3	8	12	37,5	12	1136	127,36	2,54	0,03
453	0,3	8	12	37,5	14	1063	76,43	2,83	0,15
453	0,3	8	12	37,5	19	1177	426,84	3,49	0,99
453	0,56	8	12	37,5	3	1165	87,36	0,57	0,12
453	0,56	8	12	37,5	17	1333	156,33	2,92	0,63
453	1,1	8	12	37,5	1	1523	551,06	-0,04	0,06

Kn (kPa/mm)	σ_n (MPa)	JRC	σ_c (MPa)	ϕ_b (grau)	δh (mm)	τ_h (kPa)	Desvio (kPa)	δv (mm)	Desvio (mm)
453	1,1	8	12	37,5	11	2109	100,64	1,52	0,02
453	1,63	8	12	37,5	6	2126	298,49	0,85	0,15
453	1,63	8	12	37,5	8	2137	280,70	1,04	0,14
453	1,63	8	12	37,5	11	2120	126,44	1,17	0,05
453	1,63	8	12	37,5	13	2084	27,42	1,20	0,03
453	2,43	8	12	37,5	2	2653	41,21	0,20	0,09
453	2,43	8	12	37,5	6	2581	426,09	0,32	0,00
453	2,43	8	12	37,5	13	2425	124,80	0,41	0,10
453	2,43	8	12	37,5	15	2376	248,60	0,42	0,21
453	0,3	13	12	37,5	3	1010	78,23	1,26	0,37
453	0,3	13	12	37,5	6	1020	506,89	1,51	0,33
453	0,3	13	12	37,5	14	1086	114,48	2,53	0,04
453	0,56	13	12	37,5	3	1250	102,59	0,89	0,09
453	0,56	13	12	37,5	11	1291	171,18	1,58	0,10
453	0,56	13	12	37,5	13	1307	283,58	1,78	0,20
453	1,63	13	12	37,5	8	2069	226,86	0,65	0,19
453	1,63	13	12	37,5	11	2080	94,30	0,83	0,07
453	2,43	13	12	37,5	2	2679	40,16	0,40	0,27
453	2,43	13	12	37,5	11	2647	299,18	0,56	0,06
453	2,43	13	12	37,5	13	2622	481,05	0,59	0,06
453	0,56	2	20	32	2	373	88,77	0,05	0,17
453	0,56	2	20	32	3	411	25,38	0,06	0,11
453	0,56	2	20	32	4	432	8,77	0,07	0,08
453	0,56	2	20	32	5	438	27,70	0,08	0,05
453	0,56	2	20	32	6	432	21,62	0,09	0,03
453	1,1	2	20	32	3	821	60,19	0,00	0,00
453	1,1	2	20	32	4	835	95,90	0,01	0,03
453	1,63	2	20	32	3	963	62,12	-0,08	0,04
453	1,63	2	20	32	5	971	63,67	-0,06	0,01
453	2,16	2	20	32	6	1059	56,19	-0,16	0,02
453	2,16	2	20	32	7	1045	34,57	-0,15	0,04
453	2,16	2	20	32	10	1025	2,72	-0,13	0,08
453	2,69	2	20	32	4	1415	137,57	-0,26	0,03
453	2,69	2	20	32	5	1394	121,11	-0,26	0,03
453	2,69	2	20	32	7	1352	56,21	-0,24	0,05
0	1	9	27,5	37	2	1067	138,80	0,23	0,13
133,33	1	9	27,5	37	2	1104	181,69	0,21	0,12
1033,33	1	9	27,5	37	1	1238	38,14	0,13	0,19
315	1	14	90	35	1	4436	751,52	0,93	0,47
7515	1	20	90	35	4	5355	500,99	0,86	0,13
7515	1	20	90	35	8	5721	931,65	1,04	0,13
0	0,05	12	3,5	30	0,7	76	45,95	-0,28	0,28
0	0,05	12	3,5	30	8,75	79	24,48	0,44	0,45

Kn (kPa/mm)	σ_{n0} (MPa)	JRC	σ_c (MPa)	ϕ_b (grau)	δh (mm)	τ_h (kPa)	Desvio (kPa)	δv (mm)	Desvio (mm)
0	0,05	12	3,5	30	17,5	81	31,65	1,15	0,61
0	0,1	12	3,5	30	3,75	77	21,37	0,02	0,18
0	0,1	12	3,5	30	7,5	78	21,82	0,34	0,06
0	0,1	12	3,5	30	15	80	13,49	0,95	0,10
453	0,8	8	21,5	35,5	2,6209	1249	39,67	0,51	0,02
453	0,8	8	21,5	35,5	9,7616	1641	161,80	1,55	0,01
453	0,8	8	21,5	35,5	11,557	1561	207,73	1,55	0,01
453	0,8	8	21,5	35,5	16,927	1000	92,43	1,43	0,03

