



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

MATHEUS CAVALCANTE ALBINO

**DESENVOLVIMENTO DE MODELOS NEURO-FUZZY PARA PREVISÃO DO
COMPORTAMENTO CISALHANTE DAS DESCONTINUIDADES ROCHOSAS**

FORTALEZA

2020

MATHEUS CAVALCANTE ALBINO

DESENVOLVIMENTO DE MODELOS NEURO-FUZZY PARA PREVISÃO DO
COMPORTAMENTO CISALHANTE DAS DESCONTINUIDADES ROCHOSAS

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

Orientador: Prof. Dr. Silvrano Adonias Dantas Neto.

FORTALEZA

2020

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)

A295d Albino, Matheus Cavalcante.

Desenvolvimento de modelos neuro-fuzzy para previsão do comportamento cisalhante das
descontinuidades rochosas / Matheus Cavalcante Albino. – 2020.
165 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Civil: Geotecnia, Fortaleza, 2020.

Orientação: Prof. Dr. Silvrano Adonias Dantas Neto.

1. Descontinuidades. 2. Resistência ao Cisalhamento. 3. Dilatância. 4. Neuro-fuzzy. I. Título.

CDD 624.15

MATHEUS CAVALCANTE ALBINO

DESENVOLVIMENTO DE MODELOS NEURO-FUZZY PARA PREVISÃO DO
COMPORTAMENTO CISALHANTE DAS DESCONTINUIDADES ROCHOSAS

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

Orientador: Prof. Dr. Silvrano Adonias Dantas Neto.

Aprovada em: 17/12/2020.

BANCA EXAMINADORA

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

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

Prof. Dr. André Luis Brasil Cavalcante (Examinador Externo)
Universidade de Brasília (UnB)

A Deus.

Ao meu pai, Cel. João Ricardo Vale Albino (*in
memoriam*).

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelas forças que me foram dadas para continuar a minha trajetória e pelas graças alcançadas. Ao Senhor, confio minha vida.

Aos meus pais, Maria Auxiliadora Cavalcante Albino e João Ricardo Vale Albino (*in memoriam*), por todo o amor, pelos ensinamentos e esforços investidos na minha educação. Sempre tenho como motivação trazer orgulho a vocês.

Aos meus irmãos, João Vitor Cavalcante Albino e Josiane Cavalcante Paiva, pelo apoio e pelo incentivo que recebo. Nossos momentos compartilhados com certeza nos dão forças para vencer todas as batalhas.

À toda minha família por todo o amor e carinho.

À minha namorada, Larissa Silva de Mesquita, por todo o carinho, dedicação, compreensão e amor. Juntamente com seus pais, Maria e Júnior, agradeço por estarem sempre ao meu lado nos momentos mais difíceis.

Ao professor orientador Silvrano Adonias Dantas Neto, pelos valiosos ensinamentos passados em sala de aula durante a minha formação, e pela dedicação, orientação e paciência durante este trabalho. Agradeço especialmente pela confiança depositada.

Aos demais professores do mestrado, Francisco Chagas, Alfran Sampaio e Anderson Borghetti, por toda contribuição em minha formação.

Aos professores Francisco Chagas e André Cavalcante, pela oportunidade de receber suas valiosas contribuições neste trabalho.

Aos amigos do mestrado por toda a amizade e convívio, o que gerou grandes momentos que levarei para sempre em minha vida. Agradeço especialmente aos amigos Raquel, Marlon e Yago pelo apoio neste trabalho.

Aos amigos da graduação e de infância, Artur, Caio, Clereston, Davi, Diego, Edvaldo, Felipe, Ícaro, Jorge, Júnior, Lucas, Natália e Whanderson, por todo o companheirismo ao longo dessa trajetória e suporte nos momentos mais difíceis.

Por fim, agradeço à Universidade Federal do Ceará por conceder a licença do *software* MATLAB e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo suporte financeiro para Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará.

“A mente que se abre a uma nova ideia jamais
voltará ao seu tamanho original.”

Albert Einstein

RESUMO

O mecanismo de ruptura de um maciço rochoso pode estar fortemente relacionado às descontinuidades constituintes. Isso ocorre pelo fato de que as propriedades de resistência ao cisalhamento dessas estruturas são inferiores às pertencentes à rocha intacta. Em virtude da influência que as descontinuidades rochosas apresentam, modelos têm sido desenvolvidos com o objetivo fornecer previsões de seu comportamento cisalhante. No entanto, os modelos analíticos podem apresentar desvantagens em seu uso, como a não consideração de fatores importantes que influenciam o comportamento cisalhante das descontinuidades rochosas, ou mesmo a dificuldade de calcular certos parâmetros inerentes às formulações. Como alternativa aos modelos analíticos, outras metodologias têm sido utilizadas em Mecânica das Rochas, destacando-se os sistemas inteligentes que utilizam redes neurais artificiais, ou controladores neuro-fuzzy. Nesse contexto, foram desenvolvidos no presente trabalho sistemas neuro-fuzzy para a previsão do comportamento cisalhante das descontinuidades rochosas com e sem preenchimento, por meio de estimativas da dilatância e da tensão de cisalhamento em função do deslocamento cisalhante. Foram utilizados, no desenvolvimento dos modelos, dados de 116 ensaios de cisalhamento direto apresentados por diversos autores, gerando um conjunto de 2098 pontos gráficos referentes ao registro de medidas de dilatância e de tensão de cisalhamento em função do deslocamento cisalhante. Diversas estruturas de modelos pertencentes à diferentes classes de dados foram estabelecidas e, por meio dos testes e avaliações realizados, os sistemas que forneceram os melhores resultados apresentam como variáveis de entrada a rigidez normal de contorno; a relação entre a espessura do preenchimento e a amplitude da aspereza; a tensão normal inicial; o coeficiente de rugosidade da descontinuidade; a resistência à compressão uniaxial da rocha intacta; o ângulo de atrito básico da rocha intacta; o ângulo de atrito do material de preenchimento e o deslocamento cisalhante. Com o modelo de previsão da dilatância, foram calculados valores de coeficiente de determinação de 0,99 para as fases de treinamento e de teste. No caso do modelo de previsão da tensão de cisalhamento, foram obtidos valores de coeficientes de determinação de 0,97 e 0,96 para as fases de treinamento e de teste, respectivamente. As estimativas dos sistemas definidos apresentaram satisfatória correlação com os dados experimentais utilizados em seus desenvolvimentos, além de serem compatíveis com os resultados fornecidos por outros modelos existentes.

Palavras-chave: Descontinuidades. Resistência ao Cisalhamento. Dilatância. Neuro-fuzzy.

ABSTRACT

The rupture mechanism of a rock mass may be strongly related to the constituent discontinuities. This is due to the fact that the shear strength properties of these structures are lower than those of intact rock. Due to the influence that rock discontinuities have, models have been developed with the objective of providing predictions of their shear behavior. However, the analytical models can present disadvantages in their use, such as the non-consideration of important factors that influence the shear behavior of rock discontinuities, or even the difficulty of calculating certain parameters inherent to the formulations. As an alternative to analytical models, other methodologies have been used in Rock Mechanics, highlighting intelligent systems that use artificial neural networks, or neuro-fuzzy controllers. In this context, in the present work, neuro-fuzzy systems were developed to predict the shear behavior of clean and filled rock discontinuities, by means of estimates of the dilation and shear stress as a function of shear displacement. In the development of the models, data from 116 direct shear tests presented by several authors were used, generating a set of 2098 graphic points referring to the measurement of dilation and shear stress as a function of shear displacement. Several model structures belonging to different classes of data have been established and, through the tests and evaluations carried out, the systems that provided the best results have the boundary normal stiffness, the ratio between the infill thickness and the asperity height, the initial normal stress, joint roughness coefficient, uniaxial compressive strength of the intact rock, basic friction angle of the intact rock, infill friction angle and the shear displacement as input variables. With the dilation prediction model, values of coefficient of determination of 0.99 were calculated for the training and test phases. In the case of the shear stress prediction model, values of coefficient of determination of 0.97 and 0.96 were obtained for the training and test phases, respectively. The estimates of the defined systems showed a satisfactory correlation with the experimental data used in their development, in addition to being compatible with the results provided by other existing models.

Keywords: Discontinuities. Shear strength. Dilation. Neuro-fuzzy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Comparação entre os resultados experimentais de descontinuidades submetidas às condições CNL ($k_n = 0$ kN/mm) e CNS, em (a) Dilatância e (b) Tensão de cisalhamento.	24
Figura 2– Influência da rugosidade, em (a) Dilatância e (b) Tensão de cisalhamento.....	25
Figura 3 – Influência da tensão normal inicial em (a) Dilatância e (b) Tensão de cisalhamento.	26
Figura 4 – Representação do modelo de Patton (1966).....	28
Figura 5 – Relação entre JRC_{mob} e o deslocamento cisalhante normalizado (μ_s/μ_p).	30
Figura 6 – Procedimento para o cálculo da dilatância sob condição CNS.	31
Figura 7 – Comparação entre os resultados fornecidos pelos modelos de Dantas Neto <i>et al.</i> (2017) e de Indraratna e Haque (2000), para (a) Dilatância e (b) Tensão de cisalhamento.	34
Figura 8 – Comparação dos resultados fornecidos pelos modelos de Matos (2018) e de Dantas Neto <i>et al.</i> (2017) para (a) Dilatância e (b) Tensão de cisalhamento.	36
Figura 9 – Situações de espessura do preenchimento.....	39
Figura 10 – Influência da espessura do preenchimento no comportamento cisalhante das descontinuidades, em (a) Dilatância e (b) Tensão de cisalhamento.	41
Figura 11 – Influência de t/a na tensão cisalhante de pico das descontinuidades.	42
Figura 12 – Representação dos planos de cisalhamento de acordo com a variação da espessura do preenchimento.	42
Figura 13 – Comparação entre os resultados fornecidos pelo modelo de Leite (2019) e os dados experimentais apresentados por Oliveira, Indraratna e Nemcik (2009), em (a) Dilatância e (b) Tensão de cisalhamento.....	49
Figura 14 – diferenças entre os conjuntos clássicos e fuzzy.	53
Figura 15 – Representação do sistema de inferência fuzzy de Takagi e Sugeno (1983).	55
Figura 16 – Representação do neurônio artificial.....	57
Figura 17 – Rede neural artificial do tipo perceptron com duas camadas ocultas.	58
Figura 18 – Representação de um modelo neuro-fuzzy do tipo ANFIS.	61
Figura 19 – Etapas metodológicas realizadas no desenvolvimento dos modelos ANFIS.....	66
Figura 20 – Frequência de k_n	69
Figura 21 – Frequência de t/a	69
Figura 22 – Frequência de σ_{n0}	69
Figura 23 – Frequência de JRC.	70
Figura 24 – Frequência de σ_c	70

Figura 25 – Frequência de ϕ_b	70
Figura 26 – Frequência de ϕ_{fill}	71
Figura 27 – Frequência de δ_n	71
Figura 28 – Estudo da influência de t/a pelo modelo Dilatância – A2.....	83
Figura 29 – Estudo da influência de t/a pelo modelo Dilatância – A3.....	83
Figura 30 – Estudo da influência de t/a pelo modelo Dilatância – A4.....	83
Figura 31 – Estudo da influência de t/a pelo modelo Dilatância – A1.....	84
Figura 32 – Estudo da influência de k_n pelo modelo Dilatância – C6.....	84
Figura 33 – Estudo da influência de k_n pelo modelo Dilatância – C8.....	85
Figura 34 – Estudo da influência de k_n pelo modelo Dilatância – A1.....	85
Figura 35 – Estudo da influência de σ_{n0} pelo modelo Dilatância – A1.....	86
Figura 36 – Estudo da influência de JRC pelo modelo Dilatância – A1.....	86
Figura 37 – Funções de pertinência das variáveis de entrada do modelo Dilatância – A1.....	87
Figura 38 – Comparação entre os resultados fornecidos pelos modelos T.Cisalhamento – A1 e A2 e os dados experimentais de Papaliangas <i>et al.</i> (1993).....	95
Figura 39 – Estudo da influência de t/a pelo modelo T.Cisalhamento – A3.....	96
Figura 40 – Estudo da influência de t/a pelo modelo T.Cisalhamento – A4.....	96
Figura 41 – Estudo da influência de t/a pelo modelo T.Cisalhamento – A2.....	96
Figura 42 – Funções de pertinência das variáveis de entrada do modelo ANFIS T.Cisalhamento – A2.....	97
Figura 43 – Comportamento cisalhante de descontinuidades provenientes dos ensaios apresentados por Benmokrane e Ballivy (1989), em (a) Dilatância e (b) Tensão de cisalhamento.	100
Figura 44 – Comportamento cisalhante de descontinuidades provenientes dos ensaios apresentados por Haque (1999), em (a) Dilatância e (b) Tensão de cisalhamento.	101
Figura 45 – Comportamento cisalhante de descontinuidades provenientes dos ensaios apresentados por Indraratna e Haque (2000), em (a) Dilatância e (b) Tensão de cisalhamento.	102
Figura 46 – Comportamento cisalhante de descontinuidades sob condição CNL provenientes dos ensaios apresentados por Papaliangas <i>et al.</i> (1993), em (a) Dilatância e (b) Tensão de cisalhamento.	103

Figura 47 – Comportamento cisalhante de descontinuidades sob condição CNS provenientes dos ensaios apresentados por Oliveira, Indraratna e Nemcik (2009), em (a) Dilatância e (b) Tensão de cisalhamento.....	104
Figura 48 – Influência de t/a nos valores de tensão de cisalhamento de pico referente aos ensaios apresentados por Haque (1999).	105
Figura 49 – Envoltória de ruptura referente aos ensaios apresentados por Haque (1999).	105
Figura 50 – Envoltória de ruptura de descontinuidade sem preenchimento sob condição CNL referente aos ensaios apresentados por Indraratna e Haque (2000).....	106
Figura 51 – Comportamento cisalhante de descontinuidades sem preenchimento sob condição CNS provenientes dos ensaios apresentados por Indraratna e Haque (2000) em (a) Dilatância e (b) Tensão de cisalhamento.	107
Figura 52 – Comportamento cisalhante de descontinuidades provenientes dos ensaios expostos por Skinas, Bandis e Demiris (1990), em (a) Dilatância e (b) Tensão de cisalhamento.	108
Figura 53 – Comportamento cisalhante de descontinuidades provenientes dos ensaios apresentados por Shrivastava e Rao (2018), em (a) Dilatância e (b) Tensão de cisalhamento.	109
Figura 54 – Estimativa do comportamento cisalhante de descontinuidades hipotéticas sob condição CNL com o cálculo de (a) Dilatância e (b) Tensão de cisalhamento.....	111
Figura 55 – Envoltórias de ruptura de descontinuidades hipotéticas sem preenchimento.	112
Figura 56 – Estimativa do comportamento cisalhante de descontinuidades hipotéticas com preenchimento com o cálculo de (a) Dilatância e (b) Tensão de cisalhamento.	113
Figura 57 – Estimativa da envoltória de ruptura em descontinuidade hipotética com e sem preenchimento.	113

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores máximos e mínimos das variáveis consideradas.....	68
Tabela 2 – Resultados da modelagem dos sistemas Classe A de dilatância.....	77
Tabela 3 – Resultados da modelagem dos sistemas Classe B de dilatância.....	79
Tabela 4 – Resultados da modelagem dos sistemas Classe C de dilatância.....	80
Tabela 5 – Resultados da modelagem dos sistemas Classe D de dilatância.....	81
Tabela 6 – Modelos de previsão da dilatância selecionados para avaliação de desempenho. .	82
Tabela 7 – Resultados da modelagem dos sistemas Classe A de tensão de cisalhamento.	91
Tabela 8 – Resultados da modelagem dos sistemas Classe B de tensão de cisalhamento.	92
Tabela 9 – Resultados da modelagem dos sistemas Classe C de tensão de cisalhamento.	93
Tabela 10 – Resultados da modelagem dos sistemas Classe D de tensão de cisalhamento.	93
Tabela 11 – Modelos escolhidos de previsão da tensão de cisalhamento para avaliação de desempenho.	94

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO	15
1.1 Motivação da pesquisa.....	15
1.2 Objetivos.....	19
1.2.1 Objetivo Geral	19
1.2.2 Objetivos Específicos	19
1.3 Metodologia.....	19
1.4 Escopo do trabalho	20
CAPÍTULO 2: COMPORTAMENTO CISALHANTE DAS DESCONTINUIDADES ROCHOSAS.....	22
2.1 Introdução	22
2.2 Descontinuidades rochosas sem preenchimento	22
2.2.1 Variáveis governantes.....	22
2.2.2 Modelos para estimativa do comportamento cisalhante das descontinuidades sem preenchimento	27
2.3 Descontinuidades rochosas com preenchimento	37
2.3.1 A função do material de preenchimento.....	37
2.3.2 Modelos para estimativa do comportamento cisalhante das descontinuidades com preenchimento	45
2.4 Conclusões parciais	50
CAPÍTULO 3: MODELAGEM EM ENGENHARIA COM SISTEMAS INTELIGENTES ..	52
3.1 Introdução.....	52
3.2 Teoria dos conjuntos fuzzy.....	52
3.3 Redes neurais artificiais: conceitos básicos.....	56
3.4 Sistemas neuro-fuzzy.....	59
3.5 Conclusões parciais	64
CAPÍTULO 4: MATERIAIS E MÉTODOS.....	66
4.1 Introdução	66
4.2 Levantamento dos dados experimentais	67
4.3 Definição das variáveis de entrada e de saída	67
4.4 Configurações analisadas para os modelos	71
4.5 Modelagem no <i>software</i>	73
4.6 Seleção e avaliação dos modelos estudados	74

4.7 Validação dos sistemas neuro-fuzzy.....	75
CAPÍTULO 5: MODELOS NEURO-FUZZY PARA PREVISÃO DO COMPORTAMENTO	
CISALHANTE DE DESCONTINUIDADES ROCHOSAS	
5.1 Introdução	76
5.2 Sistemas neuro-fuzzy do tipo ANFIS para a previsão da dilatância	76
5.2.1 Resultados da modelagem e seleção dos melhores modelos.....	76
5.2.2 Avaliação de desempenho dos modelos para previsão da dilatância	81
5.2.3 Modelo definido para a previsão da dilatância.....	87
5.3 Sistemas neuro-fuzzy do tipo ANFIS para a previsão da tensão de cisalhamento	90
5.3.1 Resultados da modelagem e seleção dos melhores modelos.....	90
5.3.2 Avaliação de desempenho dos modelos para previsão da tensão de cisalhamento	94
5.3.3 Modelo definido para a previsão da tensão de cisalhamento	97
5.4 Validação dos sistemas ANFIS definidos	100
5.4.1 Comparação entre os resultados fornecidos pelos modelos ANFIS desenvolvidos e os dados experimentais	100
5.4.2 Comparação entre os resultados fornecidos pelos sistemas ANFIS propostos e por outros modelos existentes utilizando descontinuidades experimentais.....	106
5.4.3 Comparação entre os resultados fornecidos pelos sistemas ANFIS propostos e por outros modelos existentes utilizando descontinuidades hipotéticas	110
5.5 Limitações dos sistemas ANFIS propostos	114
CAPÍTULO 6: CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	
6.1 Conclusões.....	115
6.2 Sugestões para trabalhos futuros	117
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	
APÊNDICE A – REGRAS DE INFERÊNCIA FUZZY PARA DETERMINAÇÃO DE δ_v	128
APÊNDICE B – REGRAS DE INFERÊNCIA FUZZY PARA DETERMINAÇÃO DE τ	144

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO

Neste capítulo, a motivação da pesquisa, os objetivos, geral e específicos, a metodologia utilizada e o escopo da dissertação são apresentados, de maneira a fornecer a base para o entendimento do trabalho.

1.1 Motivação da pesquisa

Seja pela necessidade de determinadas obras, ou pela magnitude do carregamento imposto, como em túneis e fundações, o fato é que cada vez mais estão sendo executadas ações em maciços rochosos. Em virtude disso, é indispensável que sejam realizados estudos nessa área, permitindo que as obras possam ser bem analisadas e dimensionadas de forma racional por parte dos projetistas.

Maciços rochosos presentes na natureza geralmente apresentam descontinuidades, que são estruturas que englobam juntas, contatos entre diferentes materiais, físsuras, entre outros (PREMADASA, 2013). A avaliação da resistência ao cisalhamento das descontinuidades rochosas é de fundamental importância pelo fato de que o principal efeito deste tipo de estrutura é de reduzir a resistência global de um sistema formado por um maciço rochoso, podendo influenciar o seu mecanismo de ruptura, uma vez que as propriedades mecânicas das descontinuidades são diferentes das provenientes da rocha intacta (INDRARATNA, HAQUE e AZIZ, 1998, 1999; WELIDENIYA, 2005; SHRIVASTAVA e RAO, 2018).

Oliveira (2009) cita diferentes falhas que foram causadas, dentre outros motivos, pela influência das descontinuidades rochosas, como na construção do Canal do Panamá, entre 1910 e 1964. Segundo o autor, foram registrados mais de 60 deslizamentos que foram controlados por descontinuidades, o que reflete a relevância dessas formações nas análises estruturais referentes aos maciços rochosos.

Tendo em vista a influência das descontinuidades na ruptura dos maciços rochosos, há a necessidade de se estudar, com maiores detalhes, como ocorre seu processo de cisalhamento. Isso promoveu o desenvolvimento de diversas pesquisas que buscaram compreender o comportamento cisalhante dessas estruturas, como podem ser citados os trabalhos de Patton (1966), Ladanyi e Archambault (1969), Barton (1973a), Barton e Choubey (1977), Papaliangas *et al.* (1993), Indraratna, Haque e Aziz, (1999), Oliveira, Indraratna e Nemcik, (2009), Barton (2013, 2016), entre outros.

A previsão do comportamento cisalhante das descontinuidades rochosas não é uma tarefa fácil, uma vez que esse fenômeno depende de uma série de fatores, além do fato que podem surgir dificuldades na obtenção dos dados necessários para sua estimativa. Barton (1971) cita que é de conhecimento notório que a maior dificuldade prática em Mecânica das Rochas é a medição confiável de dados de campo, parecendo haver uma lacuna grande entre a qualidade dos dados de entrada e os métodos de análise.

Os modelos disponíveis para previsão do comportamento cisalhante das descontinuidades rochosas podem considerar, ou não, as principais variáveis governantes do processo de cisalhamento. Assim, parte das formulações existentes já é limitada por diferentes motivos, como não considerar as condições de contorno apropriadas, ou o efeito da presença do material de preenchimento da descontinuidade. Além disso, Oliveira e Indraratna (2010) ressaltam que muitas soluções práticas são baseadas em abordagens empíricas, que envolvem a análise de dados de ensaios para obter uma correlação entre as características das descontinuidades e as propriedades dos materiais, avaliando o comportamento esperado, o que faz com que a maioria das análises tenha função válida apenas para determinadas formações rochosas, e não para uma abordagem, ou aplicação, universal.

Tendo em vista as limitações inerentes aos modelos analíticos, outras metodologias de análise têm sido utilizadas na previsão do comportamento cisalhante das descontinuidades rochosas, como as redes neurais artificiais (RNA), a lógica fuzzy e as técnicas neuro-fuzzy, destacando os trabalhos de Dantas Neto, Indraratna e Oliveira (2016), Dantas Neto *et al.* (2017), Dantas Neto, Barreto e Matos (2019), Leite (2019), Leite *et al.* (2019), Leite, Dantas Neto e Albino (2019), Matos (2018), e Matos, Dantas Neto e Barreto (2018a, 2018b, 2019a, 2019b).

Haykin (2008) define a rede neural artificial como um processador distribuído de maneira paralela formado por unidades de processamento, que apresentam a propensão natural de armazenar conhecimento experimental e torná-lo disponível para uso. Dantas Neto *et al.* (2017) apresentam um modelo em rede neural artificial que prevê o comportamento cisalhante de descontinuidades rochosas sem preenchimento com o uso das principais variáveis que governam o fenômeno.

O modelo de Dantas Neto *et al.* (2017) apresentou resultados satisfatórios quando comparados com os dados experimentais utilizados em seu desenvolvimento, além de permitir obter uma estimativa rápida do comportamento cisalhante de descontinuidades rochosas sem preenchimento. No entanto, ele não considera as incertezas presentes nos valores atribuídos às suas variáveis de entrada, e, em Geotecnia, com frequência os resultados fornecidos pelos

procedimentos usuais, como a realização de ensaios, amostragem, leituras, etc. estão sujeitos às imprecisões inerentes aos processos.

A lógica fuzzy considera a influência das imprecisões e das incertezas existentes em dados de entrada de certos modelos em sua resposta final. A teoria dos conjuntos fuzzy, introduzida por Zadeh (1965), surge como uma ferramenta que visa tratar problemas de caráter subjetivo, envolvendo informações imprecisas e vagas, com o objetivo de dar uma abordagem formal e mais robusta às análises que necessitem desses tipos de dados, possibilitando a utilização de conhecimentos prévios sobre o fenômeno estudado (MOZELLI, 2008). A lógica fuzzy foi utilizada em diversos estudos na Mecânica das Rochas, como nos trabalhos de Sakurai e Shimizu (1987), Grima e Babuska (1999), Kayabasi, Gokceoglu e Ercanoglu (2003), Gokceoglu (2002), Sonmez, Gokceoglu e Ulusay (2003), Harrison e Hudson (2010), Matos, Dantas Neto e Barreto (2018a, 2018b, 2019a, 2019b), entre outros.

Relacionando os conceitos de aprendizagem inerentes às redes neurais artificiais no desenvolvimento de conjuntos fuzzy, Jang (1993) apresentou um controlador neuro-fuzzy denominado ANFIS (*Adaptive-Network-based Fuzzy Inference System*), que tem como base a construção de um conjunto de regras de inferência fuzzy com funções de pertinência apropriadas, o que gera pares de entrada-saída ajustados. Os conceitos do neuro-fuzzy e do ANFIS foram utilizados em Mecânica das Rochas, podendo citar os estudos apresentados por Grima (2000), Grima, Bruines e Verhoef (2000), Gokceoglu *et al.* (2004), Singh e Singh (2006), Noorani, Kordi e Ghazvinian (2010), Jalalifar *et al.* (2011), Yesiloglu-Gultekin *et al.* (2013) e Matos (2018).

Matos (2018) apresentou modelos fuzzy e neuro-fuzzy que fornecem estimativas do comportamento cisalhante de descontinuidades rochosas sem preenchimento, com o cálculo da tensão cisalhante e da dilatação obtidas no processo de cisalhamento. Esses modelos foram desenvolvidos a partir de uma série de dados de ensaios de cisalhamento direto provenientes de diversos estudos, apresentando resultados satisfatórios quando comparados com os dados experimentais utilizados na modelagem, sendo que os sistemas neuro-fuzzy forneceram as melhores previsões.

Embora forneçam previsões satisfatórias, os modelos de Matos (2018) não consideram a presença do material de preenchimento das descontinuidades em suas análises. O preenchimento possui papel fundamental no comportamento cisalhante das descontinuidades rochosas, como apresentado nos trabalhos de Ladanyi e Archambault (1977), de Toledo e de Freitas (1993), Papaliangas *et al.* (1990, 1993), Indraratna, Haque e Aziz (1998, 1999), Indraratna, Welideniya e Brown (2005), Indraratna, Jayanathan e Brown (2008), Indraratna,

Oliveira e Brown (2010), Indraratna *et al.* (2010, 2014, 2015), Indraratna, Premadasa e Brown (2013), Oliveira e Indraratna (2010), Shrivastava e Rao (2018), Leite (2019), Leite *et al.* (2019), Leite, Dantas Neto e Albino (2019), entre outros. O efeito mais pronunciado da presença do preenchimento é de separar as paredes das descontinuidades e, portanto, reduzir o contato entre o material rochoso, além de fazer com que a resistência ao cisalhamento da descontinuidade seja dependente de suas propriedades e das características das interfaces entre as paredes rochosas e o preenchimento (PAPALIANGAS *et al.*, 1993).

Modelos analíticos foram desenvolvidos, como os apresentados por Ladanyi e Archambault (1977), Papaliangas *et al.* (1993) e Oliveira e Indraratna (2010), que buscam estimar o comportamento cisalhante de descontinuidades com preenchimento. No entanto, mesmo que essas formulações promovam maiores conhecimentos a respeito da influência do preenchimento no cisalhamento das descontinuidades e das variáveis que governam esse processo, com frequência, a aplicação delas se torna difícil, em virtude, por exemplo, da necessidade de cálculo de diversos parâmetros inerentes aos modelos.

Devido às dificuldades que envolvem as formulações analíticas, Leite (2019), Leite *et al.* (2019) e Leite, Dantas Neto e Albino (2019) apresentaram modelos que utilizam redes neurais artificiais para estimar a tensão de cisalhamento, a dilatância e a tensão cisalhante de pico em descontinuidades rochosas, contemplando a presença do material de preenchimento. Esses modelos forneceram resultados satisfatórios quando comparados com os dados experimentais utilizados em seus desenvolvimentos, em descontinuidades limpas e preenchidas, mostrando a funcionalidade das redes neurais artificiais na previsão do comportamento cisalhante das descontinuidades com preenchimento.

Mesmo que os modelos em redes neurais artificiais de Leite (2019) forneçam resultados de maneira rápida e prática, eles não contemplam as incertezas presentes nos dados de entrada, o que ocorre com frequência no meio geotécnico. Em virtude disso, a motivação do presente trabalho fundamenta-se no desenvolvimento de modelos neuro-fuzzy para a previsão do comportamento cisalhante das descontinuidades rochosas com e sem preenchimento, utilizando a capacidade de aprendizagem das redes neurais artificiais em representar um fenômeno complexo, não linear e com muitas variáveis, na elaboração de conjuntos fuzzy, considerando as incertezas presentes nos dados de entrada.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Desenvolver modelos neuro-fuzzy do tipo ANFIS para a previsão do comportamento cisalhante de descontinuidades rochosas com e sem preenchimento.

1.2.2 Objetivos específicos

De maneira a atender o objetivo geral do trabalho, apresentam-se os seguintes objetivos específicos:

- Modelar sistemas neuro-fuzzy do tipo ANFIS que realizem previsões da tensão cisalhante e da dilatação obtidas no processo de cisalhamento das descontinuidades rochosas com e sem preenchimento;
- Verificar o desempenho dos modelos desenvolvidos, comparando os resultados estimados com dados experimentais;
- Avaliar a capacidade dos modelos neuro-fuzzy em representar a influência das principais variáveis que governam o comportamento cisalhante das descontinuidades rochosas;
- Comparar os resultados fornecidos pelos sistemas neuro-fuzzy com os obtidos por outros modelos existentes;
- Contribuir com o desenvolvimento de modelos que possam estimar o comportamento cisalhante das descontinuidades rochosas com e sem preenchimento.

1.3 Metodologia

Inicialmente, o trabalho fundamenta-se no estudo dos fatores governantes do comportamento cisalhante das descontinuidades rochosas com e sem preenchimento, avaliando parte dos modelos existentes que buscam estimá-lo. Em seguida, a pesquisa se desenvolveu em torno dos aspectos inerentes à modelagem em engenharia por meio de sistemas inteligentes, sendo compreendidos os principais conceitos a respeito das redes neurais artificiais, da lógica fuzzy e das técnicas neuro-fuzzy.