Tabela B.8 – Desvios absolutos do modelo neuro-fuzzy ANFIS com seis variáveis de entrada utilizando a técnica da repartição em grades

Kn (kPa/mm)	σ_n (MPa)	JRC	σ_c (MPa)	ϕ_b (grau)	δh (mm)	τ_h (kPa)	Desvio (kPa)	δv (mm)	Desvio (mm)
0	0,16	4	12	37,5	2	195	1,26	0,34	0,02
0	0,16	4	12	37,5	5	259	48,88	0,80	0,02
0	0,16	4	12	37,5	6	275	56,17	0,96	0,01
0	0,16	4	12	37,5	7	286	67,78	1,13	0,01
0	0,16	4	12	37,5	8	293	70,54	1,29	0,00
0	0,3	4	12	37,5	3	320	35,32	0,45	0,01
0	0,3	4	12	37,5	8	402	25,63	1,21	0,04
0	0,3	4	12	37,5	10	402	33,50	1,51	0,06
0	0,3	4	12	37,5	11	393	15,95	1,64	0,06
0	0,3	4	12	37,5	12	377	13,09	1,76	0,06
0	0,3	4	12	37,5	13	356	4,42	1,86	0,03
0	0,56	4	12	37,5	5	687	31,97	0,61	0,04
0	0,56	4	12	37,5	14	668	42,16	1,60	0,12
0	0,56	4	12	37,5	17	579	39,84	1,66	0,19
0	0,56	4	12	37,5	19	519	83,75	1,60	0,12
0	1,1	4	12	37,5	2	1115	56,99	0,13	0,05
0	1,1	4	12	37,5	11	1263	3,89	1,10	0,01
0	1,63	4	12	37,5	1	1513	445,49	0,06	0,03
0	1,63	4	12	37,5	5	1748	35,37	0,42	0,03
0	1,63	4	12	37,5	17	1426	53,63	1,25	0,16
0	2,43	4	12	37,5	3	2260	202,51	0,20	0,02
0	2,43	4	12	37,5	7	2398	29,07	0,43	0,01
0	2,43	4	12	37,5	13	2036	11,60	0,71	0,00
0	0,3	6	12	37,5	2	445	35,21	0,44	0,19
0	0,3	6	12	37,5	13	476	11,43	3,22	0,09
0	0,56	6	12	37,5	7	883	46,84	1,54	0,03
0	0,56	6	12	37,5	10	898	56,57	2,24	0,09
0	0,56	6	12	37,5	13	870	23,06	2,89	0,14
0	0,56	6	12	37,5	17	842	28,22	3,64	0,14
0	1,2	6	12	37,5	4	1484	241,24	0,87	0,03
0	1,2	6	12	37,5	8	1761	47,85	1,71	0,06
0	1,2	6	12	37,5	9	1777	89,41	1,92	0,04
0	1,2	6	12	37,5	10	1774	103,44	2,14	0,02
0	1,2	6	12	37,5	14	1645	15,70	2,96	0,02
0	1,2	6	12	37,5	19	1626	25,72	3,69	0,16
453	0,16	4	12	37,5	2	99	106,55	0,22	0,02
453	0,16	4	12	37,5	3	183	52,06	0,40	0,04
453	0,16	4	12	37,5	5	329	44,14	0,72	0,08
453	0,16	4	12	37,5	6	389	87,19	0,86	0,10
453	0,16	4	12	37,5	7	438	115,47	0,99	0,06

Kn (kPa/mm)	σ_0 (MPa)	JRC	σ_c (MPa)	ϕ_b (grau)	δh (mm)	τ_h (kPa)	Desvio (kPa)	δv (mm)	Desvio (mm)
453	0,16	4	12	37,5	14	433	38,92	1,36	0,09
453	0,3	4	12	37,5	5	504	10,66	0,70	0,06
453	0,3	4	12	37,5	8	648	63,47	1,06	0,10
453	0,56	4	12	37,5	4	893	108,03	0,49	0,04
453	0,56	4	12	37,5	5	966	131,66	0,63	0,08
453	0,56	4	12	37,5	7	1076	170,90	0,86	0,12
453	0,56	4	12	37,5	10	1130	158,19	1,09	0,10
453	0,56	4	12	37,5	14	1001	41,20	1,13	0,05
453	0,56	4	12	37,5	15	946	27,94	1,11	0,07
453	0,56	4	12	37,5	17	832	34,93	1,05	0,11
453	0,56	4	12	37,5	19	733	44,21	0,99	0,06
453	1,1	4	12	37,5	14	1438	25,12	0,97	0,04
453	1,63	4	12	37,5	8	1931	92,92	0,61	0,03
453	1,63	4	12	37,5	14	1653	67,92	0,82	0,03
453	2,43	4	12	37,5	12	2513	99,82	0,27	0,01
453	2,43	4	12	37,5	17	1971	536,27	0,01	0,26
453	2,43	4	12	37,5	19	1839	529,90	-0,18	0,42
453	0,3	6	12	37,5	1	270	64,65	-0,14	0,02
453	0,3	6	12	37,5	7	937	19,62	1,23	0,04
453	0,3	6	12	37,5	8	1025	61,46	1,43	0,03
453	0,3	6	12	37,5	12	1273	160,23	2,12	0,11
453	0,3	6	12	37,5	19	1395	40,09	2,83	0,00
453	0,3	6	12	37,5	21	1417	0,20	2,99	0,04
453	0,3	6	12	37,5	25	1499	2,97	3,32	0,04
453	0,56	6	12	37,5	10	1601	16,86	1,52	0,05
453	0,56	6	12	37,5	11	1647	28,03	1,65	0,03
453	0,56	6	12	37,5	12	1682	64,15	1,76	0,03
453	0,56	6	12	37,5	15	1737	87,77	2,02	0,04
453	0,56	6	12	37,5	19	1788	137,33	2,23	0,15
453	0,56	6	12	37,5	20	1810	110,65	2,28	0,16
453	0,56	6	12	37,5	23	1918	15,24	2,44	0,16
453	0,56	6	12	37,5	24	1967	62,73	2,50	0,14
453	1,2	6	12	37,5	9	2151	43,31	0,78	0,07
453	1,2	6	12	37,5	16	2242	91,86	0,96	0,13
453	0,16	8	12	37,5	4	832	222,55	1,14	0,00
453	0,16	8	12	37,5	10	1160	124,81	2,38	0,22
453	0,3	8	12	37,5	5	1076	168,86	1,32	0,02
453	0,3	8	12	37,5	12	1255	8,07	2,50	0,07
453	0,3	8	12	37,5	14	1161	22,36	2,66	0,02
453	0,3	8	12	37,5	19	882	131,82	2,92	0,42
453	0,56	8	12	37,5	3	1286	34,15	0,69	0,01
453	0,56	8	12	37,5	17	1275	98,44	2,32	0,02
453	1,1	8	12	37,5	1	1451	479,16	0,10	0,09