O trabalho se sucedeu a partir da coleta de dados de ensaios de cisalhamento direto realizados em descontinuidades rochosas, os quais foram apresentados por diversos autores. Com base nesses dados, foram definidas as variáveis de entrada utilizadas nos sistemas neuro-fuzzy desenvolvidos, de maneira a considerar os principais fatores que influenciam o comportamento cisalhante dessas estruturas. Assim, após o estabelecimento de diferentes configurações de modelos, foram desenvolvidos sistemas neuro-fuzzy do tipo ANFIS com o uso do *software* MATLAB, para as previsões de tensão cisalhante e de dilatância em função do deslocamento cisalhante inerente ao processo de cisalhamento das descontinuidades rochosas com e sem preenchimento.

A definição dos sistemas ANFIS para a previsão do comportamento cisalhante das descontinuidades rochosas fundamentou-se na correlação entre os resultados fornecidos pelos modelos e os dados experimentais utilizados, e na verificação da influência das variáveis de entrada nos valores de dilatância e de tensão de cisalhamento previstos. Por fim, os sistemas definidos foram submetidos a um processo de validação, em que suas estimativas foram comparadas com os dados experimentais utilizados na modelagem, além de suas previsões serem, por vezes, relacionadas com as fornecidas por outros modelos existentes, considerando descontinuidades experimentais e hipotéticas.

1.4 Escopo do trabalho

A dissertação é composta por seis capítulos. O Capítulo 1 é referente à introdução apresentada, em que se destacam a motivação da pesquisa, os objetivos, a metodologia utilizada e o escopo do trabalho. Posteriormente, no Capítulo 2, é discorrido a respeito das variáveis governantes do comportamento cisalhante das descontinuidades rochosas com e sem preenchimento, além de serem destacados diversos modelos existentes que buscam prevê-lo, avaliando as respectivas premissas e limitações.

O Capítulo 3 é referente à aplicação de sistemas inteligentes em engenharia. Inicialmente, aborda-se a respeito dos principais conceitos inerentes à lógica fuzzy. Em seguida, são apresentados os princípios básicos que envolvem as redes neurais artificiais e os sistemas neuro-fuzzy do tipo ANFIS, destacando diversas aplicações destes sistemas em Mecânica das Rochas.

O Capítulo 4 aborda as etapas metodológicas utilizadas no presente trabalho. São detalhados os processos que levaram ao desenvolvimento dos sistemas neuro-fuzzy do tipo ANFIS para as previsões da dilatância e da tensão de cisalhamento em descontinuidades

rochosas com e sem preenchimento. Além disso, são apresentados todos os critérios de seleção, avaliação, definição e validação dos sistemas desenvolvidos.

O Capítulo 5 apresenta os resultados referentes aos processos de modelagem, seleção, definição e validação dos sistemas neuro-fuzzy do tipo ANFIS para a previsão do comportamento cisalhante das descontinuidades rochosas com e sem preenchimento. Neste capítulo, ainda são discutidas as limitações dos modelos definidos.

No Capítulo 6, abordam-se as conclusões da pesquisa e as possíveis sugestões para trabalhos futuros. Inicialmente, são feitos comentários relacionando os resultados obtidos com os objetivos traçados no trabalho. Em seguida, tópicos referentes à necessidade de pesquisas futuras são apresentados, visando a melhoria e a análise dos modelos de previsão do comportamento cisalhante das descontinuidades rochosas.

Por fim, são apresentadas as referências bibliográficas citadas na dissertação e, em seguida, os apêndices. O Apêndice A ilustra todas as regras de inferência fuzzy do modelo ANFIS definido para a previsão da dilatância, obtida no processo de cisalhamento das descontinuidades rochosas com e sem preenchimento. No caso do Apêndice B, as regras de inferência fuzzy do modelo ANFIS definido para a previsão da tensão de cisalhamento são apresentadas.

CAPÍTULO 2: COMPORTAMENTO CISALHANTE DAS DESCONTINUIDADES ROCHOSAS

2.1 Introdução

O presente capítulo aborda os principais fatores que influenciam o comportamento cisalhante das descontinuidades rochosas, apresentando modelos existentes que visam estimá-lo. Inicialmente, no Item 2.2, discorre-se a respeito das descontinuidades sem preenchimento. Em seguida, no Item 2.3, são discutidos os aspectos mais importantes da influência do material de preenchimento no processo de cisalhamento das descontinuidades. Por fim, no Item 2.4, são apresentadas as conclusões parciais do capítulo.

2.2 Descontinuidades rochosas sem preenchimento

2.2.1 Variáveis governantes

A correta avaliação da resistência ao cisalhamento das descontinuidades rochosas desempenha um importante papel, por exemplo, no projeto de escavações em rochas, na análise de estabilidade de taludes rochosos, e no projeto de fundações em maciços rochosos (INDRARATNA, HAQUE e AZIZ, 1998; HAQUE, 1999). Ao longo do tempo, essa avaliação frequentemente tem sido realizada na condição de carregamento normal constante, *Constant Normal Loading* (CNL), em que a tensão normal ao plano de cisalhamento é mantida constante.

Pesquisas, como as de Patton (1966), Ladanyi e Archambault (1970), Barton (1973a, 1976), Barton e Choubey (1977), Bandis, Lumsden e Barton (1981), entre outras, consideraram a condição CNL em seus modelos de previsão do comportamento cisalhante das descontinuidades rochosas. No entanto, a condição CNL não ocorre sempre, tendo em vista que o maciço circundante pode oferecer certa rigidez ao deslocamento normal advindo do processo de cisalhamento da descontinuidade, o que promove o aumento das tensões, normal e de cisalhamento, no plano da descontinuidade, resultando em uma condição de rigidez normal constante, *Constant Normal Stiffness* (CNS) (INDRARATNA, HAQUE E AZIZ, 1998, 1999; HAQUE, 1999; SKINAS, BANDIS E DEMIRIS, 1990; OLIVEIRA, 2009; SHRIVASTAVA E RAO, 2018).

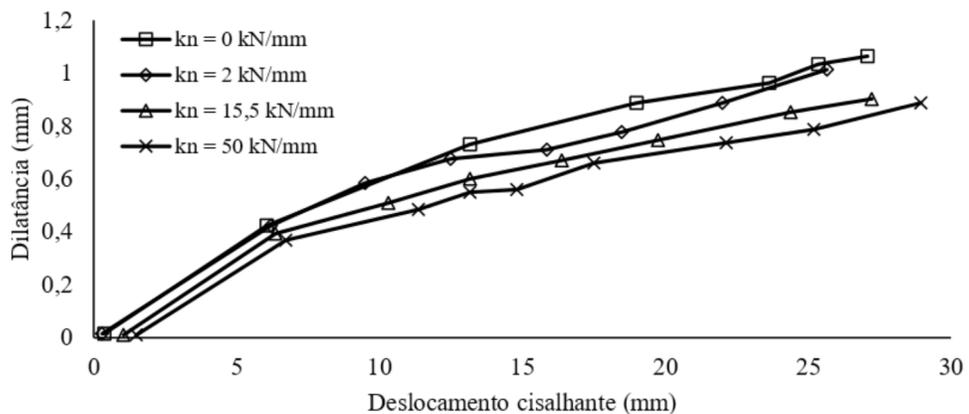
Indraratna, Haque e Aziz (1998) apresentam diversas situações em que a condição CNS pode vir a acontecer, como em uma escavação subterrânea em maciço rochoso fraturado, onde os blocos adjacentes vão oferecer determinada rigidez aos deslocamentos dos demais. Além disso, observa-se a condição CNS na utilização de estacas de concreto em maciços rochosos, como apontado por Johnstone e Lam (1989).

Skinas, Bandis e Demiris (1990) ressaltam que a rigidez de uma massa rochosa é uma condição variável do sistema, podendo assumir valores muito baixos próximos da superfície a valores muito altos com o aumento da profundidade. Os autores apontam, ainda, que um módulo de deformação equivalente à massa rochosa pode ser utilizado com o objetivo de estimar um valor para essa rigidez, mas essa abordagem é simplificada, e pode ser útil somente ao analisar a estabilidade de blocos isolados, devendo haver um tratamento mais rigoroso das análises em situações que envolvam o comportamento global de maciços rochosos.

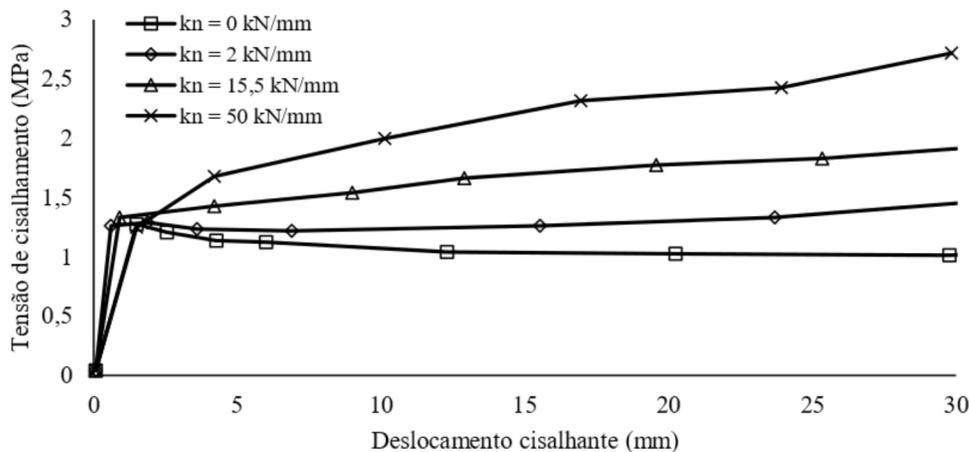
Em virtude da importância da rigidez imposta pelo maciço rochoso circundante no comportamento cisalhante das descontinuidades, as pesquisas passaram a considerar a condição CNS e a rigidez normal de contorno (k_n), de maneira a representar os problemas observados em campo. Byerlee e Brace (1968) e Obert, Brady e Shmechel (1976) fizeram as primeiras contribuições, apresentando o efeito da rigidez normal de contorno no comportamento cisalhante em rochas. Posteriormente, Leichnetz (1985) e Benmokrane e Ballivy (1989) realizaram ensaios experimentais em descontinuidades rugosas e observaram a expressiva influência da rigidez normal de contorno no desenvolvimento das tensões cisalhantes durante o cisalhamento das descontinuidades rochosas.

Skinas, Bandis e Demiris (1990), Indraratna, Haque e Aziz (1998, 1999), Shrivastava e Rao (2018), entre outros, comparam os valores de dilatância e de tensão cisalhante obtidos de ensaios de cisalhamento direto em descontinuidades rochosas sem preenchimento sob condições CNL e CNS. Foram observados valores inferiores de dilatância e maiores tensões de cisalhamento na condição CNS, quando os dados são comparados com os obtidos na condição CNL, como exposto nas Figuras 1-a e 1-b, que ilustra os resultados apresentados por Skinas, Bandis e Demiris (1990).

Figura 1 - Comparação entre os resultados experimentais de descontinuidades submetidas às condições CNL ($k_n = 0$ kN/mm) e CNS, em (a) Dilatância e (b) Tensão de cisalhamento.



(a)



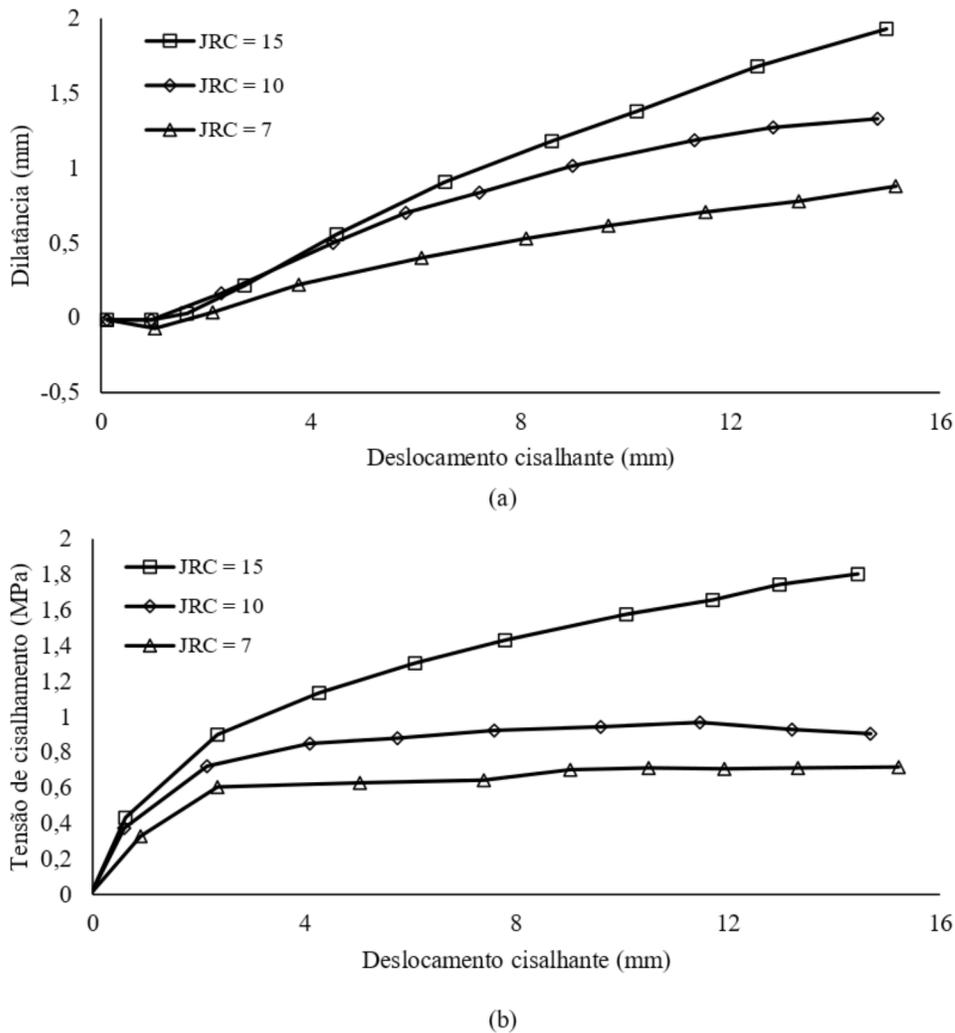
(b)

Fonte: Adaptado de Skinas, Bandis e Demiris (1990).

A rugosidade da descontinuidade rochosa também é uma variável que influencia no seu comportamento cisalhante. Um parâmetro que mensura a rugosidade presente em uma descontinuidade é o *Joint Roughness Coefficient* (JRC), proposto por Barton (1973a), cujo valor varia numa escala de 0 a 20, em ordem crescente de rugosidade.

A Figura 2 expõe os resultados provenientes do cisalhamento imposto em descontinuidades rochosas sob condição CNS, apresentados por Indraratna *et al.* (2015), em que ilustra a influência de JRC na dilatância e na tensão de cisalhamento. Pelas Figuras 2-a e 2-b, observam-se maiores valores de dilatância e de tensões cisalhantes com o aumento de JRC.

Figura 2– Influência da rugosidade, em (a) Dilatância e (b) Tensão de cisalhamento.



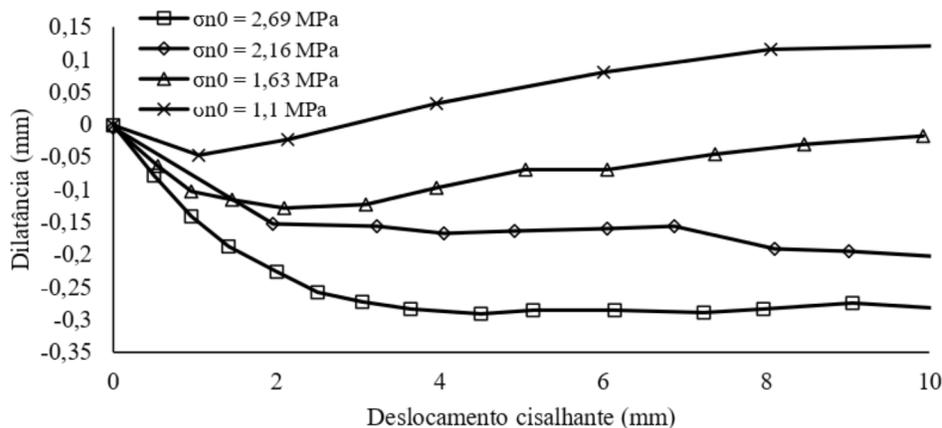
Fonte: Adaptado de Indraratna *et al.* (2015)

No caso da tensão normal inicial (σ_{n0}) atuante nas descontinuidades, seu efeito no comportamento cisalhante dessas estruturas foi estudado em diversas pesquisas, como nos trabalhos de Barton (1973a), Barton e Choubey (1977), Skinas, Bandis e Demiris (1990), Haque (1999), Indraratna, Haque e Aziz (1998, 1999), Indraratna *et al.* (2015), entre outros. As Figuras 3-a e 3-b ilustram a influência da tensão normal inicial nos valores obtidos de dilatância e de tensão cisalhante, respectivamente, nos processos de cisalhamento impostos em descontinuidades rochosas, apresentados por Haque (1999).

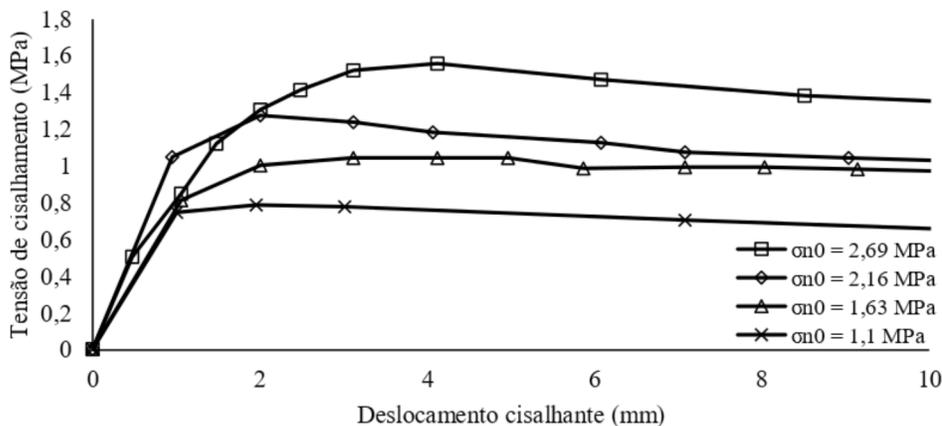
Pela Figura 3-a, observa-se que o aumento da tensão normal inicial promove a redução da dilatância obtida no processo de cisalhamento da descontinuidade, podendo fazer com que ocorram valores negativos, o que representa a aproximação das paredes da rocha. A

Figura 3-b mostra que o aumento da tensão normal inicial resulta em maiores tensões cisalhantes na descontinuidade rochosa, gerando maiores tensões de cisalhamento de pico.

Figura 3 – Influência da tensão normal inicial, em (a) Dilatância e (b) Tensão de cisalhamento.



(a)



(b)

Fonte: Adaptado de Haque (1999).

Oliveira (2009) ressalta que o aumento da tensão normal provocado pela rigidez normal de contorno é menos evidente quando a descontinuidade se encontra submetida à alta tensão normal inicial e, quando se encontra sob essa condição, ocorre o maior risco de degradação das asperezas. Premadasa (2013) cita que o efeito da tensão normal pode ser diferente em descontinuidades que estejam muito úmidas, uma vez que, nesses casos, pode ocorrer a contração da descontinuidade no processo de cisalhamento.

A consideração das propriedades do material rochoso constituinte da descontinuidade, em grande parte dos modelos analíticos para a previsão do comportamento cisalhante das descontinuidades rochosas, tem como base a resistência à compressão uniaxial da rocha intacta (σ_c), o coeficiente JCS (*Joint Compressive Strength*), que pode ser obtido por

meio do ensaio de esclerometria diretamente das paredes rochosas da descontinuidade, e o ângulo de atrito básico da rocha intacta (ϕ_b), que corresponde ao ângulo de atrito da rocha na situação em que ela não apresenta asperezas (PATTON, 1966; BARTON, 1973a; BARTON e CHOUBEY, 1977; BARTON e BANDIS, 1990; INDRARATNA e HAQUE, 2000). Barton (1973a) cita que a resistência à compressão uniaxial da rocha presente nas paredes das descontinuidades rugosas representa um importante componente da tensão de cisalhamento de pico, concluindo que qualquer processo que reduza essa resistência, como a umidade ou a saturação, deve promover uma redução na tensão de cisalhamento de pico das descontinuidades.

A rocha constituinte das paredes rugosas das descontinuidades apresenta a função fundamental de permitir com que o processo de cisalhamento ocorra, uma vez que, durante esse fenômeno, as asperezas são solicitadas, e um material rochoso que não apresente resistência ao cisalhamento suficiente para suportar as tensões que são impostas permitirá a quebra das asperezas, como discutido nos trabalhos de Ladanyi e Archambault (1970), Barton e Bandis (1990), Indraratna, Haque e Aziz (1998, 1999), Indraratna *et al.* (2015), entre outros.

A presença da água pode promover, basicamente, dois efeitos: o desenvolvimento da poropressão e a alteração das propriedades físico-químicas dos materiais constituintes das descontinuidades rochosas. O desenvolvimento da poropressão pode se relacionar diretamente com a condição de drenagem, sendo que, em condições não drenadas, há o aumento da poropressão, o que interfere nas propriedades de resistência ao cisalhamento das descontinuidades (PREMADASA, 2013).

É válido ressaltar que a água é um dos principais agentes que promovem o intemperismo dos maciços rochosos. A sua presença pode ocasionar no surgimento do material de preenchimento presente nas descontinuidades, advindo do intemperismo da rocha intacta, ou por transporte de material do meio externo. O material de preenchimento, como será apresentado no Item 2.3, possui fundamental importância no comportamento cisalhante das descontinuidades rochosas.

2.2.2 Modelos para estimativa do comportamento cisalhante das descontinuidades sem preenchimento

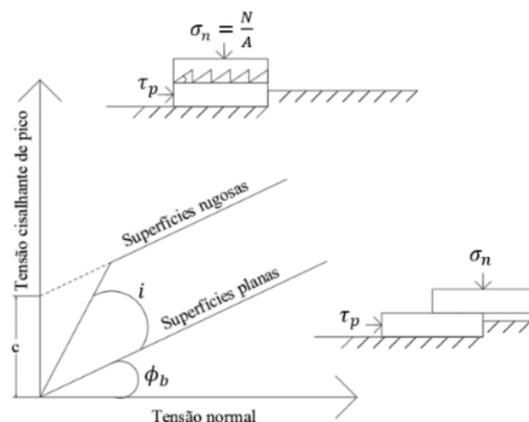
Com o objetivo de representar matematicamente o comportamento cisalhante das descontinuidades rochosas sem preenchimento, diversos modelos foram desenvolvidos, considerando os fatores que governam o cisalhamento dessas estruturas. A seguir, são apresentados maiores detalhes a respeito dos modelos de Patton (1966), Barton (1973a), Barton

e Choubey (1977), Barton e Bandis (1990), Skinas, Bandis e Demiris (1990), Indraratna e Haque (2000), Dantas Neto *et al.* (2017) e Matos (2018).

Patton (1966), a partir de ensaios de cisalhamento direto em descontinuidades sob condição CNL, concluiu que as envoltórias de ruptura das descontinuidades rugosas sem preenchimento apresentariam caráter não linear, além de que as variações de inclinação em uma envoltória refletiriam as mudanças no modo de ruptura. Essas mudanças estariam relacionadas com as propriedades físicas das irregularidades, ou asperezas, ao longo da superfície.

A Figura 4 retrata o modelo proposto por Patton (1966). Pela figura, observa-se que descontinuidades com superfícies rugosas apresentam, inicialmente, uma envoltória de ruptura com inclinação superior à envoltória apresentada quando a superfície da descontinuidade é plana, sendo essa diferença entre as inclinações dependente do ângulo (i) das asperezas constituintes da descontinuidade. Com o prosseguimento do processo de cisalhamento imposto, ocorre o cisalhamento das asperezas, fazendo com que a inclinação da envoltória de ruptura, a partir desse momento, seja a mesma da descontinuidade plana, em função de ϕ_b .

Figura 4 – Representação do modelo de Patton (1966).



Fonte: Adaptado de Patton (1966).

Patton (1966) propôs as Equações 1 e 2, sendo que a Equação 1 representa a fase caracterizada pelo deslizamento entre as asperezas e, a Equação 2, ocorre após esse deslizamento, quando há o cisalhamento das asperezas.

$$\tau_p = \sigma_n \tan(\phi_b + i) \quad (1)$$

$$\tau_p = c + \sigma_n \tan(\phi_b) \quad (2)$$

Onde:

τ_p : tensão cisalhante de pico;

σ_n : tensão normal atuante;
 ϕ_b : ângulo de atrito básico da rocha intacta;
i: ângulo inicial da aspereza;
c: intercepto.

Barton (1973a), a partir da realização de ensaios de cisalhamento direto em descontinuidades rochosas sob condição CNL, propôs um modelo não linear para a previsão da tensão cisalhante de pico, representado na Equação 3.

$$\tau_p/\sigma_n = \tan\left(JRC \log_{10}\left(\frac{JCS}{\sigma_n}\right) + \phi_b\right) \quad (3)$$

Barton e Choubey (1977) propuseram alterações no modelo de Barton (1973a), com a consideração do ângulo de atrito residual (ϕ_r) no lugar de ϕ_b , para a previsão da tensão cisalhante de pico de descontinuidades rochosas sob condição CNL, de acordo com a Equação 4. O ângulo ϕ_r pode ser estimado com o uso da Equação 5.

$$\tau_p/\sigma_n = \tan\left(JRC \log_{10}\left(\frac{JCS}{\sigma_n}\right) + \phi_r\right) \quad (4)$$

$$\phi_r = (\phi_b - 20^\circ) + 20 (r/R) \quad (5)$$

Onde:

r: valor obtido no ensaio de esclerometria em superfícies de descontinuidades úmidas;

R: valor obtido no ensaio de esclerometria em superfícies de descontinuidades secas.

A Equação 6 representa o modelo para o cálculo da tensão cisalhante de pico em descontinuidades sem preenchimento sob condição CNL proposto por Barton e Bandis (1990).

$$\tau_p/\sigma_n = \tan\left(JRC_{mob} \log_{10}\left(\frac{JCS}{\sigma_n}\right) + \phi_b\right) \quad (6)$$

Onde:

JRC_{mob} : JRC mobilizado.

É válido ressaltar que o JCS pode ser estimado, em campo, pela Equação 7.

$$JCS = JCS_o (L/L_o)^{-0,03JRC_o} \quad (7)$$

Onde:

JCS_o : JCS obtido em escala de laboratório;

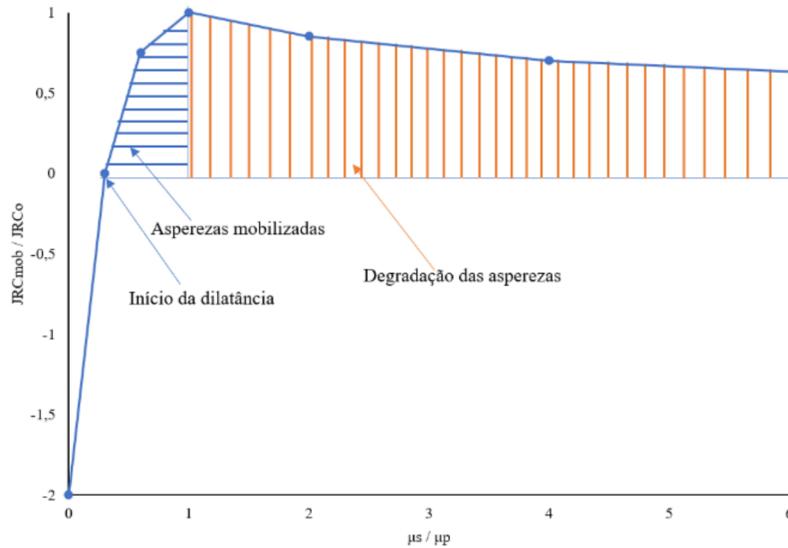
L : Comprimento da descontinuidade em campo;

L_o : Comprimento da descontinuidade em escala de laboratório;

JRC_o : JRC obtido em escala de laboratório.

O JRC mobilizado é um parâmetro que considera o processo de quebra e de danos provenientes do processo de cisalhamento das asperezas constituintes das descontinuidades. O JRC_{mob} é relacionado com o deslocamento cisalhante (u_s) e com o deslocamento cisalhante de pico (u_p), conforme apresentado na Figura 5.

Figura 5 – Relação entre JRC_{mob} e o deslocamento cisalhante normalizado (μ_s/μ_p).



Fonte: Adaptado de Barton e Bandis (1990).

O deslocamento cisalhante de pico pode ser estimado, empiricamente, pela aplicação da Equação 8.

$$u_p = \frac{L}{500} \left[\frac{JRC}{L} \right]^{0,33} \quad (8)$$

Os incrementos na tensão de cisalhamento são obtidos a partir das Equações 9 e 10, enquanto a variação do deslocamento normal pode ser calculada por meio da Equação 11.

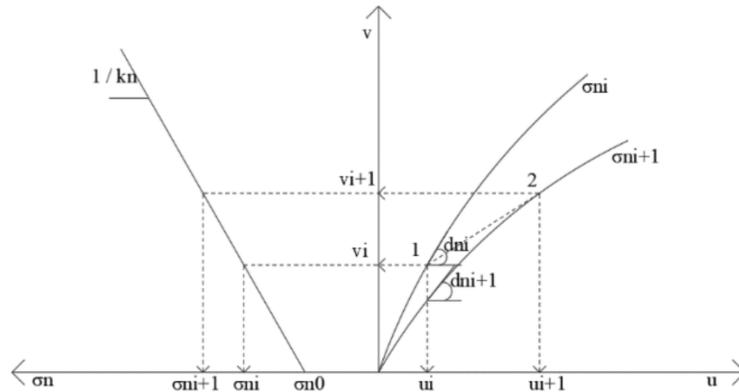
$$\Delta\tau = \Delta u_s \sigma_n \left(\frac{\tan(0,75\phi_b)}{0,2u_p} \right) L \text{ para } \left(\frac{u_s}{u_p} \right) < 0,2 \quad (9)$$

$$\Delta\tau = \Delta u_s \sigma_n \left(\frac{\tan(0,25\phi_b)}{0,1u_p} \right) L \text{ para } \left(\frac{u_s}{u_p} \right) > 0,2 \quad (10)$$

$$\Delta u_n = \Delta u_s \tan \left(0,5JRC_{mob} \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) \right) \quad (11)$$

Considerando a rigidez normal de contorno presente no processo de cisalhamento das descontinuidades rochosas, ou seja, a condição CNS, Skinas, Bandis e Demiris (1990) apresentaram um modelo analítico e gráfico para a estimativa do comportamento cisalhante de descontinuidades rochosas sem preenchimento. Expostas na Figura 6, cada curva presente no lado direito do gráfico representa a variação do deslocamento normal em função do deslocamento cisalhante em determinada tensão normal constante. A reta do lado esquerdo, por sua vez, relaciona os deslocamentos normais com as tensões normais atuantes para determinada rigidez normal de contorno.

Figura 6 – Procedimento para o cálculo da dilatância sob condição CNS.