Kn (kPa/mm)	σ_n0 (MPa)	JRC	σ_c (MPa)	ϕ_b (grau)	δh (mm)	τ_h (kPa)	Desvio (kPa)	δv (mm)	Desvio (mm)
453	1,1	8	12	37,5	11	1964	44,00	1,53	0,01
453	1,63	8	12	37,5	6	2387	37,15	0,67	0,03
453	1,63	8	12	37,5	8	2383	34,65	0,86	0,03
453	1,63	8	12	37,5	11	2106	139,99	1,08	0,04
453	1,63	8	12	37,5	13	1855	202,29	1,16	0,02
453	2,43	8	12	37,5	2	2471	222,70	0,14	0,04
453	2,43	8	12	37,5	6	3049	41,95	0,29	0,03
453	2,43	8	12	37,5	13	2185	114,65	0,35	0,04
453	2,43	8	12	37,5	15	1982	145,05	0,27	0,05
453	0,3	13	12	37,5	3	920	167,63	0,98	0,09
453	0,3	13	12	37,5	6	1230	296,81	1,79	0,05
453	0,3	13	12	37,5	14	693	278,21	2,01	0,48
453	0,56	13	12	37,5	3	1228	125,06	0,70	0,09
453	0,56	13	12	37,5	11	1330	209,77	1,69	0,02
453	0,56	13	12	37,5	13	1051	28,14	1,49	0,09
453	1,63	13	12	37,5	8	2459	163,33	0,88	0,04
453	1,63	13	12	37,5	11	1936	49,86	0,91	0,01
453	2,43	13	12	37,5	2	2383	256,16	0,26	0,13
453	2,43	13	12	37,5	11	2245	102,79	0,64	0,01
453	2,43	13	12	37,5	13	1903	237,74	0,59	0,06
453	0,56	2	20	32	2	434	28,17	-0,08	0,04
453	0,56	2	20	32	3	393	42,90	-0,02	0,03
453	0,56	2	20	32	4	372	50,57	0,03	0,03
453	0,56	2	20	32	5	370	40,19	0,06	0,04
453	0,56	2	20	32	6	382	28,31	0,09	0,03
453	1,1	2	20	32	3	739	22,56	0,00	0,01
453	1,1	2	20	32	4	735	3,90	0,03	0,01
453	1,63	2	20	32	3	1012	13,11	-0,07	0,05
453	1,63	2	20	32	5	1026	8,79	-0,06	0,01
453	2,16	2	20	32	6	1252	136,96	-0,21	0,03
453	2,16	2	20	32	7	1186	105,71	-0,21	0,02
453	2,16	2	20	32	10	1165	142,73	-0,21	0,00
453	2,69	2	20	32	4	1481	72,39	-0,27	0,02
453	2,69	2	20	32	5	1490	25,45	-0,28	0,01
453	2,69	2	20	32	7	1385	23,08	-0,28	0,01
0	1	9	27,5	37	2	1147	59,45	0,11	0,01
133,33	1	9	27,5	37	2	1235	50,93	0,10	0,01
1033,33	1	9	27,5	37	1	1321	45,23	0,01	0,07
315	1	14	90	35	1	3821	137,44	0,52	0,07
7515	1	20	90	35	4	5658	197,73	0,95	0,03
7515	1	20	90	35	8	6509	143,67	1,13	0,04
0	0,05	12	3,5	30	0,7	45	15,25	-0,15	0,15
0	0,05	12	3,5	30	8,75	105	51,14	0,43	0,46

Kn (kPa/mm)	σ_{n0} (MPa)	JRC	σ_c (MPa)	ϕ_b (grau)	δh (mm)	τ_h (kPa)	Desvio (kPa)	δv (mm)	Desvio (mm)
0	0,05	12	3,5	30	17,5	86	36,14	1,25	0,50
0	0,1	12	3,5	30	3,75	76	21,99	0,01	0,17
0	0,1	12	3,5	30	7,5	101	1,45	0,30	0,03
0	0,1	12	3,5	30	15	94	0,03	1,06	0,01
453	0,8	8	21,5	35,5	2,6209	1280	9,36	0,51	0,03
453	0,8	8	21,5	35,5	9,7616	1563	84,18	1,57	0,03
453	0,8	8	21,5	35,5	11,557	1431	77,68	1,61	0,04
453	0,8	8	21,5	35,5	16,927	1038	53,64	1,41	0,04

APÊNDICE D – REGRAS DE INFERÊNCIA FUZZY PARA DETERMINAÇÃO DE τ_h e δ_v PELO MODELO NEURO-FUZZY DO TIPO ANFIS

REGRAS DE INFERÊNCIA FUZZY PARA DETERMINAÇÃO DE τ_h

1. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Baixo) e (dh(mm) é Baixo) então (th(kPa) é Saída1) (1)
2. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Baixo) e (dh(mm) é Alto) então (th(kPa) é Saída2) (1)
3. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Baixo) então (th(kPa) é Saída3) (1)
4. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Alto) então (th(kPa) é Saída4) (1)
5. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc(MPa) é Alta) e (fb(o) é Baixo) e (dh(mm) é Baixo) então (th(kPa) é Saída5) (1)
6. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc(MPa) é Alta) e (fb(o) é Baixo) e (dh(mm) é Alto) então (th(kPa) é Saída6) (1)
7. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc(MPa) é Alta) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Baixo) então (th(kPa) é Saída7) (1)
8. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc(MPa) é Alta) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Alto) então (th(kPa) é Saída8) (1)
9. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Baixo) e (dh(mm) é Baixo) então (th(kPa) é Saída9) (1)
10. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Baixo) e (dh(mm) é Alto) então (th(kPa) é Saída10) (1)
11. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Baixo) então (th(kPa) é Saída11) (1)
12. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Alto) então (th(kPa) é Saída12) (1)
13. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc(MPa) é Alta) e (fb(o) é Baixo) e (dh(mm) é Baixo) então (th(kPa) é Saída13) (1)
14. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc(MPa) é Alta) e (fb(o) é Baixo) e (dh(mm) é Alto) então (th(kPa) é Saída14) (1)
15. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc(MPa) é Alta) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Baixo) então (th(kPa) é Saída15) (1)
16. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc(MPa) é Alta) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Alto) então (th(kPa) é Saída16) (1)

17. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Baixo) e (dh(mm) é Baixo) então (th(kPa) é Saída17) (1)
18. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Baixo) e (dh(mm) é Alto) então (th(kPa) é Saída18) (1)
19. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Baixo) então (th(kPa) é Saída19) (1)
20. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Alto) então (th(kPa) é Saída20) (1)
21. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc(MPa) é Alta) e (fb(o) é Baixo) e (dh(mm) é Baixo) então (th(kPa) é Saída21) (1)
22. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc(MPa) é Alta) e (fb(o) é Baixo) e (dh(mm) é Alto) então (th(kPa) é Saída22) (1)
23. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc(MPa) é Alta) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Baixo) então (th(kPa) é Saída23) (1)
24. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc(MPa) é Alta) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Alto) então (th(kPa) é Saída24) (1)
25. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Alta) e (JRC é Alto) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Baixo) e (dh(mm) é Baixo) então (th(kPa) é Saída25) (1)
26. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Alta) e (JRC é Alto) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Baixo) e (dh(mm) é Alto) então (th(kPa) é Saída26) (1)
27. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Alta) e (JRC é Alto) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Baixo) então (th(kPa) é Saída27) (1)
28. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Alta) e (JRC é Alto) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Alto) então (th(kPa) é Saída28) (1)
29. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Alta) e (JRC é Alto) e (sc(MPa) é Alta) e (fb(o) é Baixo) e (dh(mm) é Baixo) então (th(kPa) é Saída29) (1)
30. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Alta) e (JRC é Alto) e (sc(MPa) é Alta) e (fb(o) é Baixo) e (dh(mm) é Alto) então (th(kPa) é Saída30) (1)
31. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Alta) e (JRC é Alto) e (sc(MPa) é Alta) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Baixo) então (th(kPa) é Saída31) (1)
32. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Alta) e (JRC é Alto) e (sc(MPa) é Alta) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Alto) então (th(kPa) é Saída32) (1)
33. Se (kn(kPa/mm) é Alta) e (sn0(MPa) é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Baixo) e (dh(mm) é Baixo) então (th(kPa) é Saída33) (1)
34. Se (kn(kPa/mm) é Alta) e (sn0(MPa) é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Baixo) e (dh(mm) é Alto) então (th(kPa) é Saída34) (1)
35. Se (kn(kPa/mm) é Alta) e (sn0(MPa) é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Baixo) então (th(kPa) é Saída35) (1)

36. Se (kn(kPa/mm) é Alta) e (sn0(MPa) é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Alto) então (th(kPa) é Saída36) (1)
37. Se (kn(kPa/mm) é Alta) e (sn0(MPa) é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc(MPa) é Alta) e (fb(o) é Baixo) e (dh(mm) é Baixo) então (th(kPa) é Saída37) (1)
38. Se (kn(kPa/mm) é Alta) e (sn0(MPa) é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc(MPa) é Alta) e (fb(o) é Baixo) e (dh(mm) é Alto) então (th(kPa) é Saída38) (1)
39. Se (kn(kPa/mm) é Alta) e (sn0(MPa) é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc(MPa) é Alta) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Baixo) então (th(kPa) é Saída39) (1)
40. Se (kn(kPa/mm) é Alta) e (sn0(MPa) é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc(MPa) é Alta) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Alto) então (th(kPa) é Saída40) (1)
41. Se (kn(kPa/mm) é Alta) e (sn0(MPa) é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Baixo) e (dh(mm) é Baixo) então (th(kPa) é Saída41) (1)
42. Se (kn(kPa/mm) é Alta) e (sn0(MPa) é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Baixo) e (dh(mm) é Alto) então (th(kPa) é Saída42) (1)
43. Se (kn(kPa/mm) é Alta) e (sn0(MPa) é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Baixo) então (th(kPa) é Saída43) (1)
44. Se (kn(kPa/mm) é Alta) e (sn0(MPa) é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Alto) então (th(kPa) é Saída44) (1)
45. Se (kn(kPa/mm) é Alta) e (sn0(MPa) é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc(MPa) é Alta) e (fb(o) é Baixo) e (dh(mm) é Baixo) então (th(kPa) é Saída45) (1)
46. Se (kn(kPa/mm) é Alta) e (sn0(MPa) é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc(MPa) é Alta) e (fb(o) é Baixo) e (dh(mm) é Alto) então (th(kPa) é Saída46) (1)
47. Se (kn(kPa/mm) é Alta) e (sn0(MPa) é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc(MPa) é Alta) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Baixo) então (th(kPa) é Saída47) (1)
48. Se (kn(kPa/mm) é Alta) e (sn0(MPa) é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc(MPa) é Alta) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Alto) então (th(kPa) é Saída48) (1)
49. Se (kn(kPa/mm) é Alta) e (sn0(MPa) é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Baixo) e (dh(mm) é Baixo) então (th(kPa) é Saída49) (1)
50. Se (kn(kPa/mm) é Alta) e (sn0(MPa) é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Baixo) e (dh(mm) é Alto) então (th(kPa) é Saída50) (1)
51. Se (kn(kPa/mm) é Alta) e (sn0(MPa) é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Baixo) então (th(kPa) é Saída51) (1)
52. Se (kn(kPa/mm) é Alta) e (sn0(MPa) é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Alto) então (th(kPa) é Saída52) (1)
53. Se (kn(kPa/mm) é Alta) e (sn0(MPa) é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc(MPa) é Alta) e (fb(o) é Baixo) e (dh(mm) é Baixo) então (th(kPa) é Saída53) (1)
54. Se (kn(kPa/mm) é Alta) e (sn0(MPa) é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc(MPa) é Alta) e (fb(o) é Baixo) e (dh(mm) é Alto) então (th(kPa) é Saída54) (1)