Fonte: Adaptado de Skinas, Bandis e Demiris (1990).

Escolhendo certo ponto da curva, por exemplo, o Ponto 1, em determinado momento do processo de cisalhamento da descontinuidade, ele apresenta tensão normal σ_{ni} , deslocamento cisalhante u_i e deslocamento normal v_i . Com o decorrer do processo de cisalhamento, o deslocamento cisalhante adquire um novo valor, dado pela posição u_{i+1} , o deslocamento normal irá sofrer uma variação até o valor de v_{i+1} , dependendo da mudança na tensão normal ($\Delta\sigma$). Essa nova configuração (Ponto 2) se refere à outra curva representativa da tensão normal σ_{ni+1} . A posição desse ponto pode ser estimada a partir das Equações 12 e 13.

$$v_{i+1} = v_i + (u_{i+1} - u_i) \tan(d_{ni+1}) \quad (12)$$

$$\sigma_{ni+1} = \sigma_{ni} + k_n(v_{i+1} - v_i) \quad (13)$$

Onde:

d_{ni+1} : o ângulo de dilatância = $\arctan(\Delta v/\Delta u)$;

Δv : variação do deslocamento normal;

Δu : variação do deslocamento cisalhante;

k_n : rigidez normal de contorno.

Skinas, Bandis e Demiris (1990) ressaltam que a constante k_n pode ser calculada por meio da Equação 14, sendo que essa estimativa só é válida para descontinuidades confinadas em um maciço rochoso.

$$k_n = \frac{E \cdot L'}{2 \cdot c(1 - v^2)} \quad (14)$$

Onde:

E: módulo de Young da rocha;

L': comprimento retangular do bloco da descontinuidade;

c: constante;

v: o módulo de Poisson da rocha.

A variação do deslocamento normal (Δv) em função da variação do deslocamento cisalhante (Δu) é calculada com o uso do conceito de ângulo de dilatância mobilizado (d_{nmob}), por meio das Equações 15 e 16.

$$\Delta v = \Delta u \cdot \tan(d_{nmob}) \quad (15)$$

$$d_{nmob} = \frac{1}{M} JRC_{mob} \log\left(\frac{JCS}{\sigma_n}\right) \quad (16)$$

Onde:

M: coeficiente de dano.

A partir das expressões apresentadas, a Equação 17 representa a resistência ao cisalhamento mobilizada (τ_{mob}).

$$\tau_{mob} = \sigma_{ni+1} \tan\left[JRC_{mob}^{u_{i+1}} \log\left(\frac{JCS}{\sigma_{ni+1}}\right) + \phi_r\right] \quad (17)$$

Indraratna e Haque (2000) apresentaram um modelo para o cálculo da dilatância e da tensão de cisalhamento em função do deslocamento cisalhante de descontinuidades rochosas

sem preenchimento, sob condições CNL e CNS, por meio do uso da série de Fourier. Inicialmente, após a realização do ensaio de cisalhamento direto, os dados de dilatação em função do deslocamento cisalhante são interpolados pela série de Fourier por meio da Equação 18. Em seguida, a tensão normal obtida no processo de cisalhamento é estimada pela Equação 19, com o consequente cálculo da tensão de cisalhamento por meio da Equação 20.

$$\delta_v(\delta_h) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(2\pi n \delta_h / T) + b_n \sin(2\pi n \delta_h / T)] \quad (18)$$

$$\sigma_n = \sigma_{n0} + \Delta\sigma_{n,h} = \sigma_{n0} + \frac{k_n \delta_v(\delta_h)}{A} \quad (19)$$

$$\tau(\delta_h) = \left(\sigma_{n0} + \frac{k_n \delta_v(\delta_h)}{A} \right) \left[\frac{\tan(\phi_b) + \tan(i_0)}{1 - \tan(\phi_b) \cdot \tan(i_h)} \right] \quad (20)$$

Onde:

δ_v : dilatação;

δ_h : deslocamento cisalhante;

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

n : número de harmônicos da série de Fourier;

T : período da série de Fourier;

A : área da superfície da descontinuidade;

i_0 : ângulo inicial das asperezas da descontinuidade;

i_h : inclinação da tangente da curva de dilatação em determinado deslocamento cisalhante.

Observa-se que o modelo proposto por Indraratna e Haque (2000) considera diversos fatores que influenciam o comportamento cisalhante das descontinuidades rochosas sem preenchimento sob condições CNL e CNS. No entanto, há a necessidade do cálculo de parâmetros inerentes à série de Fourier, o que pode fazer com que o modelo ofereça certa dificuldade para o usuário. Outro fator, apontado por Dantas Neto *et al.* (2017), é que os resultados obtidos experimentalmente somente podem representar o comportamento esperado em campo quando as condições de contorno nos ensaios são compatíveis com as condições em campo, o que nem sempre ocorre, em virtude da instrumentação presente no laboratório, ou em decorrência do processo de amostragem.

Como alternativa às formulações analíticas, Dantas Neto *et al.* (2017) apresentaram um modelo para a previsão do comportamento cisalhante das descontinuidades rochosas sem preenchimento a partir de redes neurais artificiais (RNA). A RNA que apresentou o melhor

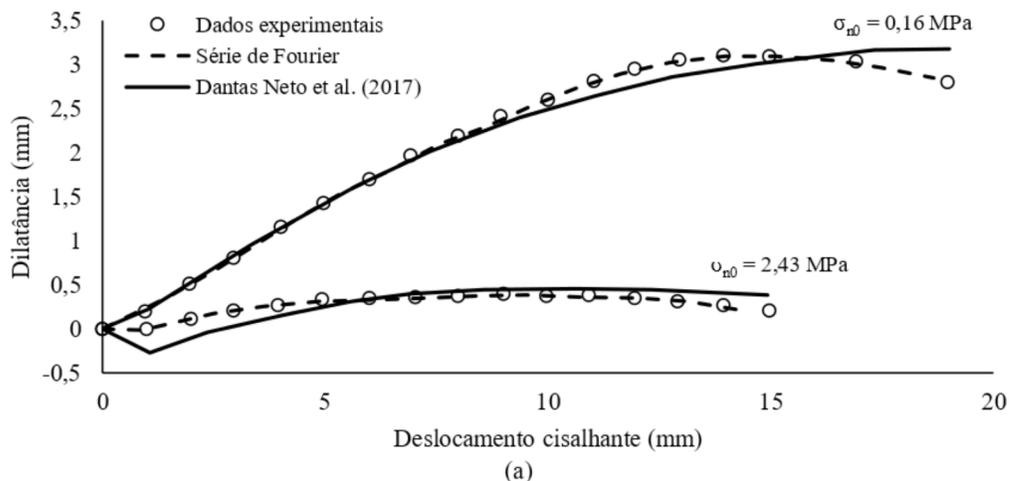
desempenho foi treinada e validada por uma série de dados provenientes de 44 ensaios de cisalhamento direto de estudos realizados por diversos autores, possuindo a arquitetura A:6-15-2, em que o primeiro número diz respeito à quantidade de variáveis de entrada, o segundo número, à quantidade de neurônios da camada oculta e, o terceiro, à quantidade de variáveis de saída da rede neuronal.

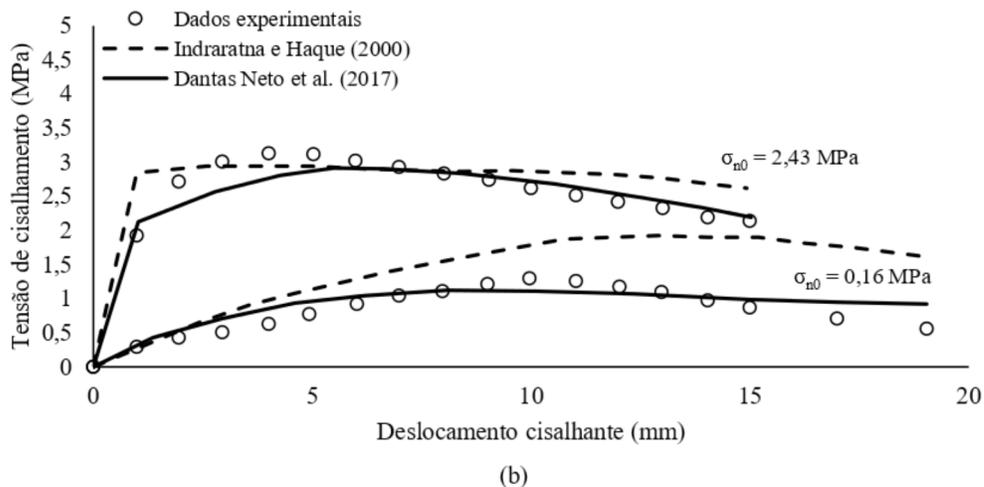
As variáveis de entrada utilizadas no desenvolvimento do modelo neuronal de Dantas Neto *et al.* (2017) são a rigidez normal de contorno (k_n), em kPa/mm; a tensão normal inicial (σ_{n0}), em MPa; JRC; resistência à compressão uniaxial da rocha intacta (σ_c), em MPa; ângulo de atrito básico da rocha (ϕ_b), em graus, e o deslocamento cisalhante (h), em mm. As variáveis de saída obtidas são a dilatância, em mm, e a tensão cisalhante, em kPa, em todo o processo de cisalhamento das descontinuidades.

O modelo apresentou resultados satisfatórios quando comparados com os dados experimentais utilizados em seu desenvolvimento. As Figuras 7-a e 7-b expõem a comparação entre os resultados de dilatância e de tensão de cisalhamento, respectivamente, fornecidos pelos modelos de Dantas Neto *et al.* (2017) e Indraratna e Haque (2000), e os dados experimentais obtidos em descontinuidades brandas, sem preenchimento, sob diferentes tensões normais iniciais, apresentados por Indraratna e Haque (2000).

Pela Figura 7-a, observa-se que os dois modelos representaram de maneira satisfatória a dilatância obtida no processo de cisalhamento das descontinuidades. Pela Figura 7-b, nota-se que o modelo de Dantas Neto *et al.* (2017) estimou valores para a tensão de cisalhamento mais próximos dos experimentais que os resultados fornecidos pelo modelo analítico de Indraratna e Haque (2000), principalmente para menores tensões normais iniciais.

Figura 7 – Comparação entre os resultados fornecidos pelos modelos de Dantas Neto *et al.* (2017) e de Indraratna e Haque (2000), para (a) Dilatância e (b) Tensão de cisalhamento.



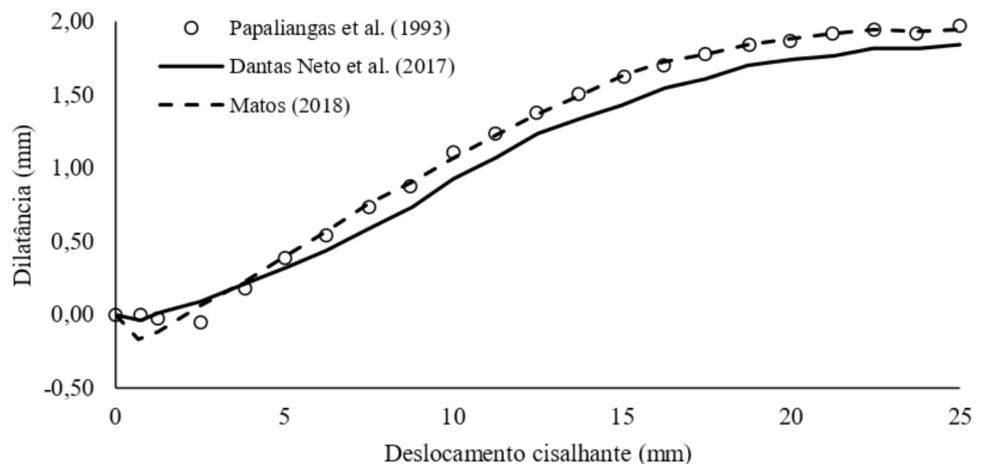


Com o objetivo de contemplar a variabilidade e/ou incerteza coerentes com os processos de aquisição e de medição dos dados referentes às descontinuidades rochosas sem preenchimento, Matos (2018) apresentou um modelo combinando o processo de aprendizagem das RNA com a lógica fuzzy, a partir do conceito de um modelo neuro-fuzzy do tipo ANFIS (*Adaptive-Neuro-Based Fuzzy Inference System*).

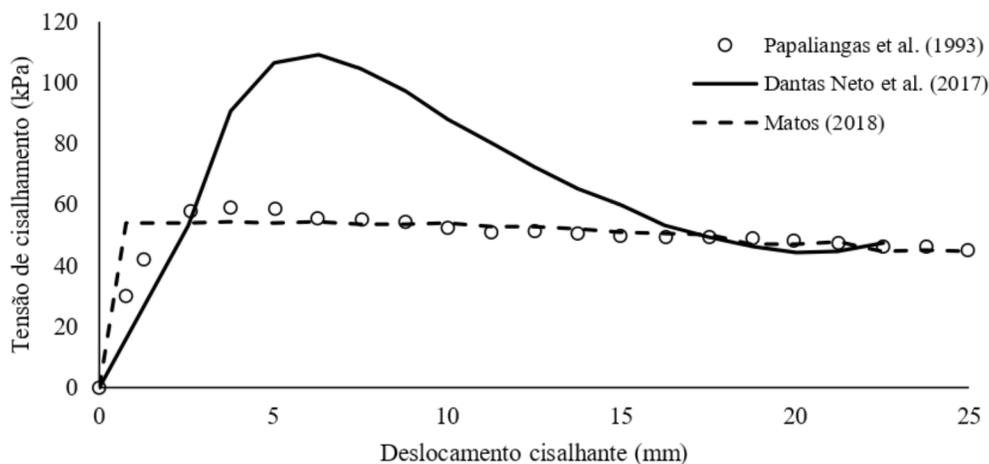
Utilizando as mesmas variáveis de entrada e de saída do modelo de Dantas Neto *et al.* (2017), o modelo proposto por Matos (2018) foi desenvolvido por meio da técnica de repartição em grades, apresentando duas funções de pertinência do tipo gaussiana para todas as variáveis. O modelo neuro-fuzzy definido apresenta 64 regras de inferência para o cálculo da dilatância e da tensão de cisalhamento, obtendo resultados satisfatórios quando comparados com os dados experimentais utilizados em seu desenvolvimento.

As Figuras 8-a e 8-b expõem a comparação entre os resultados fornecidos pelos modelos de Matos (2018) e de Dantas Neto *et al.* (2017), e os dados experimentais obtidos em descontinuidades constituídas por rochas brandas, submetidas à baixas tensões normais iniciais, apresentados por Papaliangas *et al.* (1993). Pela Figura 8-a, nota-se que os modelos estimaram a dilatância em função do deslocamento cisalhante de maneira satisfatória, uma vez que seus resultados foram próximos dos experimentais. No caso da tensão de cisalhamento, representada na Figura 8-b, é possível observar que o modelo de Matos (2018) estimou valores mais próximos dos obtidos experimentalmente, uma vez que o modelo de Dantas Neto *et al.* (2017) superestimou a tensão de cisalhamento de pico.

Figura 8 – Comparação dos resultados fornecidos pelos modelos de Matos (2018) e de Dantas Neto *et al.* (2017) para (a) Dilatância e (b) Tensão de cisalhamento.



(a)



(b)

Fonte: Adaptado de Matos (2018).

Matos (2018) ressalta que os modelos neuro-fuzzy do tipo ANFIS desenvolvidos são limitados pelos domínios das variáveis de entrada fornecidas em seu treinamento. Dessa forma, eles não permitem que sejam inseridas em seus dados de entrada medidas que estejam fora do seu intervalo de atuação preestabelecido. O autor aponta, ainda, que os modelos podem ser modificados de maneira a considerar que novos valores para as variáveis possam ser utilizados com o aumento de dados fornecidos para o seu desenvolvimento.

2.3 Descontinuidades rochosas com preenchimento

2.3.1 A função do material de preenchimento

O efeito mais pronunciado da presença do preenchimento é de separar as paredes das descontinuidades e, portanto, reduzir o contato entre o material rochoso, além de fazer com que a resistência ao cisalhamento da descontinuidade seja dependente de suas propriedades e das características das interfaces entre as paredes de rocha e o preenchimento (PAPALIANGAS *et al.*, 1993). De Toledo e de Freitas (1993) comparam metodologias utilizadas em pesquisas anteriores que buscaram avaliar o papel do preenchimento em diversos tipos de rochas e condições de drenagem, como Goodman (1970), Kanji (1974), Ladanyi e Archambault (1977), Lama (1978), Kutter e Rautenberg (1979), Barla, Forlati e Zaninetti (1985), Bertacchi *et al.* (1986), Papaliangas *et al.* (1990), Pereira (1990), entre outros.

Haque (1999) aponta que os principais fatores que influenciam o comportamento cisalhante das descontinuidades rochosas com preenchimento são o tipo e a espessura do material de preenchimento, a interação preenchimento-rocha, a condição de drenagem, ou seja, drenada ou não drenada, as condições de interface da descontinuidade preenchida e a rigidez normal de contorno inerente ao processo de cisalhamento.

De acordo com Lama (1978), os materiais de preenchimento existentes em descontinuidades rochosas podem ser classificados nas seguintes categorias:

- Material solto trazido da superfície, como areia, argila;
- Advindos da deposição por fluxo de águas subterrâneas contendo produtos de lixiviação de rochas calcáreas ou ferruginosas;
- Material solto tectonicamente de rochas;
- Produtos advindos da decomposição e do intemperismo das descontinuidades.

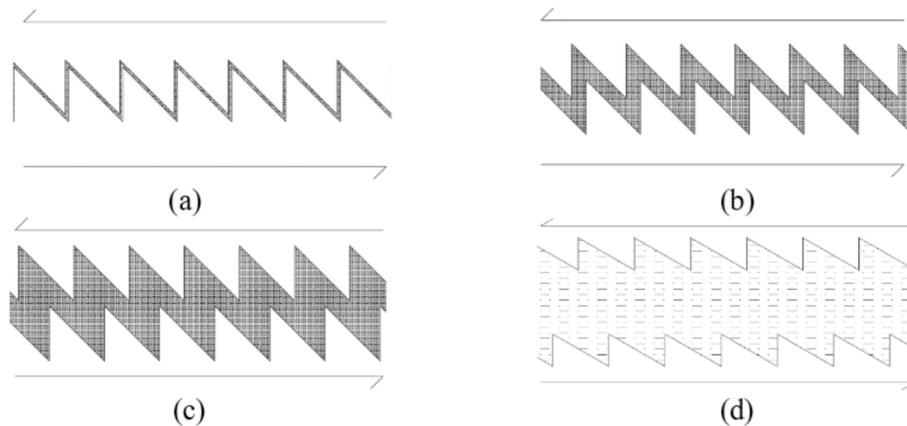
Observa-se uma grande variedade de materiais que podem apresentar a função de preenchimento nas descontinuidades rochosas, possuindo diversas propriedades que vão influenciar o comportamento cisalhante dessas estruturas. Dependendo de uma série de fatores, como o processo de formação do preenchimento e os seus minerais constituintes, ele pode, por exemplo, apresentar características mais coesivas ou não, diferentes valores de ângulo de atrito, etc., influenciando suas respectivas propriedades de resistência ao cisalhamento e, conseqüentemente, o comportamento cisalhante da descontinuidade.

Além das características do material de preenchimento em si, a sua espessura talvez seja a propriedade mais importante no quesito da resistência ao cisalhamento das descontinuidades rochosas que apresentam preenchimento, o que pode ser visto nos trabalhos de Toledo e de Freitas (1993), Indraratna, Haque e Aziz (1999), Indraratna, Welideniya e Brown (2005), Indraratna, Oliveira e Brown (2010), Indraratna *et al.* (2010), Welideniya (2005), Oliveira, Indraratna e Nemcik (2009), Naghadehi (2015), Shrivastava e Rao (2018), entre outros.

Barton (1973b) destacou o papel do preenchimento no comportamento cisalhante das descontinuidades de acordo com as seguintes situações apresentadas na Figura 9:

- a) Observa-se que a espessura do preenchimento é muito pequena, promovendo quase o contato imediato rocha/rocha das paredes da descontinuidade, fazendo com que haja uma pequena diferença da resistência ao cisalhamento nessa condição quando comparada com a descontinuidade sem preenchimento. A dilatância devido ao contato rocha/rocha pode promover o surgimento de poropressões negativas no caso em que a velocidade de cisalhamento seja alta;
- b) Ainda considerada pequena a espessura do preenchimento, pode haver o contato rocha/rocha, mas esse contato ocorre em maiores deslocamentos cisalhantes. A dilatância obtida na resistência ao cisalhamento de pico será menor, uma vez que essa resistência de pico é semelhante à residual em descontinuidades sem preenchimento. Dessa forma, uma vez que há uma reduzida tendência de dilatância, ocorre menos geração de poropressões negativas;
- c) Situação que pode ser considerada como uma espessura moderada de preenchimento, não havendo o contato rocha/rocha das paredes das descontinuidades, mas ocorra o aumento das tensões no preenchimento em pontos localizados próximos das asperezas. Nos casos em que a velocidade de cisalhamento é rápida, irá ocorrer o aumento da poropressão nesses pontos, ocasionando a redução da resistência ao cisalhamento. Por outro lado, quando a velocidade de cisalhamento for lenta, irá ocorrer o processo de drenagem e adensamento;
- d) O preenchimento apresenta uma espessura superior muitas vezes à amplitude das asperezas, fazendo com que não haja a influência das paredes rochosas no comportamento cisalhante da descontinuidade, sendo esse processo governado pelas propriedades do preenchimento e pelos princípios da Mecânica dos Solos.

Figura 9 – Situações de espessura do preenchimento.



Fonte: Adaptado de Barton (1973b).

Ladanyi e Archambault (1977) estudaram o efeito do tipo e da espessura do material de preenchimento no comportamento cisalhante das descontinuidades por meio de ensaios de cisalhamento direto. Entre as considerações apontadas pelos autores, destacam-se:

- A envoltória de ruptura da maioria das descontinuidades preenchidas está localizada entre a do preenchimento e a da descontinuidade sem preenchimento;
- A resistência ao cisalhamento de descontinuidades preenchidas decresce com o aumento da espessura do preenchimento, mas mesmo quando a espessura dele se iguala à amplitude da aspereza, essa resistência ainda é superior quando comparada com a do material de preenchimento;
- As curvas que relacionam as tensões cisalhantes em função dos deslocamentos cisalhantes em descontinuidades preenchidas apresentam com frequência duas parcelas: uma refletindo a deformação do preenchimento antes do contato entre as paredes rochosas, enquanto a outra reflete a deformação e a ruptura do contato entre o preenchimento e as asperezas;
- A dilatância na ruptura decresce com o aumento da tensão normal, havendo a possibilidade de serem obtidos valores negativos, ou seja, ocorrendo compressão, em maiores tensões normais;
- A resistência ao cisalhamento das descontinuidades rochosas preenchidas nem sempre depende da espessura do preenchimento. Uma exceção seria o caso de descontinuidades planas, ou que apresentem baixo coeficiente de atrito, em que o plano de cisalhamento nesses casos localiza-se na interface entre o preenchimento e a rocha;

- Argilas expansivas podem ser os mais perigosos materiais de preenchimento, uma vez que ocorre a redução da resistência ao cisalhamento quando ocorre a expansão, ou altas tensões normais são impostas quando a expansão é restringida.

Frequentemente, a influência da espessura (t) do preenchimento é avaliada por meio da relação com a amplitude (a) das asperezas, através do parâmetro t/a . Dessa forma, avaliam-se os efeitos na dilatância e na tensão de cisalhamento com a variação de t/a . A Figura 10 expõe os resultados experimentais apresentados por Indraratna, Haque e Aziz (1999), em descontinuidades submetidas à condição CNS, sendo possível observar o efeito da variação de t e, conseqüentemente, t/a , no comportamento cisalhante das descontinuidades.

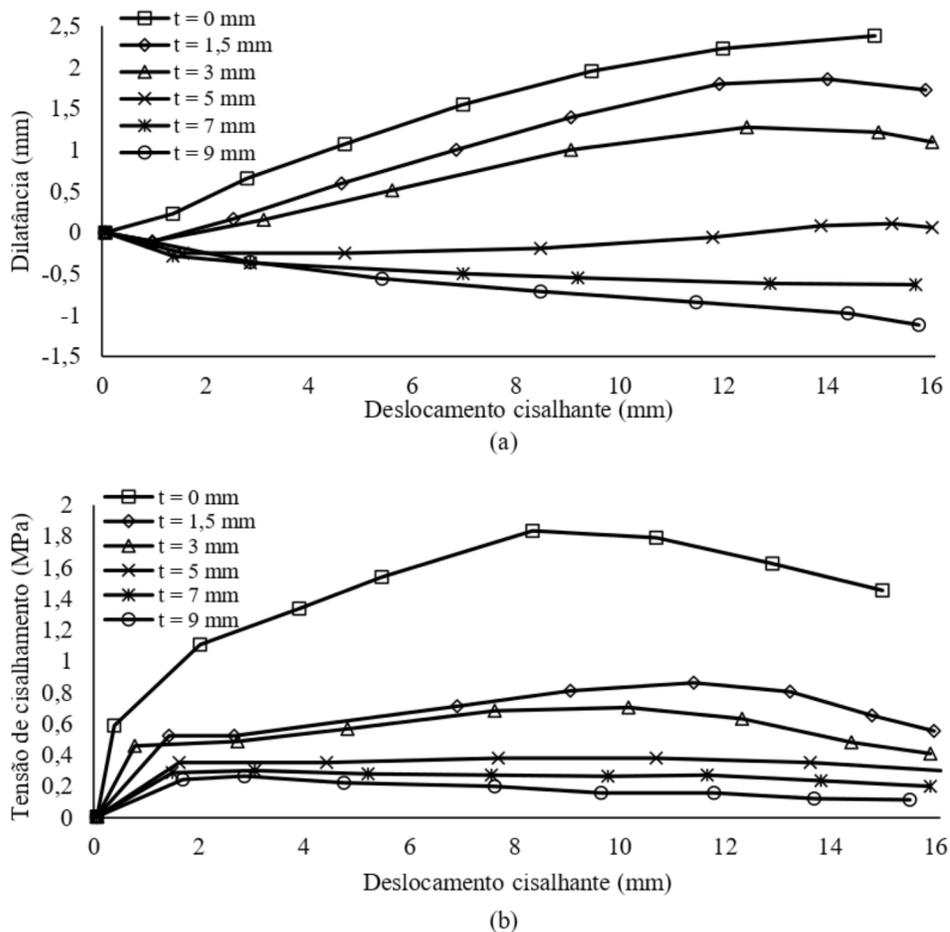
Pela Figura 10, a espessura do preenchimento varia de 0 a 9 mm, o que corresponde a um t/a de 0 a 1,8 ($a = 5$ mm), respectivamente, em uma descontinuidade submetida à tensão normal inicial de 0,56 MPa. Por meio da Figura 10-a, observa-se que o aumento de t resulta na redução da dilatância, sendo que resultados positivos de dilatância ainda ocorrem mesmo quando $t = 5$ ($t/a = 1$), o que mostra o efeito das asperezas em maiores deslocamentos cisalhantes. Em maiores t/a , foram registrados valores negativos para a dilatância, o que resulta na compressão do preenchimento.

De acordo com a Figura 10-b, os resultados obtidos apontam uma expressiva redução da tensão cisalhante de pico já com a adição de 1,5 mm de preenchimento ($t/a = 0,3$), quando os resultados são comparados com a descontinuidade sem preenchimento ($t/a = 0$), observando-se que com o posterior aumento de t , ocorre a redução da tensão de cisalhamento. A partir da situação em que t apresenta o valor de 5 mm ($t/a = 1$), a redução da tensão cisalhante já não é tão expressiva com o aumento de t , fazendo com que a tensão cisalhante de pico ocorra em pequenos deslocamentos cisalhantes, o que reflete a redução do efeito de contato das asperezas, e o aumento da influência do preenchimento no comportamento cisalhante da descontinuidade.

A Figura 11 representa a variação das tensões de cisalhamento de pico apresentadas na Figura 10 com o aumento de t/a . É possível observar a expressiva queda da tensão de cisalhamento de pico quando t/a é de somente 0,3 para todas as tensões normais iniciais consideradas. Além disso, nota-se que com o posterior aumento de t/a , a queda na tensão de cisalhamento de pico passa a apresentar cada vez menor intensidade, caracterizando uma tendência assintótica, levando ao conceito de $t/a_{crít}$, em que, a partir deste t/a , o comportamento cisalhante da descontinuidade é governado predominantemente pelo preenchimento.

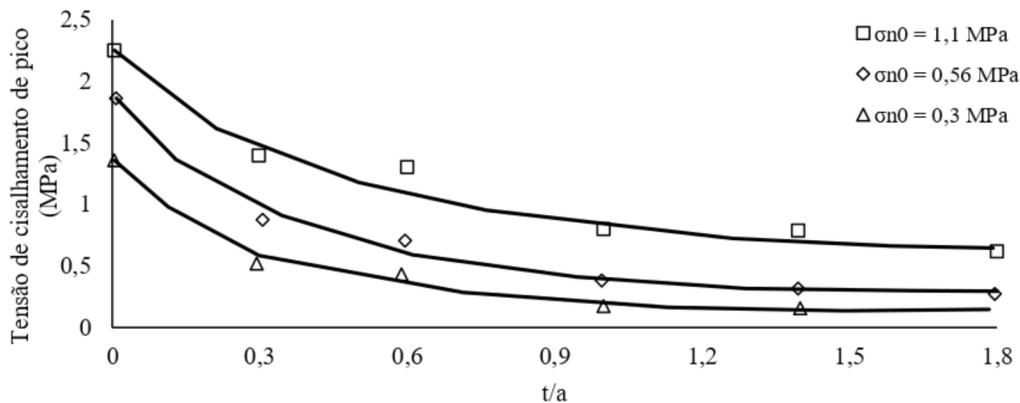
Nas descontinuidades apresentadas por Indraratna, Haque e Aziz (1999), foram estimados t/a_{crit} entre 1 e 1,4, podendo chegar até 1,8 em maiores tensões normais iniciais. Outros autores também avaliaram t/a_{crit} , como nos trabalhos de Papaliangas *et al.* (1993), em que foram medidos valores de t/a_{crit} entre 1,25 e 1,5, Oliveira, Indraratna e Nemeik (2009), que estimaram o valor do mesmo parâmetro como 1,5, e Phien-wej, Shrestha e Rantucci (1990), que obtiveram resultados mostrando que a resistência ao cisalhamento das descontinuidades preenchidas se aproximava da resistência ao cisalhamento do preenchimento quando t/a era de aproximadamente 2.

Figura 10 – Influência da espessura do preenchimento no comportamento cisalhante das descontinuidades, em (a) Dilatância e (b) Tensão de cisalhamento.



Fonte: Adaptado de Indraratna, Haque e Aziz (1999).

Figura 11 – Influência de t/a na tensão cisalhante de pico das descontinuidades.

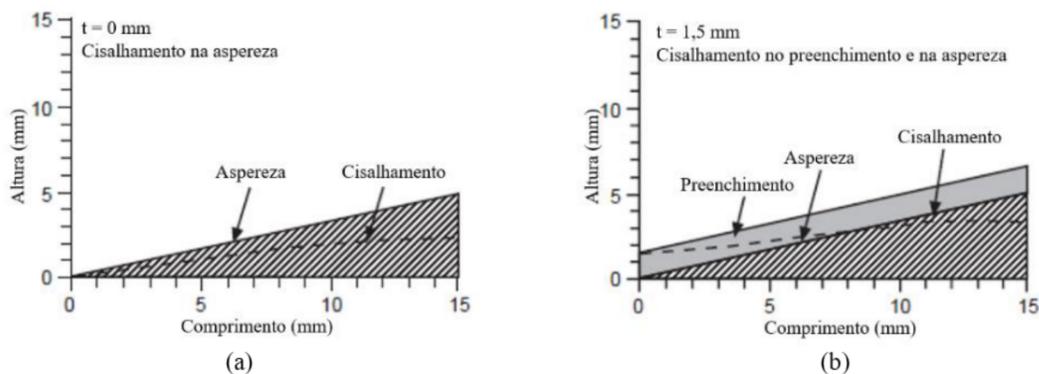


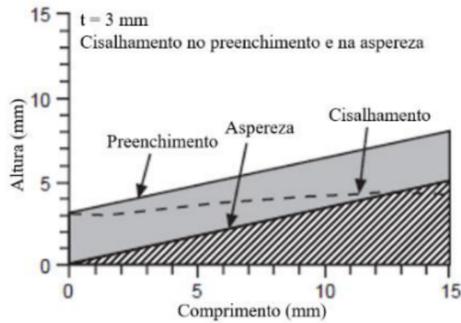
Fonte: Adaptado de Indraratna, Haque e Aziz (1999).

A interação do preenchimento com o material rochoso influencia o comportamento cisalhante das descontinuidades na medida em que os planos de cisalhamento passam pelos dois materiais, conforme pode ser observado na Figura 12, que expõe o que ocorre em cada uma das situações apresentadas nas Figuras 10. A Figura 12-a ilustra a situação em que a descontinuidade não apresenta material de preenchimento, o que faz com que o plano de cisalhamento passe somente pelo material rochoso.

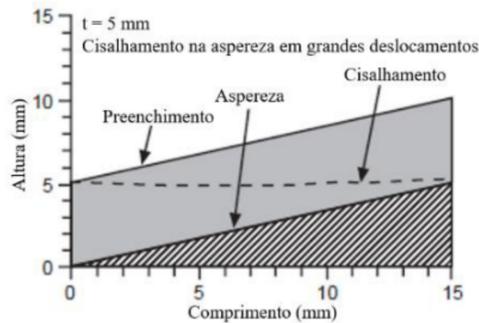
A partir da situação em que há o preenchimento, de maneira que a sua espessura não seja superior à amplitude da aspereza ($t/a \leq 1$), o plano de cisalhamento necessariamente passa por ele e pela aspereza e, dessa forma, os dois materiais influenciam na resistência ao cisalhamento da descontinuidade, conforme representado nas Figuras 12-b, 12-c e 12-d. As Figuras 12-e e 12-f apresentam as situações em que $t/a > 1$, o que faz com que o plano de cisalhamento passe totalmente pelo material de preenchimento, não tocando em nenhum ponto das asperezas rochosas, resultando no aumento da influência do material de preenchimento no comportamento cisalhante das descontinuidades rochosas.

Figura 12 – Representação dos planos de cisalhamento de acordo com a variação da espessura do preenchimento.

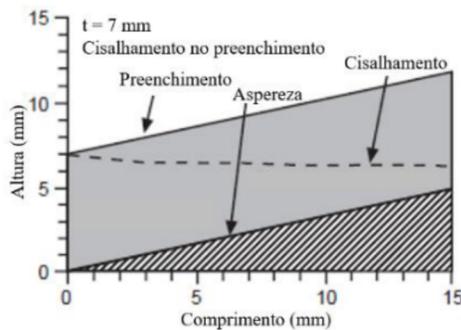




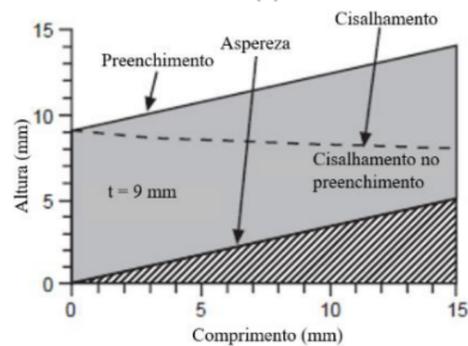
(c)



(d)



(e)



(f)

Fonte: Adaptado de Indraratna, Haque e Aziz (1999).

Assim como na Mecânica dos Solos, um fator que deve ser levado em consideração em obras que apresentem descontinuidades rochosas com preenchimento é a condição de drenagem, uma vez que a não dissipação da poropressão pode fazer com que a resistência ao cisalhamento do preenchimento e, conseqüentemente, da descontinuidade, sofra uma redução em seu valor e altere o seu comportamento. A dissipação da poropressão resultante de um carregamento no material de preenchimento das descontinuidades rochosas pode ser muito facilitada se a rocha for permeável, ou no caso do espaçamento entre conjuntos de descontinuidades ortogonais for pequeno (DE TOLEDO e DE FREITAS, 1993).

A condição da interface entre a rocha e o material de preenchimento também influencia no comportamento cisalhante das descontinuidades rochosas, o que já foi estudado em diferentes pesquisas, como os trabalhos de Kanji (1974) e Papaliangas *et al.* (1993). Kanji (1974) realizou diversos ensaios em diferentes tipos de rochas e de materiais de preenchimento, avaliando os efeitos das interfaces entre esses materiais no comportamento cisalhante das descontinuidades, sendo possível observar que, em determinados casos, a resistência ao cisalhamento das descontinuidades foi inferior à resistência ao cisalhamento do preenchimento. Essa redução da resistência ao cisalhamento seria uma função da rugosidade da descontinuidade e da mineralogia do preenchimento.

Papaliangas *et al.* (1993) destacam 3 situações em que o material de preenchimento pode influenciar na interface com a rocha e, conseqüentemente, na resistência ao cisalhamento da descontinuidade, conforme apresentado a seguir:

- a) Redução da micro-rugosidade: partículas de material de preenchimento podem ocupar os espaços entre as partículas mais grossas das paredes de rocha da descontinuidade, fazendo com que haja a redução do efeito de intertravamento da textura da superfície;
- b) Alteração nas propriedades de atrito: o material de preenchimento pode alterar as propriedades básicas de atrito da superfície de acordo com os próprios valores relativos de atrito entre suas partículas e do material da parede da descontinuidade, uma vez que a introdução de uma camada de partículas que podem se mover livremente pode causar uma redução no atrito devido ao rolamento;
- c) Redução da rugosidade efetiva: a presença do preenchimento altera a morfologia da superfície de cisalhamento da descontinuidade. Conseqüentemente, a mesma quantidade de deslocamento cisalhante pode apresentar menor dilatância do que teria sido obtido no caso em que a descontinuidade não apresenta preenchimento, sendo esse efeito mais evidente com o aumento de t/a .

O comportamento cisalhante das descontinuidades rochosas com preenchimento é influenciado pela rigidez normal de contorno, uma vez que ela restringe a dilatância, gerando maiores valores de tensões normais e, conseqüentemente, promovendo o aumento da tensão cisalhante no plano da descontinuidade, como apresentado nos estudos de Indraratna, Haque e Aziz (1998, 1999), Haque (1999), Shrivastava, Rao e Rathod (2011), Shrivastava e Rao (2018), entre outros.

Outros fatores também influenciam o comportamento cisalhante das descontinuidades rochosas, tendo em vista que alteram a resistência ao cisalhamento do material de preenchimento, como o grau de saturação (Premadasa, 2013; Indraratna, Premadasa e Brown, 2013; Sadaghiani e Nafisi, 2014; Premadasa e Indraratna, 2015; Gong, Nemcik e Ren, 2018), a razão de sobreadensamento (Jayanathan, 2007; Indraratna, Jayanathan e Brown, 2008), e o grau de compactação (Indraratna *et al.*, 2014).

Citam-se, ainda, os trabalhos de Ismail *et al.* (2019) e Ram e Basu (2019), que avaliaram o efeito do intemperismo no comportamento cisalhante das descontinuidades, e Mirzaghobanali *et al.* (2014) e Mehrishal *et al.* (2016), que estudaram os efeitos da direção e

da velocidade de cisalhamento no desenvolvimento das tensões cisalhantes e da dilatância, obtidas no processo de cisalhamento das descontinuidades rochosas.

2.3.2 Modelos para estimativa do comportamento cisalhante das descontinuidades com preenchimento

Tendo em vista os fatores que influenciam o comportamento cisalhante das descontinuidades rochosas com preenchimento, diversos modelos foram desenvolvidos com o objetivo de estimá-lo. Ladanyi e Archambault (1977) apresentaram um modelo que consiste em 2 abordagens para representar a resistência ao cisalhamento de descontinuidades preenchidas sob condição CNL. A primeira consiste no caso em que não ocorre a quebra das asperezas durante o cisalhamento, sendo indicado para descontinuidades sujeitas à baixas tensões normais, em que a resistência ao cisalhamento é obtida com o uso das Equações 21, 22 e 23.

Observa-se que a Equação 21 é uma extensão para o caso específico de argilas como preenchimento do modelo de Patton (1966), em que, não havendo preenchimento, $c_u = 0$ e $\phi_{fill} = \phi_b$. A Equação 23 é válida somente para $t/a \leq 1,5$. Para valores superiores a 1,5, a Equação 23 torna-se inválida, resultando no valor de $m = 0$. Ressalta-se que, quando $t/a = 0$, $m = 1$ e, pela Equação 22, $i_p = i_0$, fazendo com que a Equação 21 possa apresentar resultados diferentes do modelo para descontinuidades sem preenchimento de Patton (1966).

$$\tau = \frac{c_u}{1 - \tan(i_p) \cdot \tan(\phi_{fill})} + \sigma_n \cdot \tan(\phi_{fill} + i_p) \quad (21)$$

$$\tan(i_p) = m \cdot \tan(i_0) \quad (22)$$

$$m = \left(1 - \frac{2}{3} t/a\right)^2 \quad (23)$$

Onde:

c_u : o intercepto coesivo da argila não drenada;

i_p : o ângulo de dilatância no pico;

i_0 : o ângulo de inclinação da aspereza;

ϕ_{fill} : o ângulo de atrito do preenchimento;

m : fator empírico de redução.

A segunda abordagem diz respeito ao caso em que ocorre o cisalhamento das asperezas. Essa situação é baseada no princípio de que, em uma descontinuidade preenchida, o preenchimento e as asperezas são cisalhados simultaneamente, fazendo com que a resistência ao cisalhamento da descontinuidade preenchida (S) esteja entre a resistência ao cisalhamento da descontinuidade sem preenchimento (R), e a obtida somente do preenchimento (C), variando de acordo com a espessura do preenchimento e com a tensão normal atuante, conforme as Equações 24, 25, 26 e 27.

$$S = m(R - C) + C \quad (24)$$

$$R = \sigma_n \cdot \tan(\phi_b + i) \quad (25)$$

$$C = c_u + \sigma_n \cdot \tan(\phi_{fill}) \quad (26)$$

$$\tan(i) = [1 - (\sigma_n/\sigma_c)^{1/4}] \cdot \tan(i_0) \quad (27)$$

Ladanyi e Archambault (1977) apontam as seguintes observações:

- a) Para $i_0 < 15^\circ$ e $\sigma_n/\sigma_c < 0,1$, é possível utilizar a primeira abordagem para qualquer tipo de preenchimento;
- b) No caso em que o material de preenchimento é argila, utiliza-se a primeira abordagem para $15^\circ \leq i_0 \leq 30^\circ$ e $\sigma_n/\sigma_c < 0,5$, e a segunda abordagem quando $30^\circ < i_0$ e $0,5 \leq \sigma_n/\sigma_c \leq 1$;
- c) Para preenchimentos não coesivos, o uso da segunda abordagem deve ser utilizado nas situações de $15^\circ \leq i_0 \leq 45^\circ$ e $0,1 < \sigma_n/\sigma_c < 1$.

Propondo princípios semelhantes aos apresentados por Ladanyi e Archambault (1977), Papaliangas *et al.* (1993) descreveram um modelo para o cálculo da tensão de cisalhamento de descontinuidades preenchidas a partir de 2 limites: $T_{m\acute{a}x}$, a máxima resistência ao cisalhamento obtida da descontinuidade sem preenchimento, e $T_{m\acute{i}n}$, a mínima resistência ao cisalhamento possível do sistema para a espessura de preenchimento crítica, variando em função da espessura do preenchimento, da rugosidade das paredes rochosas e da tensão normal.

Papaliangas *et al.* (1993) citam que $T_{m\acute{i}n}$ também pode ser a resistência ao cisalhamento do material de preenchimento no caso de descontinuidades rugosas, ou a resistência ao cisalhamento da interface rocha-preenchimento em descontinuidades planas. Dessa forma, as relações são expressas em termos de porcentagens das razões entre as tensões, conforme as Equações 28 a 32, sendo que, para $t/a = 0$, $\mu = \mu_{m\acute{a}x}$; para $t/a > t/a_{crit}$, $\mu = \mu_{m\acute{i}n}$.

e a constante “m” inerente ao modelo, em seus estudos, apresenta o valor de 1 para a resistência ao cisalhamento de pico e 0,75 para a resistência ao cisalhamento residual.

$$\mu = \left(\frac{T}{\sigma_n}\right) \cdot 100 \quad (28)$$

$$\mu = \mu_{\min} + (\mu_{\max} - \mu_{\min})^n \quad (29)$$

$$\mu_{\max} = \left(\frac{T_{\max}}{\sigma_n}\right) \cdot 100 \quad (30)$$

$$\mu_{\min} = \left(\frac{T_{\min}}{\sigma_n}\right) \cdot 100 \quad (31)$$

$$n = \left[1 - \frac{1}{(t/a)_{\text{crit}}} \left(\frac{t}{a}\right)\right]^m \quad (32)$$

Os modelos de Ladanyi e Archambault (1977) e de Papaliangas *et al.* (1993), embora busquem estimar o comportamento cisalhante das descontinuidades preenchidas, possuem como desvantagem o fato de que eles não consideram alguns fatores importantes, como a rigidez normal de contorno e o cálculo da dilatância. Oliveira e Indraratna (2010) apresentaram um modelo de previsão do comportamento cisalhante das descontinuidades preenchidas, considerando, entre outros fatores, a rigidez normal de contorno, a dilatância e o cisalhamento das asperezas. As Equações 33 a 42 representam o modelo de Oliveira e Indraratna (2010).

$$\tau = \sigma_n \left\{ \left[\frac{\tan(\phi_b) + \tan(i_d)}{1 - \tan(\phi_b)\tan(i)} \right] (1 - \eta) + \tan(\phi_r)\eta \right\} \quad (33)$$

$$\eta = \exp\left(-\frac{u_s \cdot JRC}{100 \cdot c_1 \cdot a \cdot (t/a)}\right) \quad (34)$$

$$c_1 = \left(-\frac{u_p \cdot JRC}{100 \cdot \ln\left(\frac{A_1}{A_2}\right) \cdot a \cdot (t/a)} \right) \quad (35)$$

$$u_p = \frac{a}{\tan(i_0)} \sigma_{n0}^{-c_3} \quad (36)$$

$$A_1 = \tan(\phi_p) - A_3 \quad (37)$$

$$A_2 = \tan(\phi_r) - A_3 \quad (38)$$

$$A_3 = \left[\frac{\tan(\phi_b) + \tan(i_0)}{1 - \tan(\phi_b)\tan(i)} \right] \quad (39)$$

$$i_d = (i_0 - i) \exp\left(-\frac{(u_s - u_p)^2 \cdot JRC}{100 \cdot (c_2 \cdot a)^2}\right) + i \quad (40)$$

$$i = \tan^{-1}\left(\frac{\partial u_n}{\partial u_s}\right) \quad (41)$$

$$u_n = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{N_h} L_f [a_n \cos(2\pi n u_s / T) + b_n \sin(2\pi n u_s / T)] \quad (42)$$

Onde:

η é o fator de compressão e saída do preenchimento durante o cisalhamento;

c_1 é a constante empírica que controla a taxa de saída do preenchimento;

c_2 é a constante empírica que controla a degradação das asperezas;

c_3 é a constante empírica conveniente ao modelo;

ϕ_p é o ângulo de atrito de pico da descontinuidade preenchida;

$L_f = 1$ se $n\pi / N_h = 0$, ou $(N_h / n\pi) \cdot \sin(n\pi / N_h)$, caso contrário;

N_h : número de harmônicos da série de Fourier.

Observa-se que o modelo de Oliveira e Indraratna (2010) apresenta dificuldades em seu uso, seja em função das equações que podem não ser de fácil utilização para o usuário, com o uso de série de Fourier, ou com o cálculo de parâmetros empíricos que precisam ser calibrados com os dados experimentais.

É possível citar outras formulações analíticas, como as apresentadas por Indraratna, Premadasa e Brown (2013), e Indraratna *et al.* (2014), que consideram em suas análises o grau de saturação e de compactação do material de preenchimento, e Shrivastava e Rao (2018), que propuseram um modelo que estima a tensão de cisalhamento de pico para descontinuidades rochosas sob condições CNL e CNS. Além destes modelos, citam-se os trabalhos de Gong, Nemcik e Ren (2018), e Wang, Wang e Zhang (2018), que buscam estimar o comportamento cisalhante das descontinuidades com preenchimento a partir de análises numéricas.

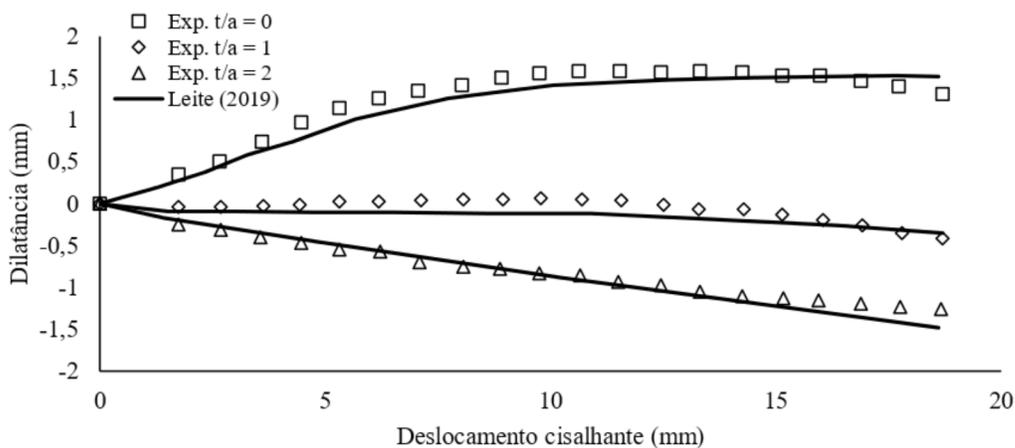
Leite (2019), Leite *et al.* (2019), e Leite, Dantas Neto e Albino (2019), com a utilização de uma série de dados de ensaios de cisalhamento direto provenientes de trabalhos de diversos autores, em descontinuidades com e sem preenchimento, sob condições CNL e

CNS, apresentaram um modelo em RNA que considera a presença do preenchimento na estimativa do comportamento cisalhante das descontinuidades rochosas.

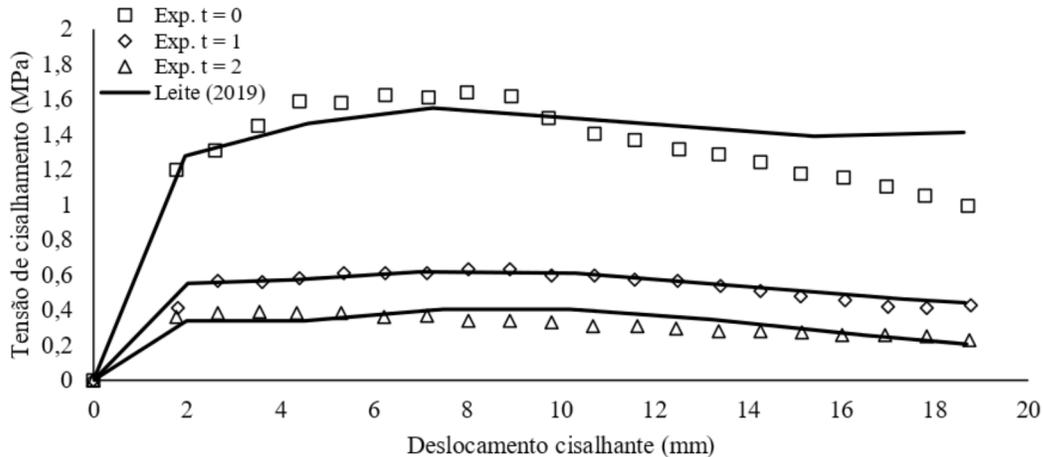
A rede neural artificial desenvolvida por Leite (2019) possui a seguinte arquitetura: 8-20-10-5-2, apresentando como variáveis de entrada a relação entre a espessura do preenchimento e a amplitude da aspereza (t/a); a rigidez normal de contorno (k_n), em kPa/mm; a tensão normal inicial (σ_{n0}), em MPa; JRC; a resistência à compressão uniaxial da rocha intacta (σ_c), em MPa; o ângulo de atrito básico da rocha intacta (ϕ_b), em graus; o ângulo de atrito do preenchimento (ϕ_{fill}), em graus, e o deslocamento cisalhante (δ_h), em mm. No caso das variáveis de saída do modelo, são obtidas a dilatância, em mm, e a tensão cisalhante, em kPa, ao longo de todo o processo de cisalhamento das descontinuidades.

A Figura 13 apresenta a comparação entre os resultados fornecidos pelo modelo de Leite (2019) e os dados experimentais em descontinuidades rochosas com e sem preenchimento expostos por Oliveira, Indraratna e Nemeik (2009). Pelas Figuras 13-a e 13-b, observa-se que o modelo forneceu resultados satisfatórios nas estimativas de dilatância e de tensão cisalhante, respectivamente, quando comparados com os dados experimentais.

Figura 13 – Comparação entre os resultados fornecidos pelo modelo de Leite (2019) e os dados experimentais apresentados por Oliveira, Indraratna e Nemeik (2009), em (a) Dilatância e (b) Tensão de cisalhamento.



(a)



(b)

Fonte: Adaptado de Leite (2019).

Mesmo com todas as funcionalidades inerentes às redes neurais artificiais, elas não consideram as incertezas nos valores dos dados de entrada, o que ocorre com frequência no meio geotécnico. Uma maneira de considerar a capacidade de aprendizagem das RNA com a possível imprecisão dos dados de entrada é a partir da técnica neuro-fuzzy, a qual será abordada no Capítulo 3.

2.4 Conclusões parciais

As discontinuidades são importantes componentes do maciço rochoso, tendo em vista que elas podem determinar o mecanismo de ruptura do sistema, uma vez que a resistência ao cisalhamento dessas estruturas tende a ser inferior à da rocha intacta. O comportamento cisalhante das discontinuidades rochosas é governado por uma série de fatores, podendo ser destacados a rigidez normal de contorno, o material de preenchimento, a tensão normal inicial, a rugosidade da discontinuidade e as propriedades da rocha intacta.

O levantamento de parâmetros que representem os fatores governantes do comportamento cisalhante das discontinuidades rochosas tem fundamental importância, uma vez que possibilita a criação de modelos que visam estimar a resposta ao cisalhamento dessas estruturas, como o cálculo da tensão cisalhante e da dilatância obtidos no processo, por exemplo. Formulações analíticas são utilizadas em grande parte desses modelos, e contribuíram para um melhor entendimento do fenômeno e da influência destes fatores. No entanto, com frequência, a aplicação desse tipo de abordagem não é fácil por diferentes motivos, como o uso de expressões que não são usuais, e o cálculo de diversos parâmetros inerentes aos modelos.

Como alternativas às formulações analíticas, outras metodologias de análise foram desenvolvidas, como os modelos que utilizam as redes neurais artificiais, a lógica fuzzy e as técnicas neuro-fuzzy. Modelos em redes neurais artificiais para a previsão do comportamento cisalhante de descontinuidades rochosas, preenchidas ou não, têm demonstrado resultados satisfatórios, mas esse tipo de aplicação não considera a possível incerteza e consequente imprecisão nos dados de entrada. Essas questões são abordadas com o uso da técnica neuro-fuzzy, aplicando o processo de aprendizagem das redes neurais artificiais no desenvolvimento de conjuntos fuzzy.

Os sistemas neuro-fuzzy existentes apresentam resultados satisfatórios nas estimativas de dilatância e de tensão de cisalhamento obtidas em descontinuidades rochosas. No entanto, eles não consideram a presença do material de preenchimento em suas análises, fato que levou ao presente trabalho desenvolver modelos neuro-fuzzy para a previsão do comportamento cisalhante de descontinuidades rochosas com e sem preenchimento.

CAPÍTULO 3: MODELAGEM EM ENGENHARIA COM SISTEMAS INTELIGENTES

3.1 Introdução

Os sistemas inteligentes, como as redes neurais artificiais, a lógica fuzzy e as técnicas neuro-fuzzy, são cada vez mais utilizados em engenharia como alternativas às formulações analíticas. Entre as diversas propriedades que os sistemas inteligentes podem apresentar, destacam-se a metodologia diferenciada de tratamento dos dados levantados e a capacidade de aprendizagem e de modelagem dos problemas.

O sistema neuro-fuzzy utilizado no presente trabalho denomina-se *Adaptive-Network-based Fuzzy Inference System* (ANFIS), o qual considera a aplicação de princípios inerentes ao processo de aprendizagem das redes neurais artificiais no desenvolvimento de conjuntos fuzzy. Em virtude disso, o Capítulo 3 aborda os principais conceitos inerentes à lógica fuzzy, às redes neurais artificiais e às técnicas neuro-fuzzy, apresentando diversas aplicações destes sistemas em Mecânica das Rochas e, especificamente, na previsão do comportamento cisalhante das descontinuidades rochosas.

3.2 Teoria dos conjuntos fuzzy

A teoria dos conjuntos fuzzy, proposta por Zadeh (1965), busca representar o conhecimento humano sobre determinado fenômeno a partir do tratamento do caráter vago da informação. Ao contrário da abordagem determinística, em que há a atribuição de um valor pontual à uma variável, a teoria fuzzy atribui um conjunto de valores possíveis que podem ser representativos da mesma, dentro de um dado nível de pertinência (ZADEH, 1965; JANG, 1993; JANG, SUN e MIZUTANI, 1997; GANOULIS, 1994; DANTAS NETO, SILVA e SOUZA FILHO, 2016).

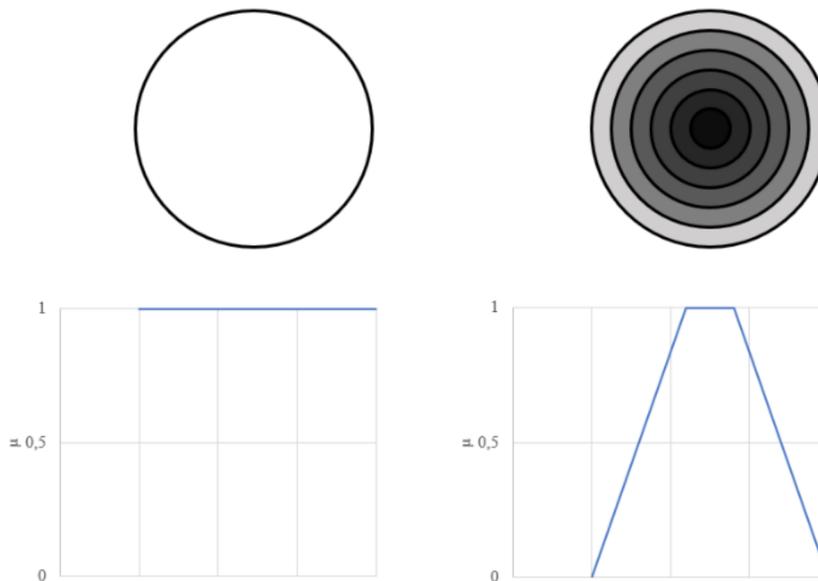
Um conjunto clássico não apresenta qualquer dúvida a respeito dos seus limites e, conseqüentemente, os termos pertencem, ou não, ao conjunto. Jang e Sun (1995) citam que os conjuntos fuzzy não apresentam um limite nítido e, dessa forma, a transição entre pertencer ou não ao conjunto é feita de maneira gradual, sendo caracterizada pelas funções de pertinência, as quais permitem representar valores linguísticos, como quente, alto, entre outros.

Zadeh (1965) aponta o efeito da função de pertinência, que associa cada ponto x de um conjunto ao respectivo grau de pertinência, $\mu(x)$, cujo valor se encontra entre 0 e 1, em que, quão mais próximo de 1, maior a pertinência do ponto ao conjunto. Por exemplo, sendo X uma coleção de pontos genericamente denominados x , um conjunto fuzzy A em X seria definido a partir dos pares ordenados representados por meio da Equação 43.

$$A = \{(x, \mu_A(x)) \mid x \in X\} \quad (43)$$

Em relação ao grau de pertinência, enquanto a teoria clássica dos conjuntos assumiria somente o valor 0 (não pertence ao conjunto), ou 1 (pertence ao conjunto), a teoria dos conjuntos fuzzy permite assumir valores entre esses dois limites, como 0,4, 0,5, 0,001, etc. A Figura 14 representa as diferenças entre as duas teorias. Pela figura, no conjunto clássico, qualquer elemento presente em seu interior apresenta grau de pertinência 1. No caso do conjunto fuzzy, observa-se que a atribuição do grau de pertinência a um elemento depende de sua posição no conjunto, sendo que, quanto mais próximo do centro do círculo se encontra o elemento, maior será o respectivo grau de pertinência.

Figura 14 – diferenças entre os conjuntos clássicos e fuzzy.



Fonte: Adaptado de Sonmez, Gokceoglu e Ulusay (2003).

Há diferentes tipos de funções de pertinência que são utilizadas para representar os conjuntos fuzzy, podendo assumir formas triangulares, trapezoidais, gaussianas, em forma de sino, entre outras, como apresentado nos estudos de Sakurai e Shimizu (1987), Dombi (1990), Grima e Babuska (1999), Gokceoglu (2002) e Harrison e Hudson (2010).

A estrutura básica de um sistema de inferência fuzzy consiste de três componentes conceituais: uma base de regras, que apresenta a seleção de todas as regras fuzzy; uma base de dados, que define todas as funções de pertinência que são utilizadas nas regras fuzzy, e um mecanismo de raciocínio, que executa o procedimento de inferência sobre as regras fuzzy, permitindo a obtenção de uma resposta, ou saída (JANG E SUN, 1995). As etapas referentes ao mecanismo de raciocínio fuzzy podem ser exemplificadas, como apresentado por Jang (1993):

- Obtenção do grau de pertinência de cada valor linguístico, comparando os valores das variáveis de entrada com as funções de pertinência presentes na parte antecedente (etapa de fuzzificação);
- Combinação dos valores referentes aos graus de pertinência obtidos na parte antecedente a partir de operadores (como o produto ou o mínimo), de maneira a obter o peso de cada regra;
- Geração de um dado de saída adequado para cada regra, seja ele um conjunto fuzzy ou um número;
- Agregação dos produtos gerados de maneira a produzir uma saída numérica (etapa de defuzzificação).