55. Se (kn(kPa/mm) é Alta) e (sn0(MPa) é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc(MPa) é Alta) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Baixo) então (th(kPa) é Saída55) (1)
56. Se (kn(kPa/mm) é Alta) e (sn0(MPa) é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc(MPa) é Alta) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Alto) então (th(kPa) é Saída56) (1)
57. Se (kn(kPa/mm) é Alta) e (sn0(MPa) é Alta) e (JRC é Alto) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Baixo) e (dh(mm) é Baixo) então (th(kPa) é Saída57) (1)
58. Se (kn(kPa/mm) é Alta) e (sn0(MPa) é Alta) e (JRC é Alto) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Baixo) e (dh(mm) é Alto) então (th(kPa) é Saída58) (1)
59. Se (kn(kPa/mm) é Alta) e (sn0(MPa) é Alta) e (JRC é Alto) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Baixo) então (th(kPa) é Saída59) (1)
60. Se (kn(kPa/mm) é Alta) e (sn0(MPa) é Alta) e (JRC é Alto) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Alto) então (th(kPa) é Saída60) (1)
61. Se (kn(kPa/mm) é Alta) e (sn0(MPa) é Alta) e (JRC é Alto) e (sc(MPa) é Alta) e (fb(o) é Baixo) e (dh(mm) é Baixo) então (th(kPa) é Saída61) (1)
62. Se (kn(kPa/mm) é Alta) e (sn0(MPa) é Alta) e (JRC é Alto) e (sc(MPa) é Alta) e (fb(o) é Baixo) e (dh(mm) é Alto) então (th(kPa) é Saída62) (1)
63. Se (kn(kPa/mm) é Alta) e (sn0(MPa) é Alta) e (JRC é Alto) e (sc(MPa) é Alta) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Baixo) então (th(kPa) é Saída63) (1)
64. Se (kn(kPa/mm) é Alta) e (sn0(MPa) é Alta) e (JRC é Alto) e (sc(MPa) é Alta) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Alto) então (th(kPa) é Saída64) (1)