Existem diversos tipos de sistemas de inferência fuzzy, sendo os mais conceituados os propostos por Mamdani (1974), Tsukamoto (1979), e Takagi e Sugeno (1983), sendo este último considerado como o mais utilizado no desenvolvimento dos modelos ANFIS, razão pela qual será detalhado a seguir.

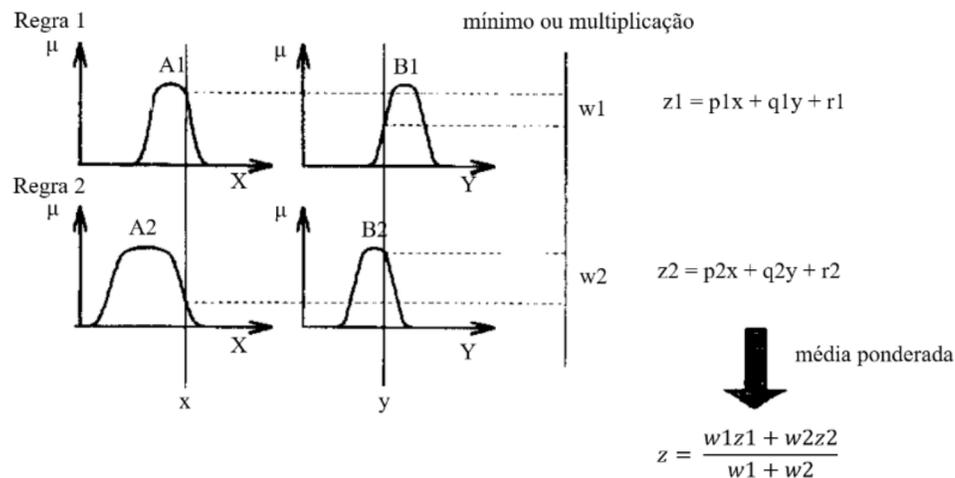
Uma regra típica do sistema Takagi e Sugeno (1983) apresenta a seguinte forma: se x é A e y é B , então $z = f(x, y)$, em que A e B são conjuntos fuzzy na parte antecedente, e $z = f(x, y)$ é uma função na parte consequente. Usualmente essa função é polinomial com as variáveis x e y , mas pode assumir qualquer forma, dependendo do padrão de saída desejável para o problema. Quando essa função é polinomial, diz-se que o sistema é de primeira ordem, sendo de ordem zero quando a função é uma constante.

A Figura 15 representa o sistema Takagi e Sugeno (1983). Pela figura, observa-se que o problema em análise apresenta duas regras. Na Regra 1, os valores de x e y correspondem, respectivamente, aos graus de pertinência $\mu_1(x)$ e $\mu_1(y)$ para os conjuntos A_1 e B_1 . Por meio de operadores, como o produto entre $\mu_1(x)$ e $\mu_1(y)$, ou o menor deles, gera-se o peso da regra: w_1 . De maneira semelhante, na Regra 2, x e y correspondem aos graus de pertinência $\mu_2(x)$ e $\mu_2(y)$, respectivamente, nos conjuntos A_2 e B_2 , havendo o cálculo de w_2 . Posteriormente, em

função de x e y , calculam-se z_1 e z_2 a partir das equações apresentadas na Figura 15, em que p , q e r são parâmetros das funções polinomiais característicos de cada regra. A saída do modelo é obtida a partir da média ponderada entre os parâmetros z e os pesos de cada regra.

O sistema Takagi e Sugeno (1983) permite que o dado de saída seja gerado a partir de funções, e não por meio de conjuntos fuzzy, o que é feito por outros tipos de sistemas de inferência fuzzy. Grima e Babuska (1999) concluíram que o modelo Takagi e Sugeno (1983) apresenta um excelente potencial para representar complexos, não lineares, e multivariáveis problemas em engenharia, sem exigir uma formulação bem definida para construir um sistema de previsão razoavelmente preciso a partir dos dados medidos.

Figura 15 – Representação do sistema de inferência fuzzy de Takagi e Sugeno (1983).



Fonte: Adaptado de Jang e Sun (1995).

Harrison e Hudson (2010) citam que a matemática fuzzy pode ser uma ferramenta apropriada para trabalhar problemas em Mecânica das Rochas, tendo em vista que essa lógica incorpora diretamente as incertezas presentes nesse meio. Valendo-se da potencialidade da lógica fuzzy, diversas pesquisas, como os trabalhos de Sakurai e Shimizu (1987), Grima e Babuska (1999), Sonmez, Gokceoglu e Ulusay (2003), Kayabasi, Gokceoglu e Ercanoglu (2003), Matos (2018), Matos, Dantas Neto e Barreto (2018a, 2018b, 2019a, 2019b), entre outros, buscaram representar propriedades inerentes aos maciços rochosos.

Sakurai e Shimizu (1987) estudaram a estabilidade de taludes utilizando conjuntos fuzzy em diversas propriedades dos maciços rochosos, como a resistência à compressão uniaxial da rocha intacta e o espaçamento das descontinuidades. O método desenvolvido pelos autores conseguiu estimar o ângulo de atrito interno e a coesão do maciço rochoso, e como eles influenciam no fator de segurança dos taludes rochosos.

Grima e Babuska (1999) apresentaram formulações com o uso da lógica fuzzy na previsão da resistência à compressão uniaxial de modelos de rocha intacta, em que os resultados obtidos pela lógica fuzzy foram comparados com os fornecidos por um modelo estatístico convencional. Os autores concluíram que o modelo fuzzy não só foi mais preciso, mas, ao contrário de outras abordagens, como as redes neurais artificiais, também fornece alguns detalhes sobre a relação não linear apresentada pelo sistema.

A partir de um sistema de inferência fuzzy do tipo Mamdani (1974), Sonmez, Gokceoglu e Ulusay (2003) estimaram diversos parâmetros necessários para a obtenção do *Geological Strength Index* (GSI) dos maciços rochosos. Eles concluíram que os conjuntos fuzzy fornecem uma maneira mais prática de trabalhar com casos em que os dados são limitados e incertos.

Kayabasi, Gokceoglu e Ercanoglu (2003) estimaram o módulo de deformação de maciços rochosos a partir de regressões simples, regressões múltiplas e por meio de um sistema de inferência fuzzy do tipo Mamdani (1974). Os autores concluíram que os resultados fornecidos pelo sistema de inferência fuzzy se mostraram mais confiáveis de acordo com os dados obtidos experimentalmente.

Os trabalhos de Matos (2018) e Matos, Dantas Neto e Barreto (2018a, 2018b, 2019a, 2019b) apresentam modelos fuzzy para a previsão do comportamento cisalhante de descontinuidades rochosas sem preenchimento. Foram obtidos resultados satisfatórios para a previsão da dilatância e da tensão cisalhante em função do deslocamento cisalhante, a partir de sistemas de inferência fuzzy do tipo Takagi e Sugeno (1983). Os autores ressaltam que uma limitação do modelo seria o fato de que ele estaria condicionado aos intervalos atribuídos às variáveis de entrada presentes em seu desenvolvimento, sendo possível aumentar esses intervalos na medida em que novos dados estejam disponíveis.

3.3 Redes neurais artificiais: conceitos básicos

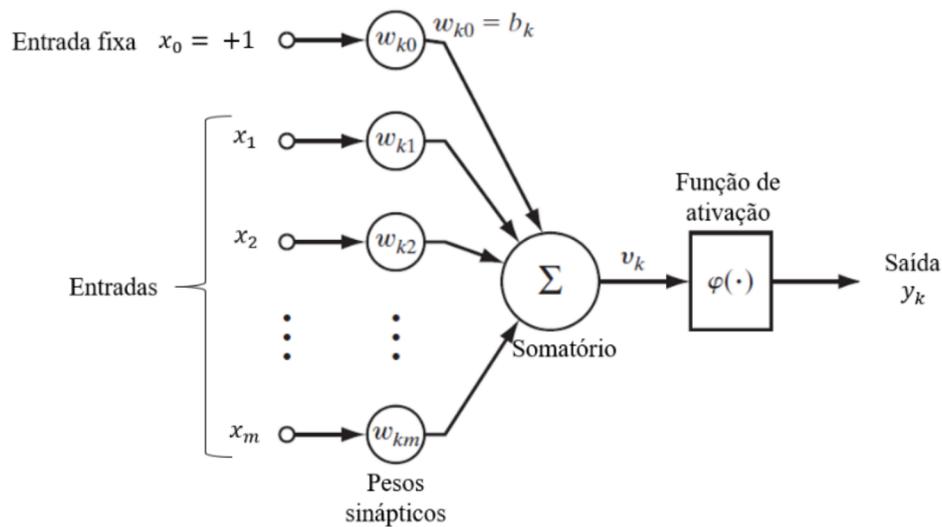
Haykin (2008) descreve uma rede neural artificial como processadores distribuídos de maneira paralela, formados por unidades de processamento simples, os neurônios artificiais, que possuem a tendência natural de armazenar conhecimento e torná-lo disponível para uso. O autor destaca os seguintes componentes de um neurônio artificial (k), conforme apresentado na Figura 16:

- Um conjunto de sinais de entrada (x), que são associados aos respectivos pesos sinápticos (w_k). O peso sináptico pode assumir valores positivos ou negativos,

além de que x_0 é uma entrada fixa de valor igual a 1, e o seu respectivo peso sináptico, w_0 , é denominado bias;

- Um somador para os sinais de entrada, ponderados pelos respectivos pesos sinápticos do neurônio, sendo que as operações constituem um combinador linear, denominado campo local induzido (v_k);
- Uma função de ativação $\varphi(\cdot)$ com o objetivo de limitar a amplitude de saída (y_k) de um neurônio para algum valor finito.

Figura 16 – Representação do neurônio artificial.



Fonte: Adaptado de Haykin (2008).

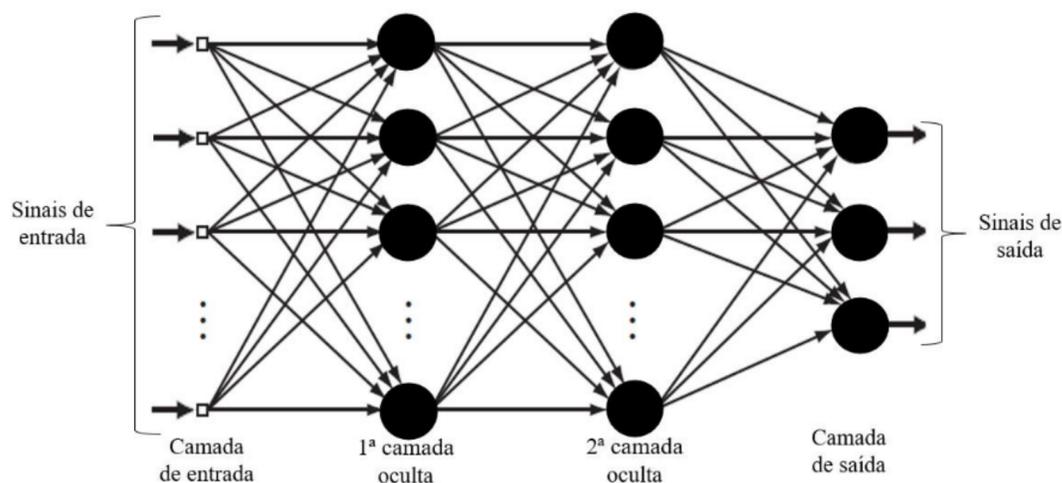
Matematicamente, é possível representar as operações inerentes ao funcionamento do neurônio artificial a partir das Equações 44 e 45. A função de ativação pode assumir determinados tipos, como uma função limite, sigmóide, ou tangente hiperbólica. Dantas Neto *et al.* (2017) citam que a principal vantagem do uso dessas funções na modelagem de redes neurais artificiais em engenharia é o fato de que elas são diferenciáveis nos seus domínios e, dessa forma, elas podem ser usadas em um vasto número de algoritmos de aprendizagem, relacionando com técnicas de otimização.

$$v_k = \sum_{j=0}^m w_{kj} x_j \quad (44)$$

$$y_k = \varphi(v_k) \quad (45)$$

A Figura 17 apresenta um dos tipos de redes neurais artificiais mais utilizados em problemas de engenharia: o perceptron de múltiplas camadas. Perceptrons são formados tipicamente por três tipos de camadas: uma camada de entrada em que a função principal é de receber o “estímulo” externo; camadas ocultas responsáveis por extrair estatísticas de ordem superior do mecanismo modelado, ou fenômeno, e camada de saída, que visa fornecer uma resposta do modelo neuronal (DANTAS NETO *et al.*, 2017). Neste tipo de rede neural artificial, cada neurônio de uma camada anterior está conectado com os presentes nas camadas seguintes por meio dos pesos sinápticos e bias provenientes de cada conexão.

Figura 17 – Rede neural artificial do tipo perceptron com duas camadas ocultas.



Fonte: Adaptado de Haykin (2008).

Sayadi *et al.* (2013) citam que o treinamento de uma rede neural artificial é obtido com o uso de um conjunto real de dados de entrada e de saída, em que, para uma melhor aproximação, é necessário um número suficiente de dados, sendo que o desempenho do modelo treinado é verificado posteriormente com um conjunto de valores disponíveis como teste. Os autores ressaltam, ainda, que no processo de definição do melhor modelo, diversas arquiteturas (configurações de números de neurônios em determinados números de camadas) são treinadas e testadas, fazendo com que essas fases de treinamento e de teste ocorram até que possa ser obtido o modelo com o menor erro e a máxima acurácia.

Após a conclusão do treinamento, as redes neurais artificiais podem detectar semelhanças quando apresentam um novo padrão de entrada e, conseqüentemente, resultar em um padrão de saída previsto (MONJEZI E DEGHANI, 2008). Haykin (2008) cita que um método popular de treinamento para perceptrons múltiplas camadas é o algoritmo de

retropropagação do erro (RUMELHART, HINTON e WILLIAMS, 1986), o qual consiste em duas fases:

- a) A fase para a frente (*forward phase*), em que os pesos sinápticos são fixos e o sinal de entrada é propagado através da rede, camada por camada, até que alcance a saída;
- b) A fase para trás (*backward phase*), em que um sinal de erro é definido a partir da comparação entre a saída obtida pela rede e a resposta desejada. O sinal do erro resultante propaga-se ao longo da rede ajustando os pesos sinápticos.

As funcionalidades e a capacidade de aprendizagem das redes neurais artificiais tornam-se vantagens inerentes ao seu uso. Essas propriedades levaram a diversos trabalhos na área de Mecânica das Rochas, como podem ser citadas as pesquisas de Zhang, Song e Nie (1991), Feng *et al.* (1997), Meulenkamp e Grima (1999), Singh, Singh e Singh (2001), Khandelwal e Singh (2006), Sonmez *et al.* (2006, 2016), Tiryaki (2008), Yilmaz e Yuksek (2008), Monjezi e Dehghani (2008), Dehghan *et al.* (2010), Ocak e Seker (2012), Sayadi *et al.* (2013), entre outras.

Em relação às descontinuidades rochosas, citam-se os modelos neuronais de previsão do comportamento cisalhante apresentados por Dantas Neto, Indraratna e Oliveira (2016), e Dantas Neto *et al.* (2017), para descontinuidades sem preenchimento, e os sistemas expostos por Leite (2019), Leite *et al.* (2019), Leite, Dantas Neto e Albino (2019), para descontinuidades com e sem preenchimento, os quais foram discutidos no Capítulo 2.

Dantas Neto, Barreto e Matos (2019) utilizam os sistemas fuzzy apresentados por Matos (2018) e o modelo neuronal de Dantas Neto *et al.* (2017) em aplicações práticas de estabilidade de taludes rochosos, em que o mecanismo de ruptura é determinado por descontinuidades rochosas sem preenchimento. A partir dos resultados obtidos, os autores apontam que sistemas inteligentes, como as redes neurais artificiais, a lógica fuzzy e as técnicas neuro-fuzzy podem ser uma alternativa aos modelos analíticos existentes na previsão do comportamento cisalhante de descontinuidades rochosas sem preenchimento.

3.4 Sistemas neuro-fuzzy

Jang, Sun e Mizutani (1997) citam que o processo de modelagem em neuro-fuzzy apresenta como base duas abordagens: as redes neurais artificiais, que reconhecem padrões de maneira a se adaptarem com a mudança de meio, e os sistemas de inferência fuzzy, que

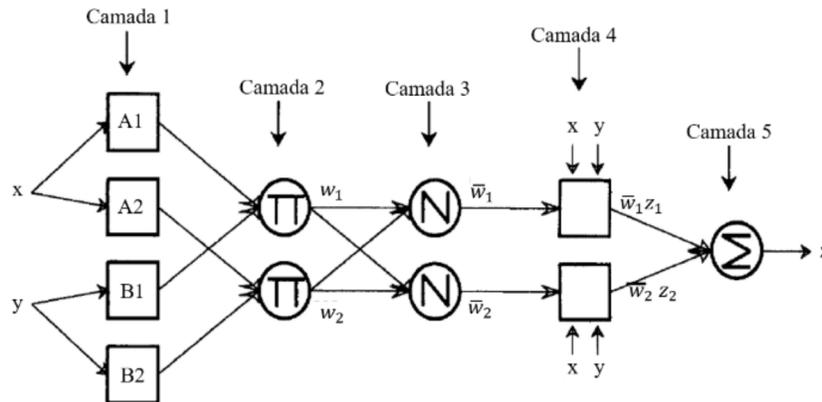
incorporam o conhecimento humano e desempenham um papel de inferência e de tomada de decisão em um problema.

Nauck e Kruse (1999) referem-se ao termo “neuro-fuzzy” a partir dos seguintes pontos:

- Um sistema neuro-fuzzy é um sistema fuzzy que é usualmente treinado por um algoritmo de aprendizagem derivado das redes neurais artificiais. O procedimento de aprendizagem trabalha em informações locais e causa somente modificações nos conceitos básicos dos sistemas fuzzy, fazendo com que o processo não seja pautado no conhecimento e sim derivado dos dados levantados;
- Um sistema neuro-fuzzy pode ser visto como uma rede neural artificial especial com três camadas. As unidades nessa rede usam operadores em vez de funções de ativação comuns nas redes neurais artificiais. A primeira camada representa as variáveis de entrada, a segunda (oculta) camada representa as regras fuzzy e a terceira representa as variáveis de saída;
- Um sistema neuro-fuzzy pode sempre, ou seja, antes, durante e depois do processo de aprendizagem ser interpretado como um sistema de regras fuzzy. É possível tanto criar o sistema sem dados de treinamento quanto inicializá-lo com conhecimento prévio, na forma de regras fuzzy;
- O processo de aprendizagem de um sistema neuro-fuzzy leva em consideração as propriedades do sistema fuzzy subjacente. Isso resulta em restrições nas possíveis modificações aplicáveis aos parâmetros do sistema.

Jang (1993) apresentou uma classe de redes neurais artificiais que são funcionalmente equivalentes a um sistema de inferência fuzzy, denominando o modelo neuro-fuzzy de ANFIS. A Figura 18 representa um exemplo de modelo ANFIS, assumindo que o sistema de inferência fuzzy seja do tipo Takagi e Sugeno (1983).

Figura 18 – Representação de um modelo neuro-fuzzy do tipo ANFIS.



Fonte: Adaptado de Jang e Sun (1995).

De acordo com Jang (1993), cada camada do modelo ANFIS representado na Figura 18 é caracterizada de acordo com suas funções. Na Camada 1, todo nó é adaptável, com uma saída definida pela Equação 46, em que x e y são as entradas nos nós e A_i , ou B_i , são os conjuntos fuzzy associados aos nós. Cada saída (O) dessa camada é o valor do grau de pertinência da parte antecedente, sendo que ele pode ser calculado por qualquer função de pertinência, e os parâmetros das funções são denominados parâmetros de premissa.

$$O_{1,i} = \mu_{A_i(x)} \text{ ou } O_{1,i} = \mu_{B_i(y)}, \quad i = 1,2 \quad (46)$$

A Camada 2, por sua vez, apresenta nós fixos, que multiplicam os sinais de entrada, sendo as suas saídas o produto das entradas conforme Equação 47, em que cada saída representa o peso da respectiva regra fuzzy.

$$O_{2,i} = w_i = \mu_{A_i(x)} \cdot \mu_{B_i(y)}, \quad i = 1,2 \quad (47)$$

Os nós presentes na Camada 3 são fixos e calculam a razão entre o peso de cada regra fuzzy e a soma do peso de todas as regras a partir da Equação 48.

$$O_{3,i} = \bar{w}_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2}, \quad i = 1,2 \quad (48)$$

No caso da Camada 4, todos os nós são adaptáveis, apresentando funções como a representada pela Equação 49, em que \bar{w}_i é a saída da Camada 3 e p_i , q_i e r_i são os conjuntos de parâmetros denominados parâmetros consequentes.

$$O_{4,i} = \bar{w}_i z_i = \bar{w}_i (p_i x + q_i y + r_i) \quad (49)$$

Por fim, a Camada 5 caracteriza-se por um único nó fixo, que possui a função de calcular a saída (z) do sistema neuro-fuzzy a partir da soma de todos os sinais de entrada, conforme a Equação 50.

$$O_{5,i} = z = \sum_i \bar{w}_i z_i \quad (50)$$

Jang (1993) aponta que quando os parâmetros de premissa são fixos, a saída do sistema pode ser expressa como uma combinação linear dos parâmetros consequentes a partir da Equação 51.

$$z = (\bar{w}_1 x) p_1 + (\bar{w}_1 y) q_1 + (\bar{w}_1) r_1 + (\bar{w}_2 x) p_2 + (\bar{w}_2 y) q_2 + (\bar{w}_2) r_2 \quad (51)$$

A combinação linear representada pela Equação 51 é importante pelo fato de que ela possibilita que o processo de aprendizagem híbrida (*hybrid learning*), proposto por Jang (1993), possa ser implementado. Por esse processo de aprendizagem, na fase para a frente, as saídas dos nós prosseguem até a Camada 4 e os parâmetros consequentes são identificados pelo método dos mínimos quadrados. Após isso, na fase para trás, o sinal de erro se propaga ao longo do sistema e os parâmetros de premissa são modificados pelo método do gradiente descendente (*gradient descent*) (JANG, 1993; JANG, SUN e MIZUTANI, 1997). Dessa forma, o sistema neuro-fuzzy do tipo ANFIS busca se aproximar do padrão de respostas desejado, compreendendo o fenômeno em análise, além de permitir que os parâmetros inerentes às funções de pertinência na parte antecedente sejam modificados, desenvolvendo conjuntos fuzzy com funções de pertinência otimizadas para o problema.

Para o funcionamento do ANFIS, é necessário que o sistema apresente uma estrutura inicial, com os conjuntos fuzzy e as funções de pertinência estabelecidos. Jang, Sun e Mizutani (1997) apontam diversos métodos que podem ser utilizados no desenvolvimento

dessas estruturas iniciais, como o método de repartição em grades (*grid partitioning*) e o agrupamento subtrativo (*subtractive clustering*). O método de repartição em grades é caracterizado pela divisão do domínio das variáveis antecedentes em tamanhos igualmente espaçados com funções de pertinência de mesmo formato.

No caso do método de agrupamento subtrativo, proposto por Chiu (1994), cada ponto do domínio das variáveis ($x_1, x_2, x_3 \dots x_n$) é candidato ao centro do agrupamento, fazendo com que ele apresente uma densidade que pode ser calculada pela Equação 52.

$$D_i = \sum_{j=1}^n \exp\left(-\frac{\|x_i - x_j\|^2}{\left(\frac{r_a}{2}\right)^2}\right) \quad (52)$$

Onde:

D_i : densidade do ponto x_i ;

r_a : constante positiva referente ao raio de influência do ponto ao centro.

Em cada ponto, é calculada a sua densidade, e o ponto que tiver a maior delas será o centro do agrupamento, sendo denominado x_{c1} , e sua respectiva densidade, D_{c1} . Posteriormente, a densidade novamente é mensurada para cada ponto pela Equação 53. Com estas novas densidades, o novo centro de agrupamento, x_{c2} , é escolhido. O processo continua com o cálculo novamente da densidade até que tenham sido formados suficientes centros de agrupamento.

$$D_i = D_i - D_{c1} \exp\left(-\frac{\|x_i - x_{c1}\|^2}{\left(\frac{r_b}{2}\right)^2}\right) \quad (53)$$

Onde:

r_b : constante positiva.

Sistemas neuro-fuzzy foram utilizados em diversos estudos em Mecânica das Rochas, como podem ser citados os trabalhos de Grima (2000), Grima, Bruines e Verhoef (2000), Gokceoglu *et al.* (2004), Singh e Singh (2006), Noorani, Kordi e Ghazvinian (2010), Jalalifar *et al.* (2011), Yesiloglu-Gultekin *et al.* (2013), Alireza e Somaieh (2013), Sadrossadat *et al.* (2018), Matos (2018), entre outros.

Gokceoglu *et al.* (2004) utilizaram um modelo neuro-fuzzy para estimar o módulo de deformação de maciços rochosos. Os resultados fornecidos pelo sistema neuro-fuzzy

desenvolvido foram mais próximos dos observados experimentalmente do que as previsões realizadas por formulações empíricas utilizadas pelos autores.

Singh e Singh (2006), por sua vez, desenvolveram modelos neuro-fuzzy e utilizando redes neurais artificiais para as previsões do coeficiente de Poisson e do módulo de Young de rochas intactas. Os autores utilizaram como variáveis de entrada em seus modelos as propriedades da rocha intacta, como a resistência à compressão uniaxial e a resistência à tração. Comparando os resultados fornecidos pelos modelos desenvolvidos, o sistema neuro-fuzzy apresentou estimativas mais próximas dos dados experimentais.

Como apresentado no Capítulo 2, Matos (2018) desenvolveu sistemas ANFIS para a previsão do comportamento cisalhante de descontinuidades rochosas sem preenchimento. Os modelos apresentaram resultados satisfatórios quando comparados com os dados experimentais utilizados em seus desenvolvimentos. No entanto, os modelos neuro-fuzzy obtidos pelo autor não consideram o material de preenchimento e a sua influência no comportamento cisalhante das descontinuidades rochosas, fato que levou ao presente trabalho.

3.5 Conclusões parciais

Os sistemas inteligentes são cada vez mais utilizados em Mecânica das Rochas, como na estimativa das propriedades da rocha intacta e dos maciços rochosos, na análise de estabilidade de taludes rochosos e na previsão do comportamento cisalhante das descontinuidades. Entre os diferentes sistemas inteligentes que são utilizados em engenharia, foram destacadas, neste capítulo, as redes neurais artificiais, a lógica fuzzy e as técnicas neuro-fuzzy, tendo em vista que os conceitos inerentes às suas formulações foram aplicados no desenvolvimento dos modelos para a previsão do comportamento cisalhante das descontinuidades rochosas presentes no trabalho.

A teoria dos conjuntos fuzzy busca representar o conhecimento humano sobre determinado problema e considerar as incertezas presentes no valor de uma variável. Isso é feito por meio das funções de pertinência que avaliam o quanto um elemento se encontra em um conjunto e, dessa forma, consideram possíveis valores que podem ser atribuídos à uma variável.

As redes neurais artificiais são processadores inteligentes que apresentam a capacidade de aprender sobre um determinado problema e reproduzir esse conhecimento em suas estimativas. A partir da exposição de um conjunto de dados de entrada e de saída, as redes neurais artificiais são treinadas e conseguem compreender as diversas relações existentes entre as variáveis de um sistema, buscando representar o padrão de entrada-saída apresentados.

Os sistemas neuro-fuzzy promovem o desenvolvimento dos conjuntos fuzzy por meio dos conceitos inerentes ao processo de aprendizagem das redes neurais artificiais. Dessa forma, há a consideração das incertezas que envolvem as variáveis presentes em um problema por meio das funções de pertinência e dos conjuntos fuzzy, os quais são formados pela consideração do padrão entre os dados de entrada e de saída.

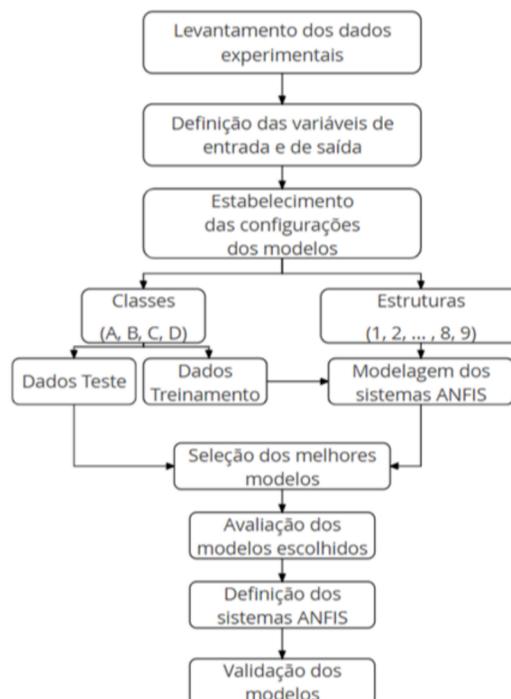
CAPÍTULO 4: MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Introdução

A Figura 19 expõe as etapas metodológicas realizadas no presente trabalho. Inicialmente, coletaram-se dados de ensaios de cisalhamento direto obtidos e apresentados por diversos autores. Por meio dessas informações, foram definidas as variáveis de entrada e de saída que são utilizadas no desenvolvimento dos sistemas neuro-fuzzy do tipo ANFIS. O processo sucedeu-se com o estabelecimento de diferentes configurações de modelos em classes e em estruturas. As classes especificam os dados experimentais de treinamento e de teste, cabendo às estruturas designar as características dos modelos.

Ainda de acordo com a Figura 19, a modelagem dos sistemas ANFIS baseia-se na utilização dos dados experimentais escolhidos nas diversas estruturas estabelecidas. Os melhores modelos são selecionados a partir da comparação entre as previsões fornecidas pelos sistemas e os dados experimentais de teste. Posteriormente, suas estimativas são avaliadas em diferentes situações, de maneira a se definir os sistemas neuro-fuzzy do tipo ANFIS que são utilizados, neste trabalho, para a previsão do comportamento cisalhante das descontinuidades rochosas. Por fim, os modelos passam por um processo de validação.

Figura 19 – Etapas metodológicas realizadas no desenvolvimento dos modelos ANFIS.



Fonte: Autor.

Tendo como fundamento as informações apresentadas na Figura 19, são detalhados os seguintes tópicos:

- Levantamento dos dados experimentais;
- Definição das variáveis de entrada e de saída;
- Configurações analisadas para os modelos;
- Modelagem no *software*;
- Seleção e avaliação dos modelos estudados;
- Validação dos sistemas neuro-fuzzy.

4.2 Levantamento dos dados experimentais

Foram obtidos dados provenientes de 116 ensaios de cisalhamento direto apresentados por Benmokrane e Ballivy (1989), Skinas, Bandis e Demiris (1990), Papaliangas *et al.* (1993), Haque (1999), Indraratna e Haque (2000), Oliveira, Indraratna e Nemcik (2009), Indraratna, Oliveira e Brown (2010), Mehrishal *et al.* (2016) e Shrivastava e Rao (2018). Isso gerou um conjunto de dados de 2098 pontos gráficos referentes ao registro das medidas de tensão de cisalhamento e de dilatância em função dos deslocamentos cisalhantes nos ensaios.