REGRAS DE INFERÊNCIA FUZZY PARA DETERMINAÇÃO DE δ_v

1. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Baixo) e (dh(mm) é Baixo) então (dv(mm) é Saída1) (1)
2. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Baixo) e (dh(mm) é Alto) então (dv(mm) é Saída2) (1)
3. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Baixo) então (dv(mm) é Saída3) (1)
4. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Alto) então (dv(mm) é Saída4) (1)
5. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc(MPa) é Alta) e (fb(o) é Baixo) e (dh(mm) é Baixo) então (dv(mm) é Saída5) (1)
6. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc(MPa) é Alta) e (fb(o) é Baixo) e (dh(mm) é Alto) então (dv(mm) é Saída6) (1)
7. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc(MPa) é Alta) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Baixo) então (dv(mm) é Saída7) (1)
8. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc(MPa) é Alta) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Alto) então (dv(mm) é Saída8) (1)
9. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Baixo) e (dh(mm) é Baixo) então (dv(mm) é Saída9) (1)
10. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Baixo) e (dh(mm) é Alto) então (dv(mm) é Saída10) (1)
11. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Baixo) então (dv(mm) é Saída11) (1)
12. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Alto) então (dv(mm) é Saída12) (1)
13. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc(MPa) é Alta) e (fb(o) é Baixo) e (dh(mm) é Baixo) então (dv(mm) é Saída13) (1)
14. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc(MPa) é Alta) e (fb(o) é Baixo) e (dh(mm) é Alto) então (dv(mm) é Saída14) (1)
15. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc(MPa) é Alta) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Baixo) então (dv(mm) é Saída15) (1)
16. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc(MPa) é Alta) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Alto) então (dv(mm) é Saída16) (1)
17. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Baixo) e (dh(mm) é Baixo) então (dv(mm) é Saída17) (1)
18. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Baixo) e (dh(mm) é Alto) então (dv(mm) é Saída18) (1)

19. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Baixo) então (dv(mm) é Saída19) (1)
20. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Alto) então (dv(mm) é Saída20) (1)
21. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc(MPa) é Alta) e (fb(o) é Baixo) e (dh(mm) é Baixo) então (dv(mm) é Saída21) (1)
22. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc(MPa) é Alta) e (fb(o) é Baixo) e (dh(mm) é Alto) então (dv(mm) é Saída22) (1)
23. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc(MPa) é Alta) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Baixo) então (dv(mm) é Saída23) (1)
24. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc(MPa) é Alta) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Alto) então (dv(mm) é Saída24) (1)
25. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Alta) e (JRC é Alto) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Baixo) e (dh(mm) é Baixo) então (dv(mm) é Saída25) (1)
26. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Alta) e (JRC é Alto) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Baixo) e (dh(mm) é Alto) então (dv(mm) é Saída26) (1)
27. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Alta) e (JRC é Alto) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Baixo) então (dv(mm) é Saída27) (1)
28. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Alta) e (JRC é Alto) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Alto) então (dv(mm) é Saída28) (1)
29. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Alta) e (JRC é Alto) e (sc(MPa) é Alta) e (fb(o) é Baixo) e (dh(mm) é Baixo) então (dv(mm) é Saída29) (1)
30. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Alta) e (JRC é Alto) e (sc(MPa) é Alta) e (fb(o) é Baixo) e (dh(mm) é Alto) então (dv(mm) é Saída30) (1)
31. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Alta) e (JRC é Alto) e (sc(MPa) é Alta) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Baixo) então (dv(mm) é Saída31) (1)
32. Se (kn(kPa/mm) é Baixa) e (sn0(MPa) é Alta) e (JRC é Alto) e (sc(MPa) é Alta) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Alto) então (dv(mm) é Saída32) (1)
33. Se (kn(kPa/mm) é Alta) e (sn0(MPa) é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Baixo) e (dh(mm) é Baixo) então (dv(mm) é Saída33) (1)
34. Se (kn(kPa/mm) é Alta) e (sn0(MPa) é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Baixo) e (dh(mm) é Alto) então (dv(mm) é Saída34) (1)
35. Se (kn(kPa/mm) é Alta) e (sn0(MPa) é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Baixo) então (dv(mm) é Saída35) (1)
36. Se (kn(kPa/mm) é Alta) e (sn0(MPa) é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Alto) então (dv(mm) é Saída36) (1)
37. Se (kn(kPa/mm) é Alta) e (sn0(MPa) é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc(MPa) é Alta) e (fb(o) é Baixo) e (dh(mm) é Baixo) então (dv(mm) é Saída37) (1)

38. Se (kn(kPa/mm) é Alta) e (sn0(MPa) é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc(MPa) é Alta) e (fb(o) é Baixo) e (dh(mm) é Alto) então (dv(mm) é Saída38) (1)
39. Se (kn(kPa/mm) é Alta) e (sn0(MPa) é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc(MPa) é Alta) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Baixo) então (dv(mm) é Saída39) (1)
40. Se (kn(kPa/mm) é Alta) e (sn0(MPa) é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc(MPa) é Alta) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Alto) então (dv(mm) é Saída40) (1)
41. Se (kn(kPa/mm) é Alta) e (sn0(MPa) é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Baixo) e (dh(mm) é Baixo) então (dv(mm) é Saída41) (1)
42. Se (kn(kPa/mm) é Alta) e (sn0(MPa) é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Baixo) e (dh(mm) é Alto) então (dv(mm) é Saída42) (1)
43. Se (kn(kPa/mm) é Alta) e (sn0(MPa) é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Baixo) então (dv(mm) é Saída43) (1)
44. Se (kn(kPa/mm) é Alta) e (sn0(MPa) é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Alto) então (dv(mm) é Saída44) (1)
45. Se (kn(kPa/mm) é Alta) e (sn0(MPa) é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc(MPa) é Alta) e (fb(o) é Baixo) e (dh(mm) é Baixo) então (dv(mm) é Saída45) (1)
46. Se (kn(kPa/mm) é Alta) e (sn0(MPa) é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc(MPa) é Alta) e (fb(o) é Baixo) e (dh(mm) é Alto) então (dv(mm) é Saída46) (1)
47. Se (kn(kPa/mm) é Alta) e (sn0(MPa) é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc(MPa) é Alta) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Baixo) então (dv(mm) é Saída47) (1)
48. Se (kn(kPa/mm) é Alta) e (sn0(MPa) é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc(MPa) é Alta) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Alto) então (dv(mm) é Saída48) (1)
49. Se (kn(kPa/mm) é Alta) e (sn0(MPa) é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Baixo) e (dh(mm) é Baixo) então (dv(mm) é Saída49) (1)
50. Se (kn(kPa/mm) é Alta) e (sn0(MPa) é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Baixo) e (dh(mm) é Alto) então (dv(mm) é Saída50) (1)
51. Se (kn(kPa/mm) é Alta) e (sn0(MPa) é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Baixo) então (dv(mm) é Saída51) (1)
52. Se (kn(kPa/mm) é Alta) e (sn0(MPa) é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Alto) então (dv(mm) é Saída52) (1)
53. Se (kn(kPa/mm) é Alta) e (sn0(MPa) é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc(MPa) é Alta) e (fb(o) é Baixo) e (dh(mm) é Baixo) então (dv(mm) é Saída53) (1)
54. Se (kn(kPa/mm) é Alta) e (sn0(MPa) é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc(MPa) é Alta) e (fb(o) é Baixo) e (dh(mm) é Alto) então (dv(mm) é Saída54) (1)
55. Se (kn(kPa/mm) é Alta) e (sn0(MPa) é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc(MPa) é Alta) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Baixo) então (dv(mm) é Saída55) (1)
56. Se (kn(kPa/mm) é Alta) e (sn0(MPa) é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc(MPa) é Alta) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Alto) então (dv(mm) é Saída56) (1)

57. Se (kn(kPa/mm) é Alta) e (sn0(MPa) é Alta) e (JRC é Alto) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Baixo) e (dh(mm) é Baixo) então (dv(mm) é Saída57) (1)
58. Se (kn(kPa/mm) é Alta) e (sn0(MPa) é Alta) e (JRC é Alto) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Baixo) e (dh(mm) é Alto) então (dv(mm) é Saída58) (1)
59. Se (kn(kPa/mm) é Alta) e (sn0(MPa) é Alta) e (JRC é Alto) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Baixo) então (dv(mm) é Saída59) (1)
60. Se (kn(kPa/mm) é Alta) e (sn0(MPa) é Alta) e (JRC é Alto) e (sc(MPa) é Baixa) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Alto) então (dv(mm) é Saída60) (1)
61. Se (kn(kPa/mm) é Alta) e (sn0(MPa) é Alta) e (JRC é Alto) e (sc(MPa) é Alta) e (fb(o) é Baixo) e (dh(mm) é Baixo) então (dv(mm) é Saída61) (1)
62. Se (kn(kPa/mm) é Alta) e (sn0(MPa) é Alta) e (JRC é Alto) e (sc(MPa) é Alta) e (fb(o) é Baixo) e (dh(mm) é Alto) então (dv(mm) é Saída62) (1)
63. Se (kn(kPa/mm) é Alta) e (sn0(MPa) é Alta) e (JRC é Alto) e (sc(MPa) é Alta) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Baixo) então (dv(mm) é Saída63) (1)
64. Se (kn(kPa/mm) é Alta) e (sn0(MPa) é Alta) e (JRC é Alto) e (sc(MPa) é Alta) e (fb(o) é Alto) e (dh(mm) é Alto) então (dv(mm) é Saída64) (1)