Além das medidas de dilatância e de tensão de cisalhamento em função dos deslocamentos cisalhantes, foram levantadas as condições de contorno às quais as descontinuidades estavam submetidas, as propriedades das descontinuidades, dos materiais de preenchimento e da rocha intacta. Dessa forma, coletaram-se dados de rigidez normal de contorno, tensão normal inicial, JRC, relação entre a espessura do preenchimento e a amplitude das asperezas, os ângulos de atrito do preenchimento e básico da rocha intacta, e a resistência à compressão uniaxial da rocha intacta. O levantamento de todas essas informações tem como objetivo contemplar os fatores que governam o comportamento cisalhante das descontinuidades rochosas.

4.3 Definição das variáveis de entrada e de saída

De acordo com os dados experimentais levantados, expostos no Item 4.2, para as previsões da tensão de cisalhamento (τ), em MPa, e da dilatância (δ_v), em mm, as seguintes variáveis de entrada foram utilizadas nos modelos neuro-fuzzy do tipo ANFIS:

- Rigidez normal de contorno (k_n), em kPa/mm;

- Relação entre a espessura do preenchimento e a amplitude da aspereza (t/a);
- Tensão normal inicial (σ_{n0}), em MPa;
- Coeficiente de rugosidade da descontinuidade (JRC);
- Resistência à compressão uniaxial da rocha intacta (σ_c), em MPa;
- Ângulo de atrito básico da rocha intacta (ϕ_b), em graus;
- Ângulo de atrito do material de preenchimento (ϕ_{fill}), em graus;
- Deslocamento cisalhante (δ_h), em mm.

Os valores máximos e mínimos dos dados experimentais das variáveis definidas são apresentados na Tabela 1. Esses valores limitam os intervalos considerados para as variáveis de entrada, tendo em vista os dados que foram utilizados na modelagem, desenvolvendo todas as funções de pertinência e regras de inferência fuzzy.

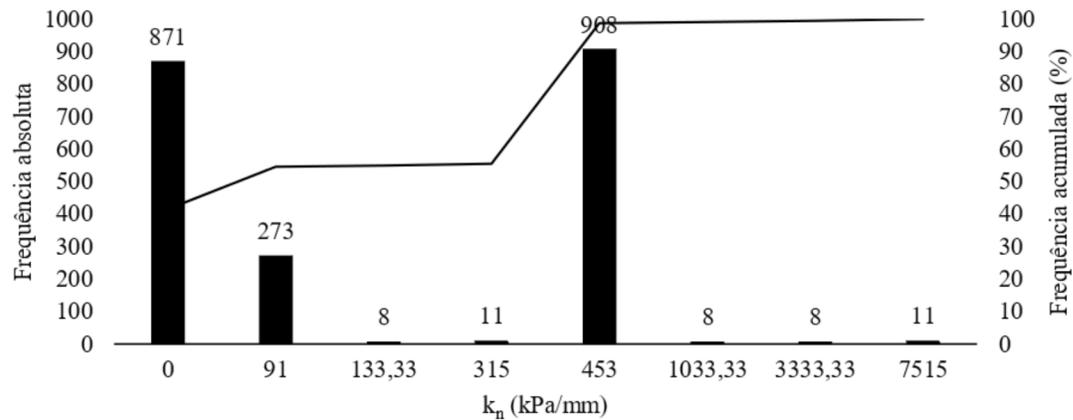
Tabela 1 – Valores máximos e mínimos das variáveis consideradas.

Variáveis de entrada								Variáveis de saída	
k_n kPa/mm	t/a	σ_{n0} MPa	JRC	σ_c MPa	ϕ_b graus	ϕ_{fill} graus	δ_h mm	δ_v mm	τ MPa
0	0	0,05	2	3,5	30	0	0,02	-2,43	0,02
7515	2	46,5	20	150	37,5	35,5	26	4,97	6,68

Fonte: Autor.

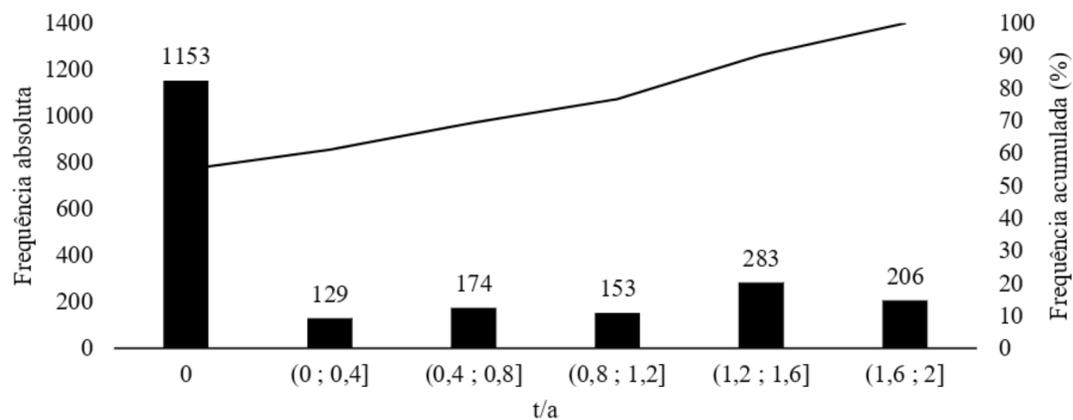
As frequências dos dados experimentais das variáveis de entrada consideradas nos sistemas neuro-fuzzy são ilustradas nas Figuras 20 a 27. Pelas figuras, é possível observar que os dados apresentam intervalos consideráveis para as variáveis, contemplando condições variadas, como CNL, CNS, descontinuidades sem e com preenchimento em diversas relações t/a , pouco rugosas, muito rugosas, rochas brandas e duras. É válido ressaltar que, nos casos em que não há preenchimento na descontinuidade, além de t/a igual a zero, foi atribuído o valor de zero para ϕ_{fill} .

Ainda de acordo com as Figuras 20 a 27, nota-se que as frequências não são uniformes, fazendo com que, em determinados casos, haja a concentração de dados em faixas ou valores específicos, o que pode ser uma limitação dos modelos desenvolvidos. Essa situação pode ser contornada na medida em que novos dados são inseridos nos sistemas neuro-fuzzy.

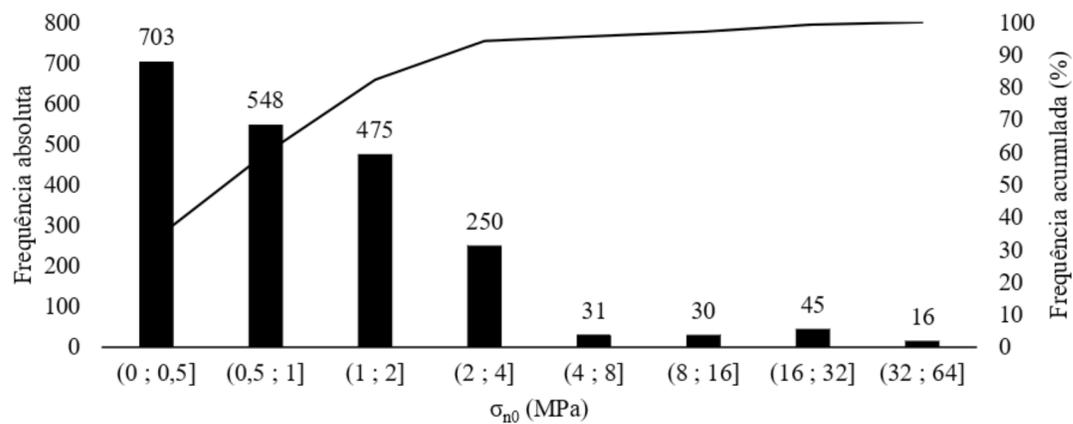
Figura 20 – Frequência de k_n .

Fonte: Autor.

Figura 21 – Frequência de t/a.

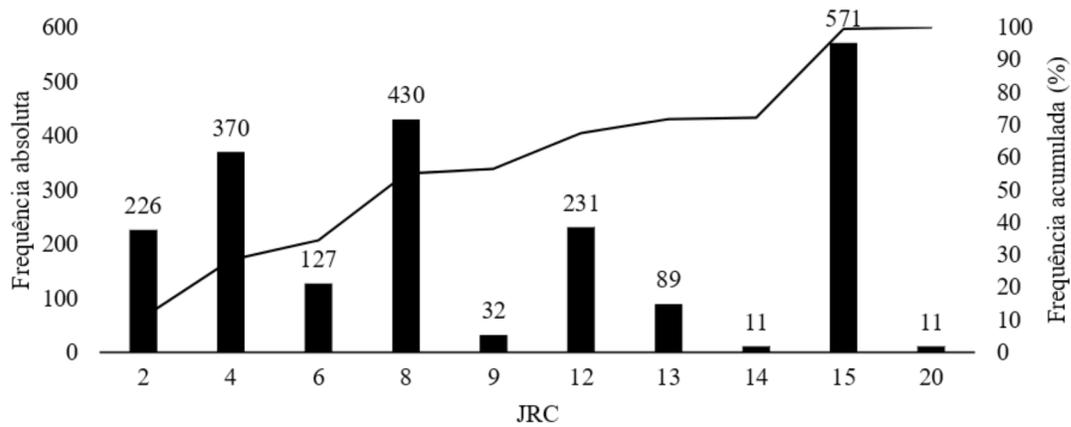


Fonte: Autor.

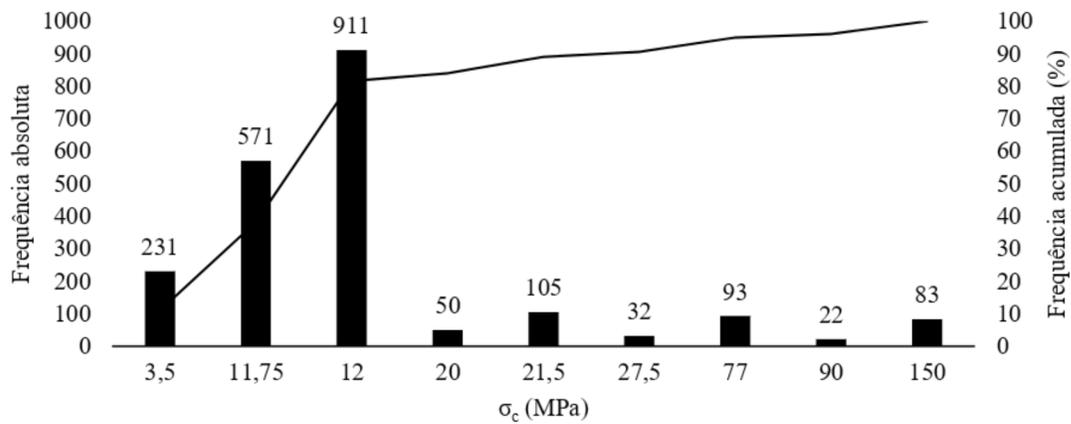
Figura 22 – Frequência de σ_{n0} .

Fonte: Autor.

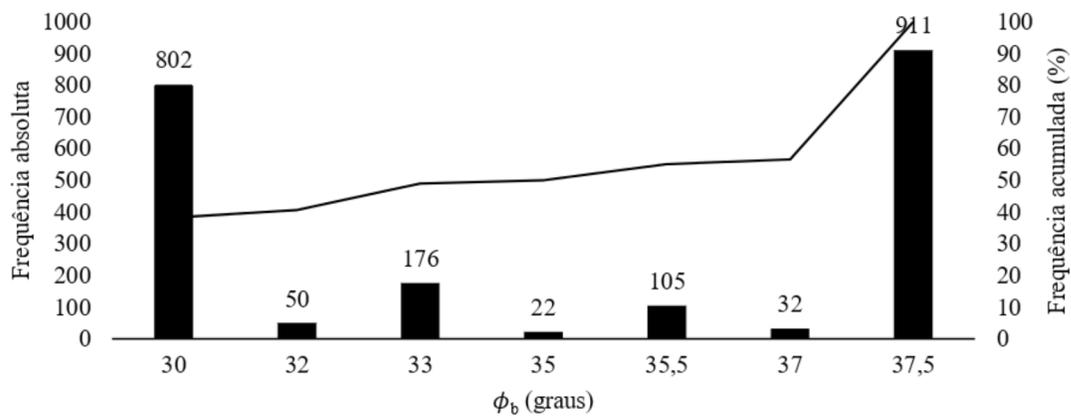
Figura 23 – Frequência de JRC.



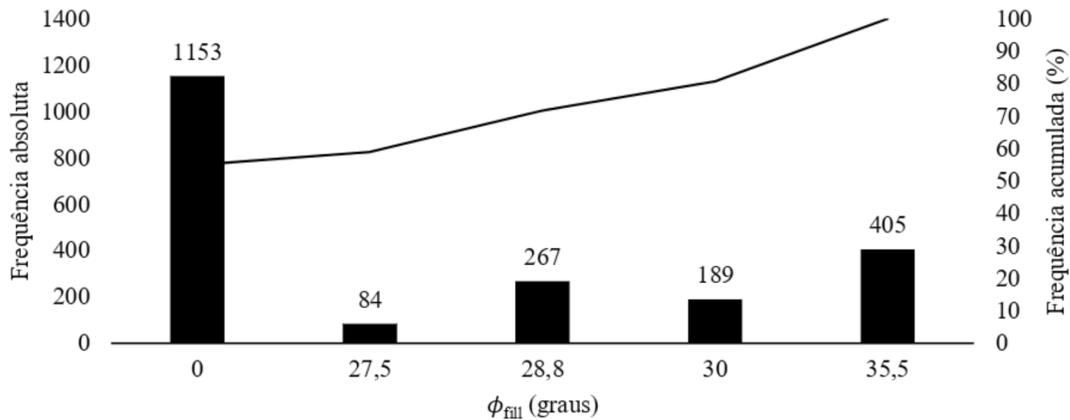
Fonte: Autor.

Figura 24 – Frequência de σ_c .

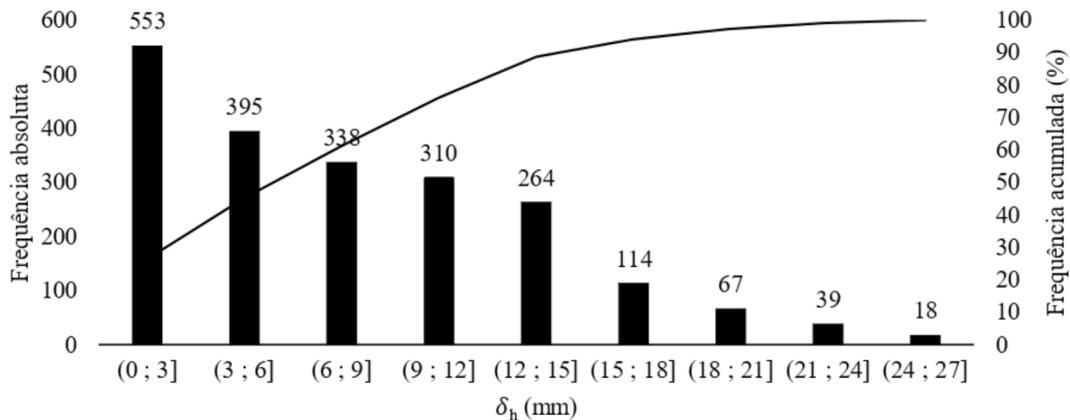
Fonte: Autor.

Figura 25 – Frequência de ϕ_b .

Fonte: Autor.

Figura 26 – Frequência de ϕ_{fill} .

Fonte: Autor.

Figura 27 – Frequência de δ_h .

Fonte: Autor.

4.4 Configurações analisadas para os modelos

Os modelos neuro-fuzzy possuem as variáveis de entrada apresentadas no Item 4.3, e somente uma variável de saída, fazendo com que seus processos de desenvolvimento, de seleção e de validação sejam realizados separadamente para a dilatação e para a tensão de cisalhamento. Dessa forma, foram estabelecidas quatro classes de grupos de modelos, as quais são detalhadas a seguir:

- Classe A: Foram utilizados 80% dos dados experimentais para a fase de treinamento, escolhidos de maneira aleatória, enquanto 20% foram respectivos à fase de teste;

- Classe B: Foram utilizados 80% dos ensaios para a fase de treinamento, escolhidos de maneira aleatória, enquanto 20% foram respectivos à fase de teste;
- Classe C: Foram utilizados 50% dos dados experimentais para a fase de treinamento, escolhidos de maneira aleatória, enquanto os outros 50% foram respectivos à fase de teste;
- Classe D: Foram utilizados 50% dos ensaios para a fase de treinamento, escolhidos de maneira aleatória, enquanto os outros 50% foram respectivos à fase de teste.

Isso foi feito com o objetivo de avaliar como metodologias diferentes de criação de classes de dados iriam influenciar na previsão do comportamento cisalhante das descontinuidades rochosas por parte dos modelos. Após a definição dessas classes, foram estabelecidas as seguintes estruturas iniciais que seriam utilizadas na fase de treinamento dos sistemas neuro-fuzzy:

- Estrutura 1: gerada pelo método de repartição em grades, apresentando 2 funções de pertinência do tipo gaussiana para as oito variáveis de entrada;
- Estrutura 2: gerada pelo método de repartição em grades, apresentando 3 funções de pertinência do tipo gaussiana para a variável de entrada t/a , e 2 funções de pertinência do mesmo tipo para as demais variáveis;
- Estrutura 3: gerada pelo método de repartição em grades, apresentando 3 funções de pertinência do tipo gaussiana para as variáveis de entrada t/a e δ_h , e 2 funções de pertinência do mesmo tipo para as demais variáveis;
- Estrutura 4: gerada pelo método de repartição em grades, apresentando 3 funções de pertinência do tipo gaussiana para as variáveis de entrada t/a , δ_h , k_n e σ_c , e 2 funções de pertinência do mesmo tipo para as demais variáveis;
- Estrutura 5: gerada pelo método de agrupamento subtrativo, em que o número de funções de pertinência do tipo gaussiana é obtido para cada caso pertencente às classes de modelos;
- Estrutura 6: a variável ϕ_b não é considerada, sendo a estrutura inicial gerada pelo método de repartição em grades, apresentando 2 funções de pertinência do tipo gaussiana para as demais variáveis de entrada;
- Estrutura 7: a variável ϕ_b não é considerada, sendo a estrutura inicial gerada pelo método de repartição em grades, apresentando 3 funções de pertinência do

tipo gaussiana para as variáveis de entrada t/a e δ_h , e 2 funções de pertinência do mesmo tipo para as demais variáveis;

- Estrutura 8: as variáveis ϕ_b e ϕ_{fill} não são consideradas, sendo a estrutura inicial gerada pelo método de repartição em grades, apresentando 2 funções de pertinência do tipo gaussiana para as demais variáveis de entrada;
- Estrutura 9: as variáveis ϕ_b e ϕ_{fill} não são consideradas, sendo a estrutura inicial gerada pelo método de repartição em grades, apresentando 3 funções de pertinência do tipo gaussiana para as variáveis de entrada t/a e δ_h , e 2 funções de pertinência do mesmo tipo para as demais variáveis.

Logo, foi possível avaliar como a mudança nas configurações dos sistemas, ou seja, suas estruturas iniciais, com a consideração ou não de todas as variáveis de entrada, o aumento do número das funções de pertinência e, conseqüentemente, das regras de inferência dos sistemas neuro-fuzzy, poderia influenciar no desempenho dos modelos desenvolvidos. A escolha por funções de pertinência do tipo gaussiana nos modelos neuro-fuzzy foi baseada nos resultados satisfatórios obtidos em pesquisas, como os trabalhos apresentados por Singh e Singh (2006), Jalalifar *et al.* (2011), Matos (2018), entre outros.

Neste trabalho, a denominação dos modelos neuro-fuzzy caracteriza-se pela variável de saída, seguida da classe e a respectiva estrutura inicial adotada. Por exemplo, o modelo “T.Cisalhamento – A2” realiza uma estimativa da tensão de cisalhamento, em que, para o seu desenvolvimento, foi utilizada a Classe A de dados e a Estrutura 2 e, para o modelo “Dilatância – C4”, ocorre o cálculo da dilatância em um sistema que foi desenvolvido a partir da Classe C de dados por meio da Estrutura 4. Assim, uma vez que cada modelo neuro-fuzzy apresenta somente uma variável de saída, sendo utilizadas 4 classes de dados em 9 tipos de estruturas, ocasiona no desenvolvimento de 72 modelos.

4.5 Modelagem no *software*

O *software* escolhido para o desenvolvimento dos modelos neuro-fuzzy do tipo ANFIS foi o MATLAB. Este programa foi utilizado em diversos estudos que aplicam as técnicas neuro-fuzzy, podendo citar as pesquisas de Jalalifar *et al.* (2011), Yesiloglu-Gultekin *et al.* (2013), Matos (2018), entre outras.

O MATLAB permite implementar diversas metodologias de desenvolvimento dos sistemas neuro-fuzzy, como configurações das funções de pertinência, estruturas iniciais e

técnicas de aprendizagem. Com isso, foi possível alterar as propriedades dos modelos de maneira a avaliar como essas modificações influenciam na previsão do comportamento cisalhante das descontinuidades rochosas. Além disso, ressalta-se que os modelos ANFIS desenvolvidos são baseados nos princípios dos sistemas de inferência fuzzy de Takagi e Sugeno (1983) e da aprendizagem híbrida, proposta por Jang (1993).

O processo de modelagem dos sistemas neuro-fuzzy inicia-se a partir dos dados experimentais de treinamento, escolhidos de acordo com a classe definida. No *software*, são estabelecidas as propriedades da estrutura inicial do modelo, as variáveis de entrada e de saída consideradas, e as características das funções de pertinência, como o formato e a quantidade. Nesta fase de treinamento, o modelo é desenvolvido a partir da comparação entre os resultados de sua variável de saída, dilatação ou tensão de cisalhamento, e os dados experimentais, originando os parâmetros que vão formar as funções de pertinência e as regras de inferência fuzzy, de maneira a se obter o sistema neuro-fuzzy com o menor erro possível.

No *software*, é válido comentar que foi utilizada a técnica de aprendizagem híbrida, apresentada no Capítulo 3, em que tanto os parâmetros de premissa quanto os consequentes foram otimizados em busca do desenvolvimento do melhor modelo, sendo utilizadas 50 épocas (*Epochs*) para a fase de treinamento e atribuída tolerância zero para os erros. No entanto, em determinados casos, principalmente nos sistemas em que foi utilizada a técnica de agrupamento subtrativo nas estruturas iniciais, foram necessárias mais épocas para o desenvolvimento do modelo de menor erro. Além disso, nos casos em que a estrutura inicial era baseada na técnica de agrupamento subtrativo, os parâmetros presentes no programa, como intervalo de influência (*range of influence*), taxa de aceitação (*accept ratio*), entre outros, foram mantidos com os valores padrão.

4.6 Seleção e avaliação dos modelos estudados

O critério de seleção dos melhores sistemas ANFIS desenvolvidos baseia-se na comparação entre as previsões realizadas pelos modelos e os dados experimentais de teste (fase de teste), os quais são provenientes das classes estabelecidas, e não foram utilizados no processo de modelagem. Esta comparação é feita por meio do coeficiente de determinação (R^2) (TRIOLA, 2008; MATOS, 2018; LEITE, 2019). Dito isto, foram selecionados os modelos neuro-fuzzy que permitiram a obtenção de valores de R^2 nesta fase de teste de, no mínimo, 0,95.

Os modelos ANFIS selecionados foram submetidos a um processo de avaliação de desempenho, com o objetivo de verificar se os sistemas conseguem expressar de maneira

satisfatória a influência das variáveis de entrada nos valores de dilatância e de tensão de cisalhamento previstos. Isto foi feito a partir da estimativa do comportamento cisalhante de descontinuidades hipotéticas, e da comparação entre os resultados fornecidos pelos sistemas neuro-fuzzy e os dados experimentais utilizados em seus desenvolvimentos. Dessa forma, os modelos que apresentaram os melhores desempenhos nesta etapa foram definidos para a previsão do comportamento cisalhante das descontinuidades rochosas.

4.7 Validação dos sistemas neuro-fuzzy

Inicialmente, a validação dos sistemas neuro-fuzzy consistiu na comparação entre as estimativas fornecidas pelos modelos ANFIS definidos, e os dados experimentais utilizados em seus desenvolvimentos. Isto tem como objetivo verificar a correlação entre os resultados, avaliando se os modelos ANFIS estão prevendo de maneira satisfatória o comportamento cisalhante das descontinuidades rochosas. Além disso, foi feita a comparação com os resultados fornecidos por outros modelos existentes, como os analíticos de Barton (1973a) e Indraratna e Haque (2000), os que utilizam redes neurais artificiais, Dantas Neto *et al.* (2017) e Leite (2019), e o modelo neuro-fuzzy de Matos (2018).

Descontinuidades hipotéticas também foram utilizadas no processo de validação. Neste caso, os resultados fornecidos pelos sistemas ANFIS foram comparados com os obtidos pelos modelos de Barton (1973a), Dantas Neto *et al.* (2017), Matos (2018) e Leite (2019). Isto foi feito com o objetivo de avaliar a compatibilidade entre as estimativas fornecidas pelos diferentes modelos, em descontinuidades rochosas com e sem preenchimento, as quais não foram utilizadas no processo de modelagem dos sistemas ANFIS.

CAPÍTULO 5: MODELOS NEURO-FUZZY PARA PREVISÃO DO COMPORTAMENTO CISALHANTE DE DESCONTINUIDADES ROCHOSAS

5.1 Introdução

O Capítulo 5, nos Itens 5.2, 5.3 e 5.4, tem como objetivo apresentar os resultados referentes aos processos de desenvolvimento, seleção, definição e validação dos sistemas neuro-fuzzy do tipo ANFIS para previsão do comportamento cisalhante das descontinuidades rochosas, por meio das estimativas de dilatância e de tensão de cisalhamento. Por fim, no Item 5.5, são discutidas as limitações dos modelos definidos.

5.2 Sistemas neuro-fuzzy do tipo ANFIS para a previsão da dilatância

No Item 5.2.1, são apresentados os dados obtidos da modelagem dos sistemas neuro-fuzzy do tipo ANFIS para a previsão da dilatância, com a consequente seleção dos melhores modelos, de acordo com os critérios previamente adotados no Capítulo 4. Em seguida, no Item 5.2.2, expõem-se os resultados referentes à avaliação dos modelos selecionados no que diz respeito à influência das variáveis de entrada em suas previsões, definindo o melhor sistema neuro-fuzzy com base em seu desempenho. Por fim, no Item 5.2.3, apresentam-se as propriedades do modelo definido para a previsão da dilatância de descontinuidades rochosas.

5.2.1 Resultados da modelagem e seleção dos melhores modelos

A Tabela 2 apresenta a relação entre as propriedades dos modelos Classe A no que se refere à estrutura inicial, quantidade de variáveis de entrada e de funções de pertinência adotadas, e os valores dos coeficientes de determinação (R^2), obtidos da comparação entre as previsões de dilatância dos sistemas neuro-fuzzy e os dados experimentais utilizados nas fases de treinamento e de teste. Ressalta-se que, para essa classe de modelos, 80% dos dados experimentais foram utilizados para a etapa de treinamento e 20% para a de teste.

Observa-se, pela Tabela 2, que a consideração de menos variáveis de entrada nos sistemas neuro-fuzzy Classe A comprometeu as previsões de dilatância obtidas nas fases de treinamento e de teste. Isso pode ser comprovado a partir da comparação entre os valores de R^2 calculados com os modelos Dilatância – A1 e Dilatância – A6, uma vez que, para o primeiro,

foram utilizadas oito variáveis de entrada, sendo obtidos valores de R^2 nas fases de treinamento e de teste de 0,99, aproximadamente, e, para o segundo, resultados de R^2 próximos de 0, quando sete variáveis de entrada foram adotadas.

Tabela 2 – Resultados da modelagem dos sistemas Classe A de dilatância.

Modelo	Variáveis de entrada	Estrutura inicial	Funções de pertinência	R^2 teste	R^2 treinamento
A1	8	Repartição em grades	2	0,9876	0,9877
A2	8	Repartição em grades	2, exceto t/a (3)	0,9903	0,9916
A3	8	Repartição em grades	2, exceto t/a e δ_h (3)	0,9896	0,9941
A4	8	Repartição em grades	2, exceto t/a, δ_h , k_n e σ_c (3)	0,9887	0,9941
A5	8	Agrupamento subtrativo	14	0,9229	0,9092
A6	7	Repartição em grades	2	0,0016	0,0107
A7	7	Repartição em grades	2, exceto t/a e δ_h (3)	0,1435	0,2557
A8	6	Repartição em grades	2	0,0019	0,0078
A9	6	Repartição em grades	2, exceto t/a e δ_h (3)	0,0104	0,0196

Fonte: Autor.

Outro aspecto que pode ser destacado diz respeito ao número de funções de pertinência adotadas para as variáveis de entrada. À princípio, poderia se pensar que o aumento do número de funções de pertinência iria promover um maior detalhamento do fenômeno e trabalho dos dados, de maneira a fazer com que os modelos apresentassem melhor desempenho na previsão do comportamento cisalhante das descontinuidades. O que foi possível observar pelos resultados apresentados na Tabela 2 é que esse aumento do número de funções de pertinência, por exemplo, ao longo dos modelos Dilatância – A1, A2, A3 e A4, fez com que, de fato, houvesse uma tendência de crescimento no valor do R^2 calculado na fase de treinamento, o que não correspondeu com os valores obtidos de R^2 na fase de teste.

Por meio dos resultados da modelagem dos sistemas Dilatância – A1 e A2, observa-se que um maior número de funções de pertinência para a variável t/a correspondeu ao aumento, mesmo que não tão expressivo, dos valores de R^2 obtidos nas fases de treinamento e de teste. No entanto, isso não ocorreu em todos os casos, como pode ser comprovado pela comparação entre os valores de R^2 medidos com os modelos Dilatância – A2, A3 e A4, uma vez que o aumento da quantidade de variáveis de entrada com mais funções de pertinência promoveu a redução do valor de R^2 calculado na fase de teste.

Somente tendo como critério o valor do R^2 , deve-se avaliar o aumento do número de funções de pertinência e, conseqüentemente, das regras de inferência fuzzy, nas variáveis de entrada em fenômenos que utilizem a técnica neuro-fuzzy, uma vez que essa alteração pode corresponder a um acréscimo do tempo operacional do *software* que pode não ser razoável do ponto de vista prático, ou mesmo da melhora da eficiência do modelo. Isto pode ser exemplificado pelos resultados advindos da aplicação do modelo Dilatância – A5, em que não foram obtidos os maiores valores de R^2 nas fases de treinamento e de teste, mesmo que esse sistema apresente o maior número de funções de pertinência para as variáveis de entrada, provenientes da estrutura inicial baseada na técnica de agrupamento subtrativo.

Logo, em relação aos modelos Classe A de dados apresentados na Tabela 2, os sistemas neuro-fuzzy Dilatância – A1, A2, A3 e A4 foram os selecionados para a avaliação de desempenho, discutida no Item 5.2.2. A escolha teve como base o critério de seleção de modelos que permitiram a obtenção de valores de R^2 na fase de teste de, no mínimo, 0,95, como apresentado no Capítulo 4.

A Tabela 3 relaciona as propriedades dos sistemas neuro-fuzzy Classe B com os respectivos valores de R^2 obtidos nas fases de treinamento e de teste. É válido ressaltar que essa classe de dados foi treinada com o uso de 80% dos ensaios experimentais para a fase de treinamento e 20% para a fase de teste. Nota-se, pela tabela, que grande parte dos modelos que permitiram a medição dos maiores valores de R^2 na fase de teste (acima de 0,9) não possui as oito variáveis de entrada, com exceção dos modelos Dilatância – B1 e B5, o que difere dos resultados apresentados na Tabela 2 para os modelos Classe A. Com isso, é possível concluir que diferentes classes de seleção de dados poderão fornecer melhores modelos em distintas estruturas fuzzy.

Ainda de acordo com a Tabela 3, observa-se que a diferença entre os valores calculados de R^2 nas fases de treinamento e de teste com os modelos Classe B tende a ser maior quando comparada com a da Classe A, o que é fruto da própria mudança de metodologia empregada entre as classes, em que, na Classe B, 20% de todos os ensaios não são considerados na etapa de treinamento, comprometendo o potencial de generalização do fenômeno por parte desses modelos. Em relação aos valores de R^2 medidos na fase de teste com os modelos Classe B, nota-se que eles são inferiores a 0,95 e, dessa forma, tais sistemas não foram utilizados em análises posteriores.

Tabela 3 – Resultados da modelagem dos sistemas Classe B de dilatação.

Modelo	Variáveis de entrada	Estrutura inicial	Funções de pertinência	R ² teste	R ² treinamento
B1	8	Repartição em grades	2	0,9215	0,9915
B2	8	Repartição em grades	2, exceto t/a (3)	0,7665	0,9923
B3	8	Repartição em grades	2, exceto t/a e δ_h (3)	0,7774	0,9958
B4	8	Repartição em grades	2, exceto t/a, δ_h , k_n e σ_c (3)	0,8479	0,9959
B5	8	Agrupamento subtrativo	14	0,9213	0,9085
B6	7	Repartição em grades	2	0,9382	0,9874
B7	7	Repartição em grades	2, exceto t/a e δ_h (3)	0,9172	0,9930
B8	6	Repartição em grades	2	0,9390	0,8936
B9	6	Repartição em grades	2, exceto t/a e δ_h (3)	0,7441	0,9319

Fonte: Autor.

A relação entre as propriedades dos sistemas neuro-fuzzy Classe C e os respectivos valores de R² calculados nas fases de treinamento e de teste é apresentada na Tabela 4. Como exposto no Capítulo 4, a Classe C é treinada a partir de 50% dos dados experimentais, sendo testada com os demais dados.

De acordo com a Tabela 4, observa-se que o tipo de metodologia empregada na Classe C para seleção de dados de treinamento e de teste fez com que houvesse, com maior frequência, uma expressiva diferença entre os valores de R² medidos nas fases de treinamento e de teste. Por exemplo, enquanto os sistemas neuro-fuzzy Dilatação – C1, C2, C3 e C4 permitiram a obtenção de elevados valores de R² na fase de treinamento, por volta de 0,99, foram calculados baixos resultados de R² na fase de teste, como 0,51, 0,52, 0,23 e 0,44.

Um sistema que permite a medição de um valor de R² na fase de teste que possa ser considerado baixo tem a tendência de não representar de maneira razoável o fenômeno estudado, tendo em vista que quando o modelo é executado com dados de entrada que não são os utilizados em seu treinamento, ele tende a apresentar resultados com maiores erros quando comparados aos valores esperados. Essa avaliação do valor do R² calculado na fase de teste permite que possa ser verificado como os sistemas neuro-fuzzy estão estimando as medidas de dilatação com dados de entrada diferentes dos que foram utilizados em seu desenvolvimento e, pela Tabela 4, observa-se que os maiores valores de R² medidos na fase de teste foram de 0,97 e 0,96, com a aplicação dos modelos Dilatação – C6 e C8, respectivamente. Em virtude

disso, eles foram utilizados posteriormente na análise de desempenho apresentada no Item 5.2.2.

A diferença entre as Classes A e C é a porcentagem de dados utilizada para a etapa de treinamento e de teste, ou seja, enquanto a primeira utiliza 80% dos dados para a etapa de treinamento, a segunda utiliza 50%. A partir da comparação entre os resultados expostos nas Tabelas 2 e 4, observa-se que foram obtidos valores de R^2 na fase de treinamento superiores a 0,9, o que pode ser considerado alto, com todos os modelos Classe C, sendo diferente do que ocorre com os sistemas Classe A, em que somente cinco dos nove modelos permitiram a medição de valores de R^2 na fase de treinamento superiores a 0,9. Isto poderia, à princípio, levar a considerações de que a metodologia empregada no desenvolvimento dos modelos Classe C é mais adequada para o fenômeno em estudo do que a adotada para a obtenção dos modelos Classe A.

Contudo, quando se comparam os valores de R^2 calculados na fase de teste com os sistemas Classes A e C, é possível observar expressivas diferenças. Na Classe C, somente com dois modelos foram medidos valores de R^2 na fase de teste superiores a 0,9, enquanto, na Classe A, cinco dos nove sistemas desempenharam tais resultados. Isso demonstra que a redução da quantidade de dados utilizados para o treinamento dos sistemas neuro-fuzzy formados pela Classe C prejudicou o potencial de entendimento, de representação e de generalização do fenômeno em estudo, ou seja, a previsão da dilatância no processo de cisalhamento das descontinuidades rochosas.

Tabela 4 – Resultados da modelagem dos sistemas Classe C de dilatância.

Modelo	Variáveis de entrada	Estrutura inicial	Funções de pertinência	R^2 teste	R^2 treinamento
C1	8	Repartição em grades	2	0,5139	0,9882
C2	8	Repartição em grades	2, exceto t/a (3)	0,5205	0,9913
C3	8	Repartição em grades	2, exceto t/a e δ_h (3)	0,2345	0,9937
C4	8	Repartição em grades	2, exceto t/a, δ_h , k_n e σ_c (3)	0,4387	0,9938
C5	8	Agrupamento subtrativo	13	0,1413	0,9365
C6	7	Repartição em grades	2	0,9707	0,9836
C7	7	Repartição em grades	2, exceto t/a e δ_h (3)	0,5046	0,9887
C8	6	Repartição em grades	2	0,9626	0,9751
C9	6	Repartição em grades	2, exceto t/a e δ_h (3)	0,8026	0,9872

Fonte: Autor.

A relação entre as propriedades dos sistemas neuro-fuzzy Classe D e os respectivos coeficientes de determinação obtidos na fase de modelagem é apresentada na Tabela 5. Ressalta-se que a Classe D foi treinada com o uso de 50% dos ensaios experimentais, sendo testada com os demais ensaios.

A partir da Tabela 5, nota-se que todos os valores de R^2 calculados na fase de teste com os modelos Classes D foram baixos, mesmo que por vezes os resultados de R^2 obtidos na fase de treinamento tenham sido elevados, como nos casos dos modelos Dilatância – D1 a D6. Dentre os diferentes motivos que levaram a este fato, pode-se destacar a própria metodologia empregada na criação da classe, uma vez que foram utilizados menos dados para a etapa de treinamento, fazendo com que o potencial de generalização dos modelos seja comprometido, reduzindo, ainda, os intervalos considerados das variáveis de entrada. Dessa forma, os modelos Classe D não foram utilizados em análises posteriores.

Tabela 5 – Resultados da modelagem dos sistemas Classe D de dilatação.

Modelo	Variáveis de entrada	Estrutura inicial	Funções de pertinência	R^2 teste	R^2 treinamento
D1	8	Repartição em grades	2	0,0000	0,9969
D2	8	Repartição em grades	2, exceto t/a (3)	0,0487	0,9975
D3	8	Repartição em grades	2, exceto t/a e δ_h (3)	0,0368	0,9990
D4	8	Repartição em grades	2, exceto t/a, δ_h , k_n e σ_c (3)	0,0468	0,9990
D5	8	Agrupamento subtrativo	15	0,0069	0,9732
D6	7	Repartição em grades	2	0,0008	0,9851
D7	7	Repartição em grades	2, exceto t/a e δ_h (3)	0,0014	0,6561
D8	6	Repartição em grades	2	0,0133	0,8463
D9	6	Repartição em grades	2, exceto t/a e δ_h (3)	0,0010	0,7565

Fonte: Autor.

5.2.2 Avaliação de desempenho dos modelos para previsão da dilatação

Após a exposição dos primeiros resultados da modelagem dos sistemas neuro-fuzzy para a previsão da dilatação em descontinuidades rochosas, apresentada no Item 5.2.1, foram escolhidos os melhores modelos para a avaliação de suas estimativas frente à variação dos parâmetros governantes do processo de cisalhamento. Os modelos selecionados para esse estudo e os respectivos resultados de R^2 obtidos na fase de teste são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Modelos de previsão da dilatação selecionados para avaliação de desempenho.

Classe de modelos	Estrutura	R ² teste
A	1	0,9876
	2	0,9903
	3	0,9896
	4	0,9887
C	6	0,9707
	8	0,9626

Fonte: Autor.

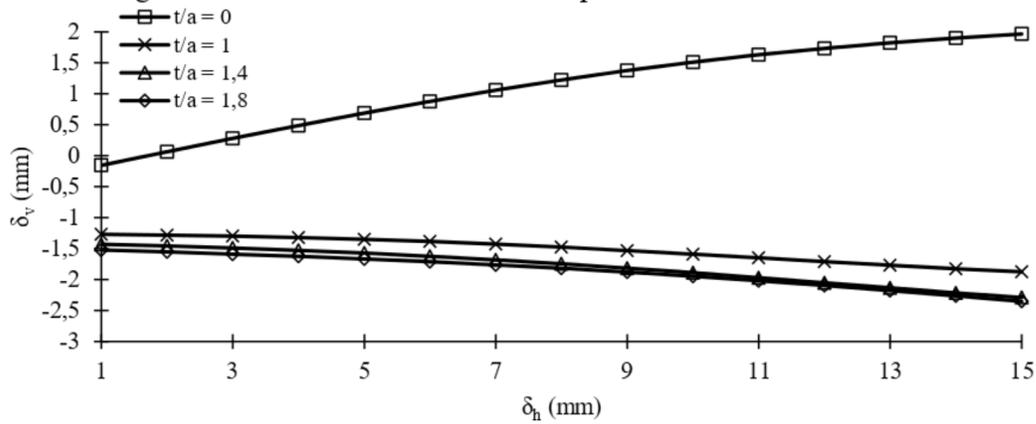
Com o objetivo de avaliar as previsões fornecidas pelos modelos escolhidos, os sistemas neuro-fuzzy foram testados em uma descontinuidade hipotética, tendo como base a combinação de características das descontinuidades hipotéticas apresentadas por Dantas Neto *et al.* (2017) e Leite (2019). Assim, em descontinuidades sem preenchimento, as propriedades escolhidas pelos citados autores são $JRC = 5$; $\sigma_c = 12$ MPa e $\phi_b = 37,5^\circ$, e, nos casos em que há preenchimento, além dos valores de dados de entrada citados, foi atribuído $\phi_{fill} = 35,5^\circ$.

Com a estimativa do comportamento cisalhante da descontinuidade hipotética, é possível verificar se os modelos conseguem expressar de maneira satisfatória a influência das variáveis de entrada nos valores de dilatação previstos. A seguir, são avaliadas as previsões dos sistemas Dilatância – A1, A2, A3, A4, C6 e C8.

Os modelos Dilatância – A2, A3 e A4, quando suas previsões foram avaliadas em descontinuidades preenchidas, com $k_n = 425$ kPa/mm e $\sigma_{n0} = 0,3$ MPa, apresentaram dificuldades em representar a influência da variação de t/a , principalmente a partir de $t/a = 1$, como pode ser observado nas Figuras 28, 29 e 30. Com base em estudos, como os realizados por Indraratna, Haque e Aziz (1998, 1999), esperava-se uma maior variação da dilatação quando t/a assume os valores de 1, 1,4 e 1,8. No entanto, pelas figuras, nota-se que não houve uma variação expressiva da dilatação para esses valores de t/a .

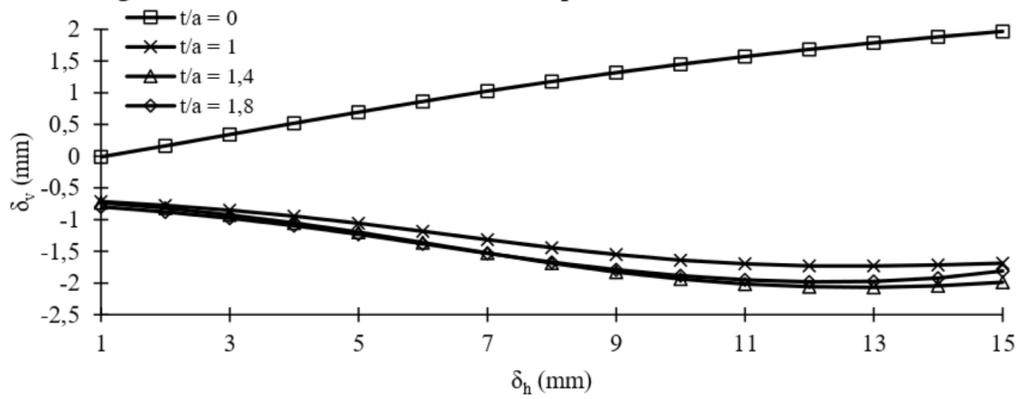
Diferentemente dos modelos Dilatância – A2, A3 e A4, o sistema neuro-fuzzy Dilatância – A1 conseguiu estimar de maneira satisfatória a influência de t/a em suas previsões, uma vez que a variação entre seus valores foi mais expressiva, conforme pode ser observado na Figura 31.

Figura 28 – Estudo da influência de t/a pelo modelo Dilatância – A2.



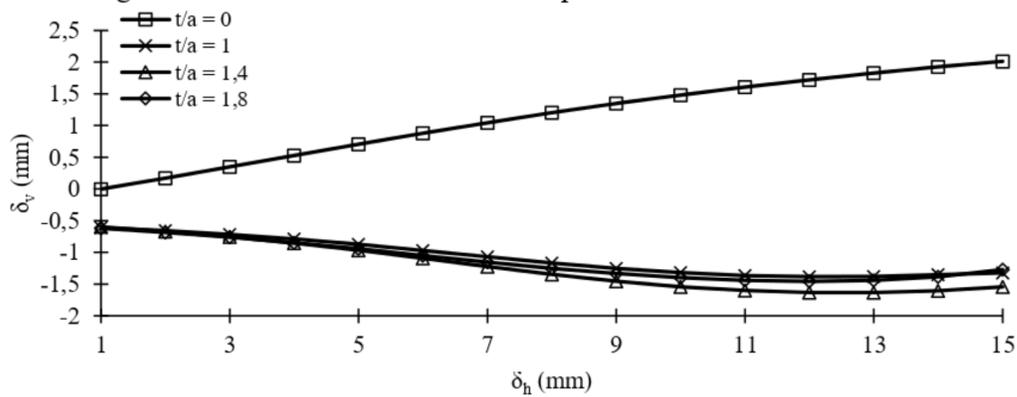
Fonte: Autor.

Figura 29 – Estudo da influência de t/a pelo modelo Dilatância – A3.

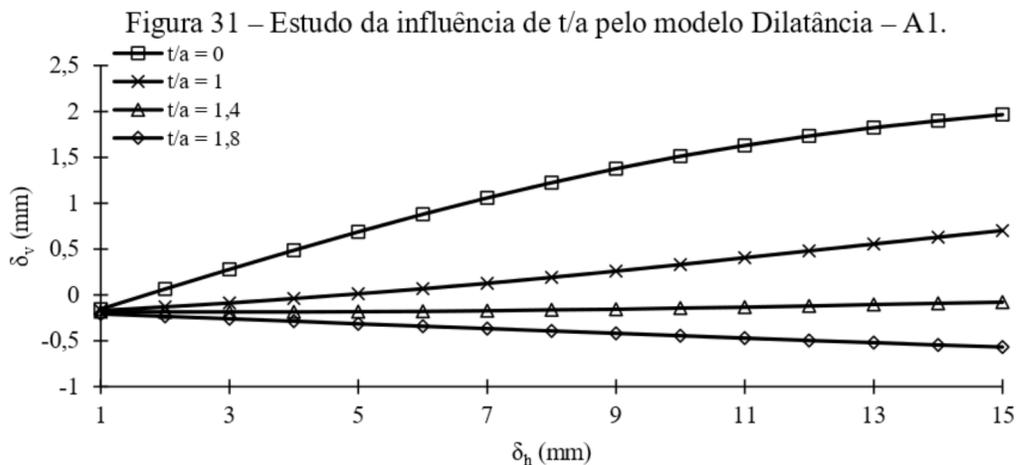


Fonte: Autor.

Figura 30 – Estudo da influência de t/a pelo modelo Dilatância – A4.



Fonte: Autor.

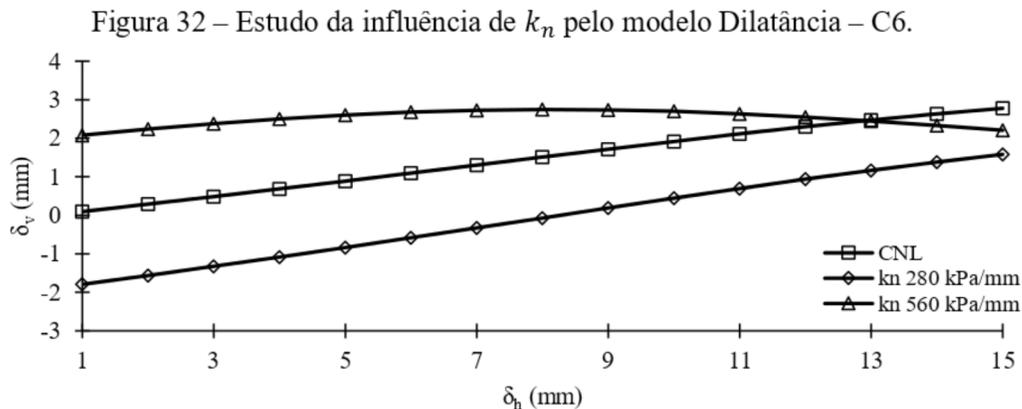


Fonte: Autor.

Os modelos Dilatância – C6 e C8 apresentaram dificuldades em suas previsões com a variação de k_n , conforme pode-se observar nas Figuras 32 e 33. Tendo como referência os trabalhos de Benmokrane e Ballivy (1989) e Skinas, Bandis e Demiris (1990), esperava-se que o aumento do valor de k_n promovesse a redução da dilatância.

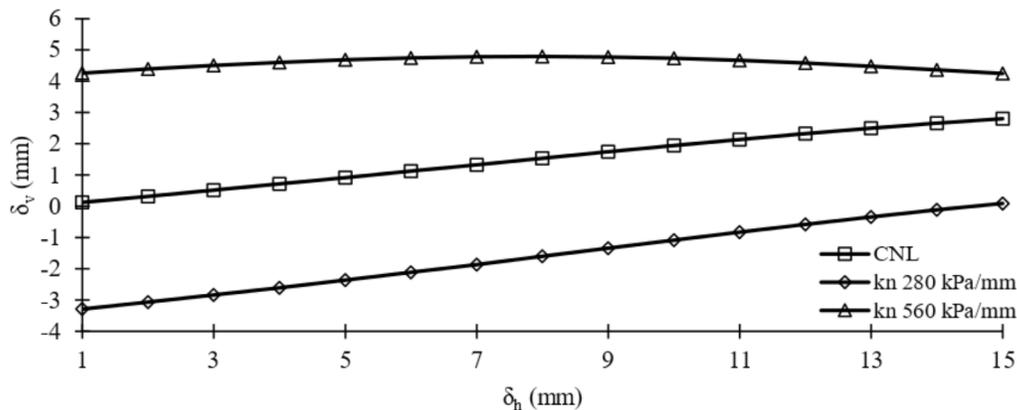
Observando as Figuras 32 e 33, nota-se que quando a descontinuidade hipotética sem preenchimento foi submetida à tensão normal inicial de 0,5 MPa e variava o valor de k_n da condição CNL para 280 kPa/mm, ocorria a redução da dilatância, o que corresponde à tendência esperada. No entanto, com o posterior aumento de k_n para 560 kPa/mm, foram obtidos maiores valores de dilatância que nos dois casos anteriores, o que sugere que os modelos Dilatância – C6 e C8 não estão compreendendo de maneira razoável o fenômeno.

Ao contrário dos modelos Dilatância – C6 e C8, as previsões do sistema Dilatância – A1 foram satisfatórias, uma vez que a redução da dilatância estimada com o aumento do valor de k_n foi compreendida, conforme apresentado na Figura 34.



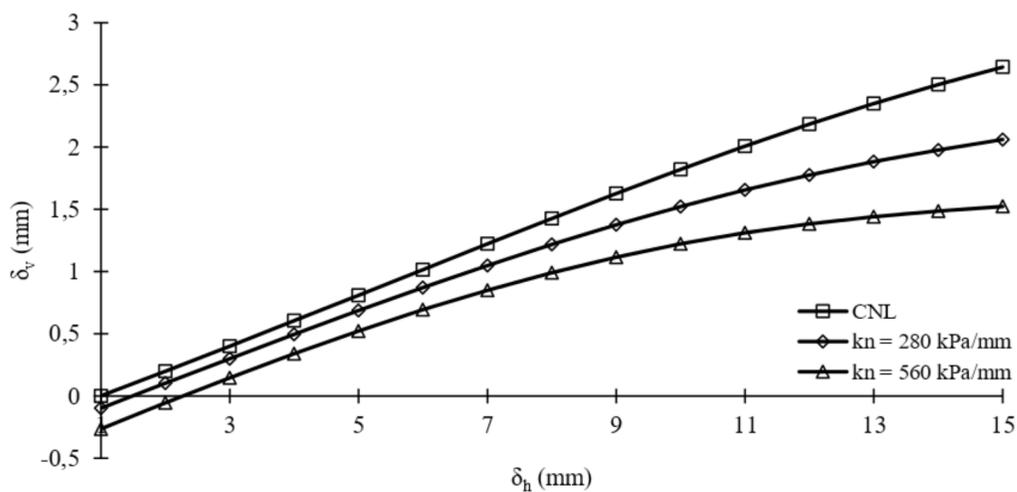
Fonte: Autor.

Figura 33 – Estudo da influência de k_n pelo modelo Dilatância – C8.



Fonte: Autor.

Figura 34 – Estudo da influência de k_n pelo modelo Dilatância – A1.

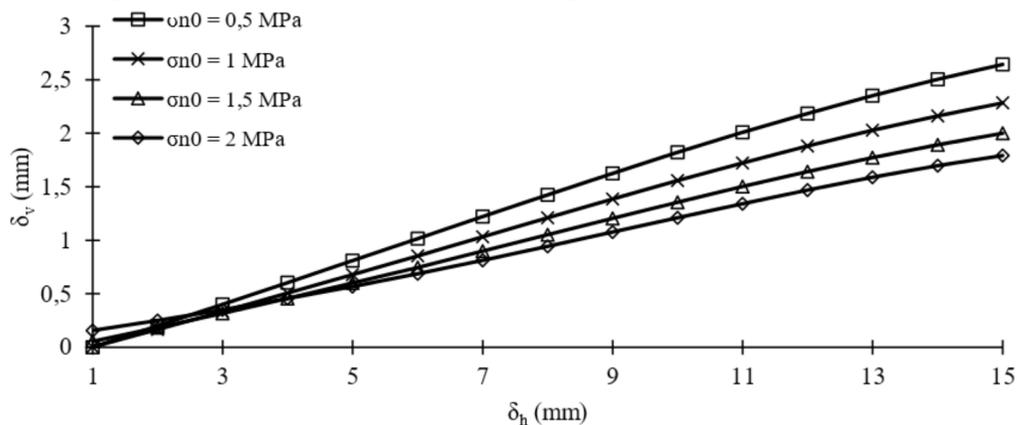


Fonte: Autor.

Com o objetivo de apresentar mais resultados estimados pelo modelo Dilatância – A1, as Figuras 35 e 36 representam como esse sistema neuro-fuzzy compreende a influência de outros parâmetros que governam o comportamento cisalhante das discontinuidades rochosas, como a tensão normal inicial (σ_{n0}) e o JRC, respectivamente. Tendo como referência os estudos de Haque (1999) e Indraratna *et al.* (2015), espera-se a redução da dilatação com o aumento do valor de σ_{n0} e com a redução de JRC.

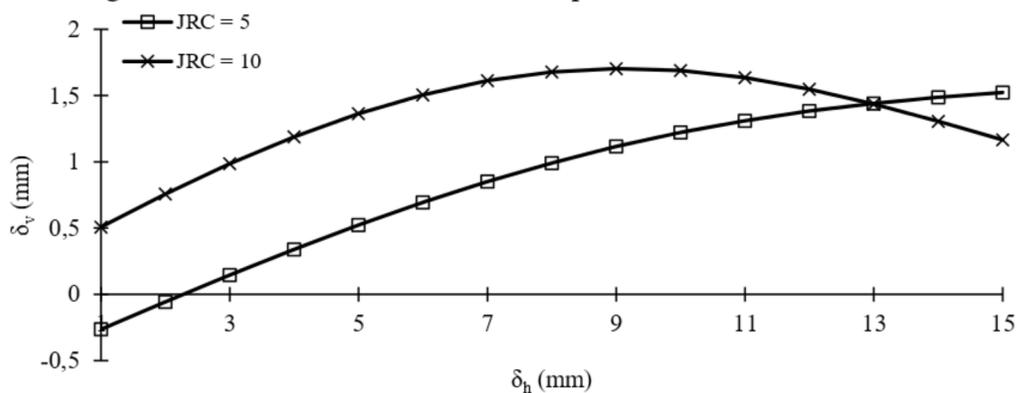
Por meio da Figura 35, nota-se que o aumento da tensão normal inicial de 0,5 MPa até 2 MPa reflete na redução dos valores de dilatação estimados pelo sistema Dilatância – A1 no processo de cisalhamento, como esperado. No caso da Figura 36, observa-se que o modelo Dilatância – A1 compreende que a redução do JRC de 10 para 5 tende a permitir com que sejam obtidos menores valores de dilatação no cisalhamento das discontinuidades.

Figura 35 – Estudo da influência de σ_{n0} pelo modelo Dilatância – A1.



Fonte: Autor.

Figura 36 – Estudo da influência de JRC pelo modelo Dilatância – A1.



Fonte: Autor.

Tendo como base os valores de R^2 calculados na fase de teste dos sistemas neuro-fuzzy escolhidos para essa etapa de avaliação, é possível verificar que o resultado do R^2 medido com o modelo Dilatância – A1 não foi o maior, mesmo que seja considerado alto (aproximadamente 0,99). A verificação da compreensão do fenômeno em estudo por parte dos sistemas neuro-fuzzy foi de fundamental importância, uma vez que, à princípio, a definição do melhor modelo poderia consistir somente no valor do R^2 obtido, o que levaria à escolha inadequada da formulação para a previsão do comportamento cisalhante das discontinuidades rochosas.

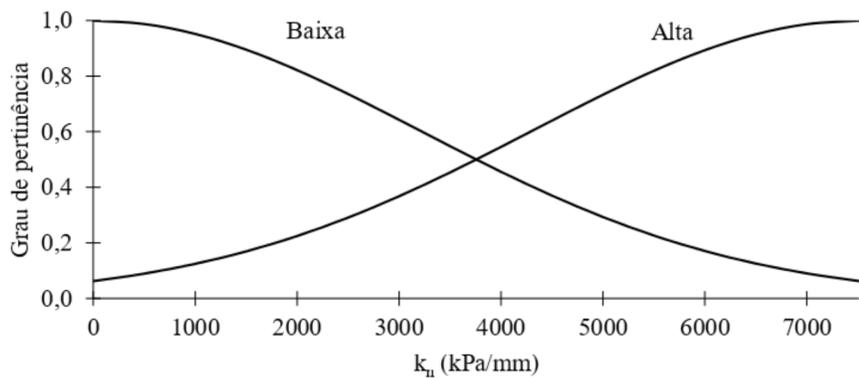
Logo, observa-se com a avaliação dos valores de dilatância previstos a partir da variação dos parâmetros governantes do comportamento cisalhante das discontinuidades rochosas, que os modelos Dilatância – A2, A3, A4, C6 e C8 não apresentaram resultados satisfatórios, o que resulta na escolha do sistema de melhor desempenho: Dilatância – A1.

5.2.3 Modelo definido para a previsão da dilatação

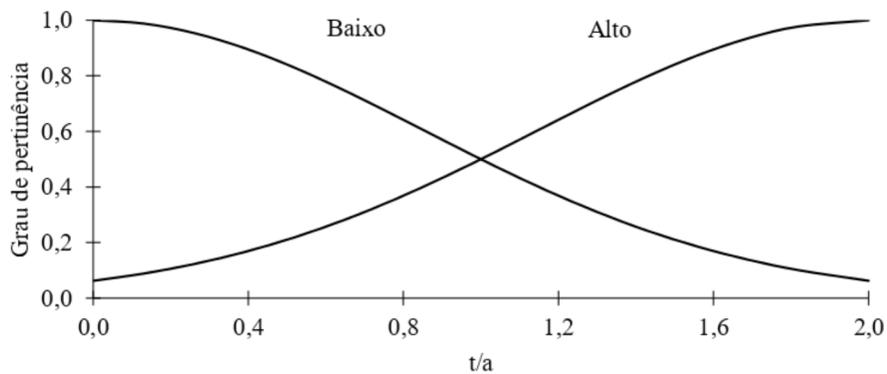
Dilatância – A1 foi o modelo definido por apresentar o melhor desempenho frente aos testes realizados em todos os sistemas neuro-fuzzy do tipo ANFIS, sendo constituído por 2 funções de pertinência do tipo gaussiana para as 8 variáveis governantes do processo de cisalhamento das descontinuidades rochosas, desenvolvido a partir de 80% dos dados experimentais para a etapa de treinamento e 20% para a etapa de teste.

A Figura 37 apresenta as funções de pertinência das variáveis de entrada pertencentes ao modelo Dilatância – A1. No Apêndice A, encontram-se todas as regras de inferência fuzzy que foram utilizadas no desenvolvimento do respectivo sistema neuro-fuzzy.

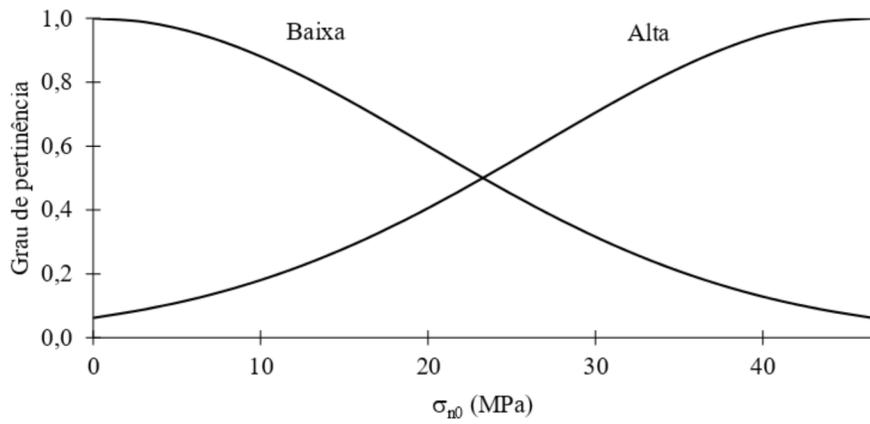
Figura 37 – Funções de pertinência das variáveis de entrada do modelo Dilatância – A1.



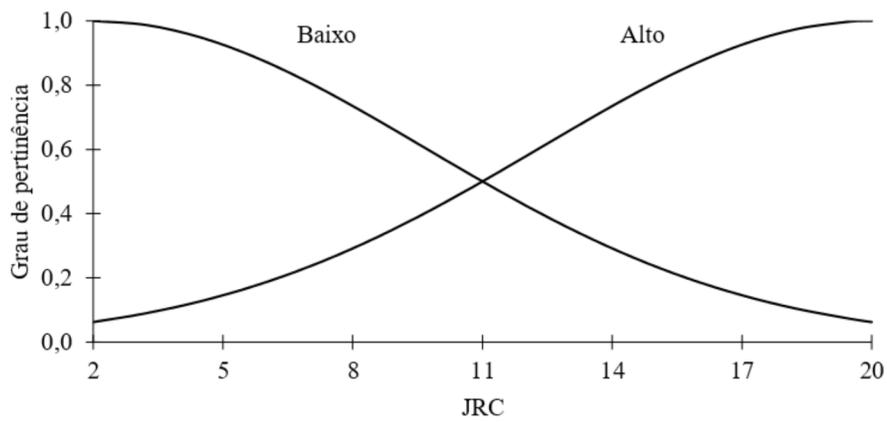
(a) Rigidez normal de contorno



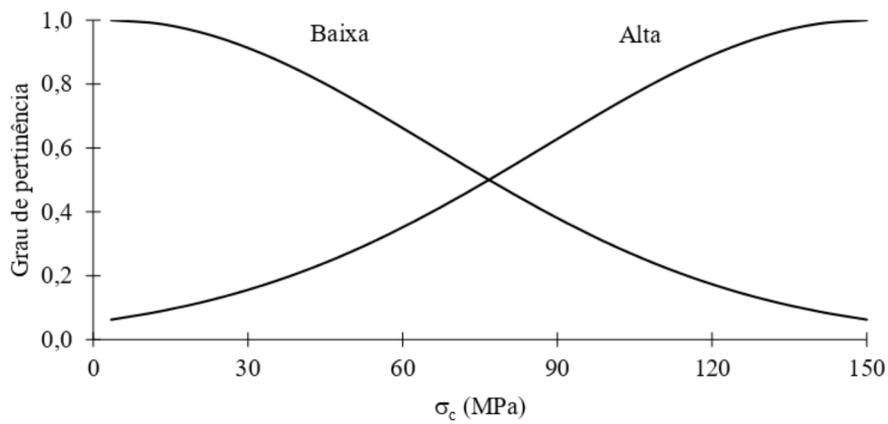
(b) Relação entre a espessura do preenchimento e a altura da aspereza



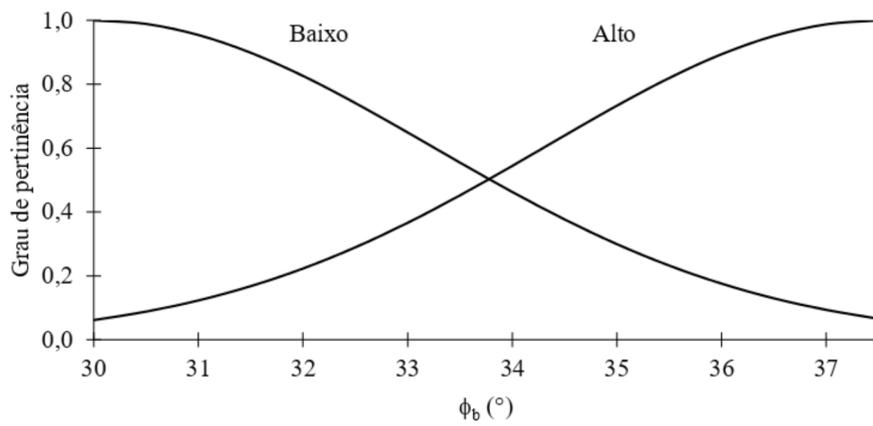
(c) Tensão normal inicial



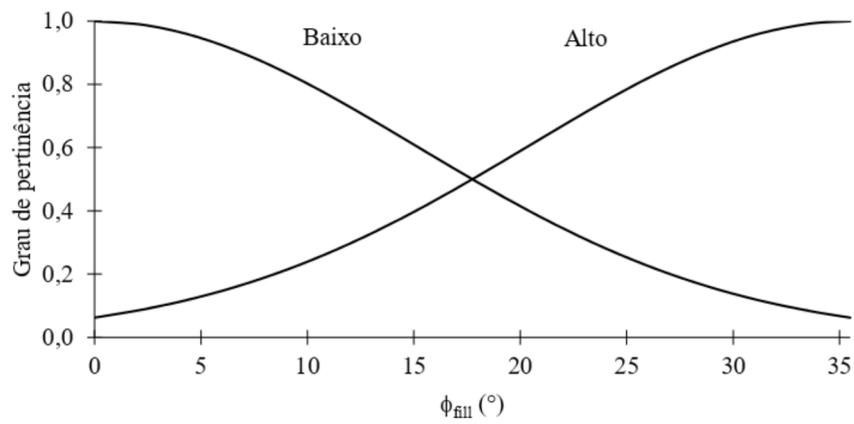
(d) Coeficiente de rugosidade da descontinuidade



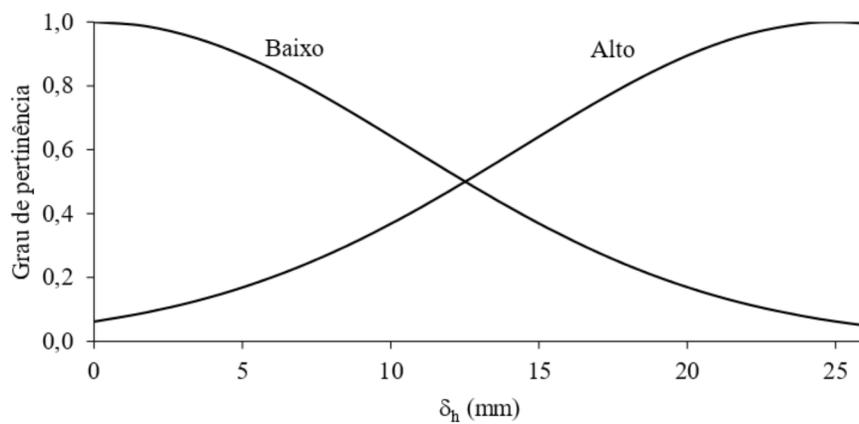
(e) Resistência à compressão uniaxial da rocha intacta



(f) Ângulo de atrito básico da rocha intacta



(g) Ângulo de atrito do material de preenchimento



(h) Deslocamento cisalhante

Fonte: Autor.

Pelas funções de pertinência apresentadas na Figura 37, observa-se que todos os domínios das variáveis utilizadas foram representados pelos respectivos conjuntos fuzzy, sendo classificados e denominados de acordo com seus valores. Respeitando os intervalos dos dados de entrada presentes no desenvolvimento do modelo, expostos no Capítulo 4, o sistema neuro-fuzzy Dilatância – A1 fornece suas estimativas por meio das regras de inferência fuzzy, apresentadas no Apêndice A. O uso de valores para as variáveis de entrada fora dos intervalos considerados no modelo ocasiona em respostas que divergem dos padrões observados e não devem ser consideradas, sendo esta uma limitação do sistema.

5.3 Sistemas neuro-fuzzy do tipo ANFIS para a previsão da tensão de cisalhamento

Os sistemas neuro-fuzzy do tipo ANFIS para a previsão da tensão de cisalhamento apresentam processos de desenvolvimento, treinamento e seleção semelhantes aos realizados para os modelos de previsão da dilatação, expostos no Item 5.2.

Logo, no Item 5.3.1, são apresentados os resultados provenientes da modelagem dos sistemas de previsão da tensão de cisalhamento, com a seleção dos melhores modelos de acordo com a correlação entre as estimativas realizadas e os dados experimentais de teste. No Item 5.3.2, são expostos os resultados da avaliação de desempenho dos sistemas neuro-fuzzy selecionados com base na influência das variáveis de entrada em suas previsões. Por fim, no Item 5.3.3, destacam-se as propriedades do modelo definido para a previsão da tensão de cisalhamento de descontinuidades rochosas.

5.3.1 Resultados da modelagem e seleção dos melhores modelos

A Tabela 7 apresenta a relação entre as propriedades dos sistemas neuro-fuzzy Classe A para a previsão da tensão de cisalhamento das descontinuidades rochosas, destacando as estruturas iniciais, as quantidades de variáveis de entrada e de funções de pertinência adotadas, e os valores dos coeficientes de determinação (R^2), obtidos da correlação entre as estimativas dos modelos e os dados experimentais utilizados nas fases de treinamento e de teste.

Por meio da Tabela 7, nota-se que a não consideração de todas as variáveis de entrada escolhidas para a previsão da tensão de cisalhamento afetou de maneira crucial o desempenho dos modelos T.Cisalhamento – A6, A7, A8 e A9, mesmo que a Classe A tenha sido desenvolvida com 80% dos dados experimentais para a fase de treinamento e 20% para a

fase de teste, sendo medidos valores de R^2 na fase de teste de 0,1, 0,37, 0 e 0,04, respectivamente.

Tendo como base somente o valor do R^2 calculado na fase de teste, é possível concluir que não necessariamente o aumento do número de funções de pertinência em um sistema neuro-fuzzy significa melhora do desempenho dos modelos, uma vez que a diferença entre os sistemas T.Cisalhamento – A3 e A4 é a consideração de 3 funções de pertinência para mais variáveis de entrada, o que não correspondeu ao aumento do valor do R^2 obtido na fase de teste, alterando de 0,97 para 0,95.

No caso da influência da estrutura inicial adotada, nota-se que o sistema que utilizou a técnica de agrupamento subtrativo (T.Cisalhamento – A5) não apresentou o melhor desempenho quando comparado com os outros modelos Classe A, mesmo que ele seja composto por 13 funções de pertinência para cada variável de entrada.

Portanto, nesta etapa de modelagem, os sistemas que permitiram a obtenção do critério adotado, ou seja, valor do R^2 na fase de teste de, no mínimo, 0,95, são T.Cisalhamento – A1, A2, A3 e A4 e, por conta disso, são utilizados na avaliação de desempenho apresentada no Item 5.3.2.

Tabela 7 – Resultados da modelagem dos sistemas Classe A de tensão de cisalhamento.

Modelo	Variáveis de entrada	Estrutura inicial	Funções de pertinência	R^2 teste	R^2 treinamento
A1	8	Repartição em grades	2	0,9630	0,9697
A2	8	Repartição em grades	2, exceto t/a (3)	0,9619	0,9696
A3	8	Repartição em grades	2, exceto t/a e δ_h (3)	0,9716	0,9788
A4	8	Repartição em grades	2, exceto t/a, δ_h , k_n e σ_c (3)	0,9549	0,9764
A5	8	Agrupamento subtrativo	13	0,9168	0,9263
A6	7	Repartição em grades	2	0,0993	0,2819
A7	7	Repartição em grades	2, exceto t/a e δ_h (3)	0,3681	0,5043
A8	6	Repartição em grades	2	0,0026	0,0009
A9	6	Repartição em grades	2, exceto t/a e δ_h (3)	0,0402	0,0560

Fonte: Autor.

A Tabela 8, por sua vez, relaciona as propriedades dos sistemas neuro-fuzzy Classe B com os respectivos valores de R^2 obtidos nas fases de treinamento e de teste. Os resultados de R^2 , presentes na tabela, mostram que a escolha de 80% dos ensaios experimentais para a fase de treinamento e 20% para a fase de teste, adotada para a Classe B, não ocasionou melhora no

desempenho dos modelos que utilizam todas as variáveis de entrada em suas previsões, quando comparados com os valores de R^2 obtidos pela aplicação dos modelos Classe A.

Ainda de acordo com a Tabela 8, observa-se o aumento nos resultados obtidos de R^2 na fase de teste com os sistemas que não consideram todas as variáveis de entrada, por exemplo, utilizando os modelos T.Cisalhamento – B6, B7, B8 e B9, foram calculados valores de R^2 na fase de teste de 0,89, 0,89, 0,89 e 0,84, respectivamente. Nota-se que, mesmo com algumas melhorias nos resultados dos coeficientes de determinação, não houve modelos, nessa classe, que permitiram a obtenção de valores de R^2 na fase de teste igual ou superior a 0,95. Logo, estes sistemas não foram utilizados em etapas posteriores de avaliação.

Tabela 8 – Resultados da modelagem dos sistemas Classe B de tensão de cisalhamento.

Modelo	Variáveis de entrada	Estrutura inicial	Funções de pertinência	R^2 teste	R^2 treinamento
B1	8	Repartição em grades	2	0,8755	0,9711
B2	8	Repartição em grades	2, exceto t/a (3)	0,9022	0,9712
B3	8	Repartição em grades	2, exceto t/a e δ_h (3)	0,9050	0,9803
B4	8	Repartição em grades	2, exceto t/a, δ_h , k_n e σ_c (3)	0,9066	0,9804
B5	8	Agrupamento subtrativo	17	0,8674	0,9260
B6	7	Repartição em grades	2	0,8853	0,9679
B7	7	Repartição em grades	2, exceto t/a e δ_h (3)	0,8905	0,9745
B8	6	Repartição em grades	2	0,8958	0,9609
B9	6	Repartição em grades	2, exceto t/a e δ_h (3)	0,8431	0,8938

Fonte: Autor.

A relação entre as propriedades dos modelos Classe C, os quais foram desenvolvidos com 50% dos dados experimentais para a fase de treinamento e 50% para a fase de teste, e os coeficientes de determinação obtidos é apresentada na Tabela 9. Pela tabela, nota-se que o maior resultado calculado de R^2 na fase de teste foi de 0,9073, com o modelo T.Cisalhamento – A5, o qual possui a estrutura inicial baseada na técnica de agrupamento subtrativo, com 12 funções de pertinência para todas as variáveis de entrada.

Pelos resultados presentes na Tabela 9, nota-se que a redução dos dados utilizados no desenvolvimento dos sistemas Classe C prejudicou a capacidade de determinados modelos, como T.Cisalhamento – C1, C2 e C3, em estimarem medidas além dos dados de treinamento, uma vez que a diferença entre os valores obtidos de R^2 nas fases de treinamento e de teste para essa classe foi maior que a observada, por exemplo, com os modelos Classes A e B. Além disso,

com os modelos Classe C, todos os valores calculados de R^2 na fase de teste foram inferiores a 0,95 e, dessa forma, estes sistemas não foram utilizados posteriormente.

Tabela 9 – Resultados da modelagem dos sistemas Classe C de tensão de cisalhamento.

Modelo	Variáveis de entrada	Estrutura inicial	Funções de pertinência	R^2 teste	R^2 treinamento
C1	8	Repartição em grades	2	0,4419	0,9709
C2	8	Repartição em grades	2, exceto t/a (3)	0,4433	0,9711
C3	8	Repartição em grades	2, exceto t/a e δ_h (3)	0,8611	0,9793
C4	8	Repartição em grades	2, exceto t/a, δ_h , k_n e σ_c (3)	0,6034	0,9796
C5	8	Agrupamento subtrativo	12	0,9073	0,9324
C6	7	Repartição em grades	2	0,8600	0,9681
C7	7	Repartição em grades	2, exceto t/a e δ_h (3)	0,6556	0,9769
C8	6	Repartição em grades	2	0,9070	0,9643
C9	6	Repartição em grades	2, exceto t/a e δ_h (3)	0,5627	0,9764

Fonte: Autor.

A Tabela 10 apresenta os coeficientes de determinação obtidos nas fases de treinamento e de teste com os modelos Classe D, os quais foram desenvolvidos com a utilização de 50% dos ensaios para a fase de treinamento e 50% para a fase de teste. Pela tabela, observa-se que foram medidos baixos valores de R^2 na fase de teste com os modelos Classe D. Em virtude disso, eles não foram utilizados em análises posteriores.

Tabela 10 – Resultados da modelagem dos sistemas Classe D de tensão de cisalhamento.

Modelo	Variáveis de entrada	Estrutura inicial	Funções de pertinência	R^2 teste	R^2 treinamento
D1	8	Repartição em grades	2	0,0453	0,9705
D2	8	Repartição em grades	2, exceto t/a (3)	0,0555	0,9715
D3	8	Repartição em grades	2, exceto t/a e δ_h (3)	0,0339	0,9790
D4	8	Repartição em grades	2, exceto t/a, δ_h , k_n e σ_c (3)	0,0993	0,9795
D5	8	Agrupamento subtrativo	16	0,0064	0,9452
D6	7	Repartição em grades	2	0,1364	0,9510
D7	7	Repartição em grades	2, exceto t/a e δ_h (3)	0,1754	0,8823
D8	6	Repartição em grades	2	0,1715	0,8212
D9	6	Repartição em grades	2, exceto t/a e δ_h (3)	0,2190	0,2199

Fonte: Autor.

5.3.2 Avaliação de desempenho dos modelos para previsão da tensão de cisalhamento

Os sistemas que obtiveram os melhores resultados na modelagem e foram utilizados na avaliação de desempenho com a influência das variáveis de entrada em suas previsões são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 – Modelos escolhidos de previsão da tensão de cisalhamento para avaliação de desempenho.

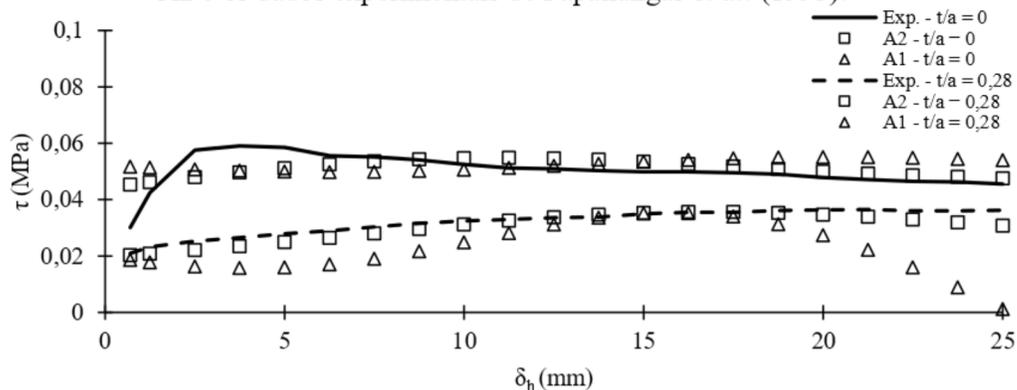
Classe de modelos	Estrutura	R ² teste
A	1	0,96
	2	0,96
	3	0,97
	4	0,95

Fonte: Autor.

De acordo com os dados fornecidos pela Tabela 11, nota-se que foram calculados os mesmos valores de coeficiente de determinação na fase de teste com os modelos T.Cisalhamento – A1 e A2, o que mostra a proximidade entre suas previsões. No entanto, quando suas estimativas foram comparadas com os resultados experimentais de descontinuidades com preenchimento, foram obtidas maiores correlações entre os dados esperados e as previsões fornecidas pelo modelo T.Cisalhamento – A2, conforme pode ser observado na Figura 38.

A Figura 38 ilustra a influência do parâmetro t/a no desenvolvimento das tensões de cisalhamento observadas em descontinuidades rochosas apresentadas por Papaliangas *et al.* (1993). Além disso, a figura retrata a comparação entre os dados experimentais e os valores previstos pelos modelos T.Cisalhamento – A1 e A2. Observa-se que as estimativas realizadas pelo sistema T.Cisalhamento – A2 foram mais próximas dos dados experimentais, o que ocorreu com certa frequência em demais ensaios.

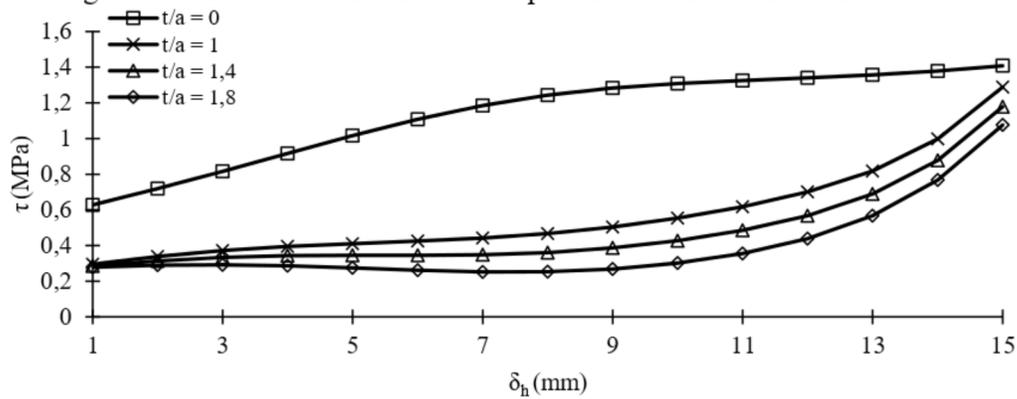
Figura 38 – Comparação entre os resultados fornecidos pelos modelos T.Cisalhamento – A1 e A2 e os dados experimentais de Papaliangas *et al.* (1993).



No caso dos modelos T.Cisalhamento – A3 e A4, as Figuras 39 e 40 apresentam suas previsões para a descontinuidade hipotética com preenchimento, a qual caracteriza-se pelas seguintes propriedades: $JRC = 5$; $\sigma_c = 12$ MPa, $\phi_b = 37,5^\circ$ e $\phi_{fill} = 35,5^\circ$, tendo como referência as descontinuidades hipotéticas apresentadas por Dantas Neto *et al.* (2017) e Leite (2019). Pelas figuras, nota-se que as previsões não representam de maneira satisfatória o comportamento esperado da variação da tensão de cisalhamento em função do deslocamento cisalhante, uma vez que não há uma tendência de pico, estabilidade, ou redução da tensão de cisalhamento, o que difere de diversos resultados experimentais, como os apresentados por Haque (1999) e Shrivastava e Rao (2018).

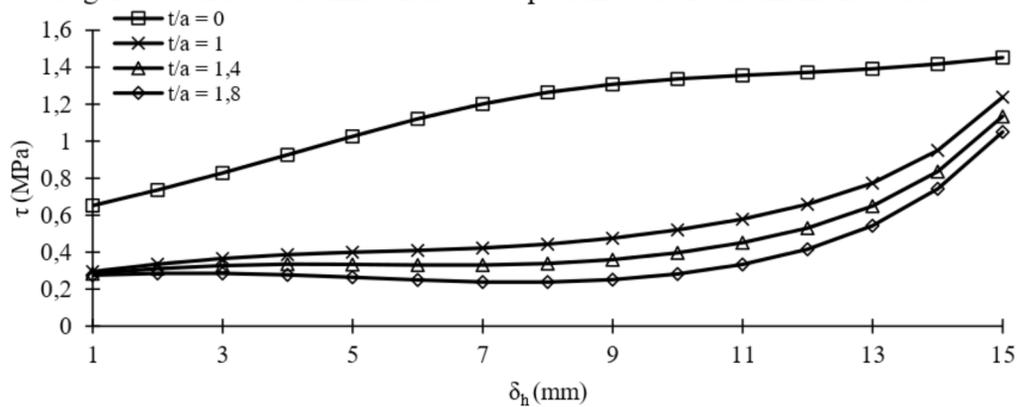
Ao contrário dos modelos T.Cisalhamento – A3 e A4, o sistema T.Cisalhamento – A2 estimou de maneira satisfatória a influência de t/a no desenvolvimento das tensões de cisalhamento, conforme exposto na Figura 41. Observa-se, pela figura, que as previsões fornecidas pelo modelo T.Cisalhamento – A2 exibem uma tendência de pico, de estabilidade e de redução em seus valores, o que corresponde aos dados experimentais apresentados por Oliveira (2009).

Figura 39 – Estudo da influência de t/a pelo modelo T.Cisalhamento – A3.



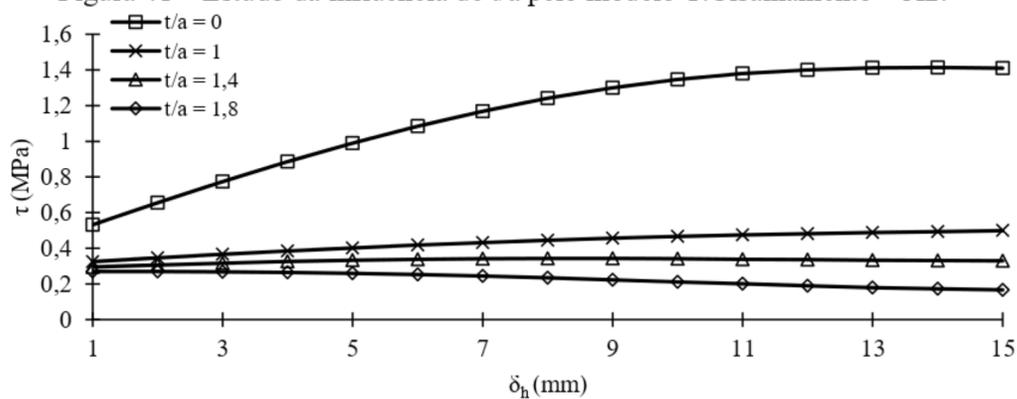
Fonte: Autor.

Figura 40 – Estudo da influência de t/a pelo modelo T.Cisalhamento – A4.



Fonte: Autor.

Figura 41 – Estudo da influência de t/a pelo modelo T.Cisalhamento – A2.



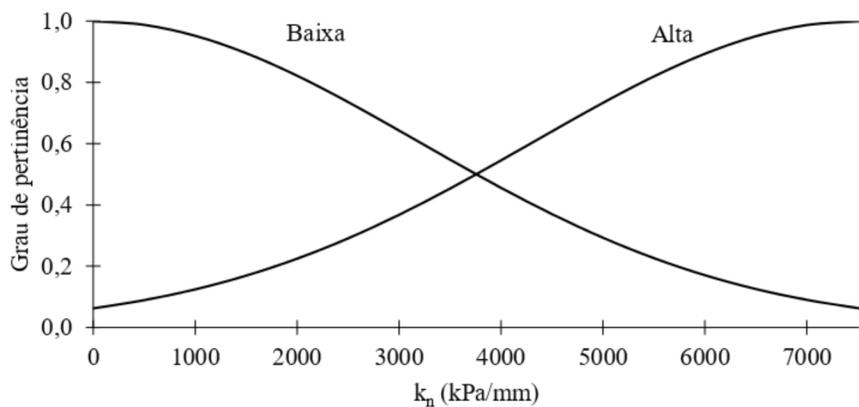
Fonte: Autor.

Logo, é possível concluir que os sistemas neuro-fuzzy T.Cisalhamento – A1, A3 e A4 apresentaram problemas em suas previsões, o que resultou na escolha de T.Cisalhamento – A2 como o melhor modelo, neste trabalho, para a previsão da tensão de cisalhamento das descontinuidades rochosas, o qual será detalhado a seguir.

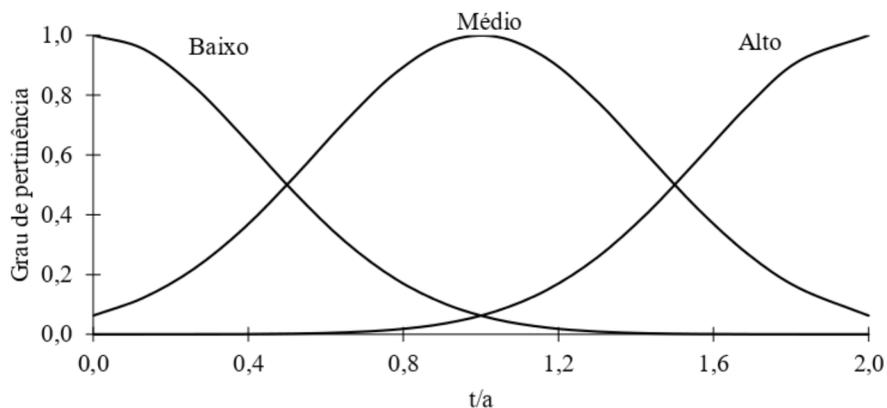
5.3.3 Modelo definido para a previsão da tensão de cisalhamento

O modelo T.Cisalhamento – A2, com 3 funções de pertinência do tipo gaussiana para a variável t/a e 2 funções de pertinência do mesmo tipo para as demais variáveis, foi desenvolvido a partir do uso de 80% dos dados experimentais para a fase de treinamento e 20% para a fase de teste. As funções de pertinência utilizadas nas variáveis de entrada do modelo são apresentadas na Figura 42. Além disso, suas regras de inferência fuzzy se encontram no Apêndice B.

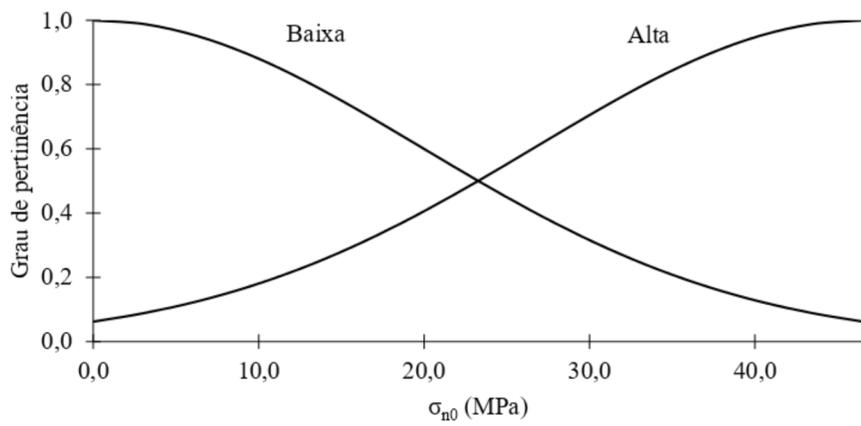
Figura 42 – Funções de pertinência das variáveis de entrada do modelo ANFIS T.Cisalhamento – A2



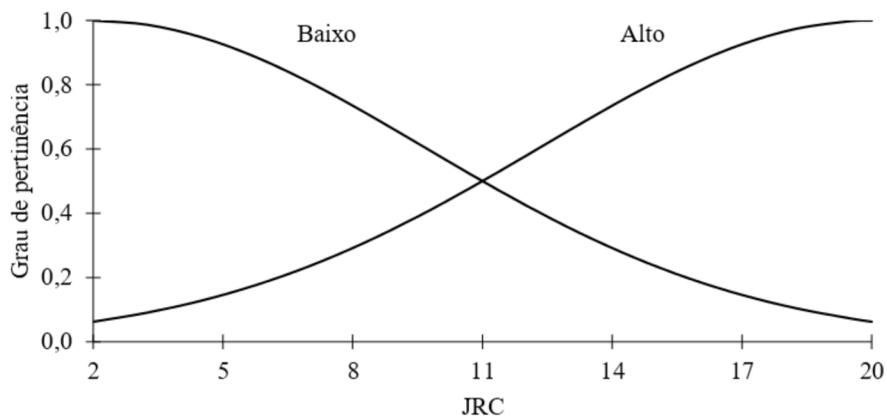
(a) Rigidez normal de contorno



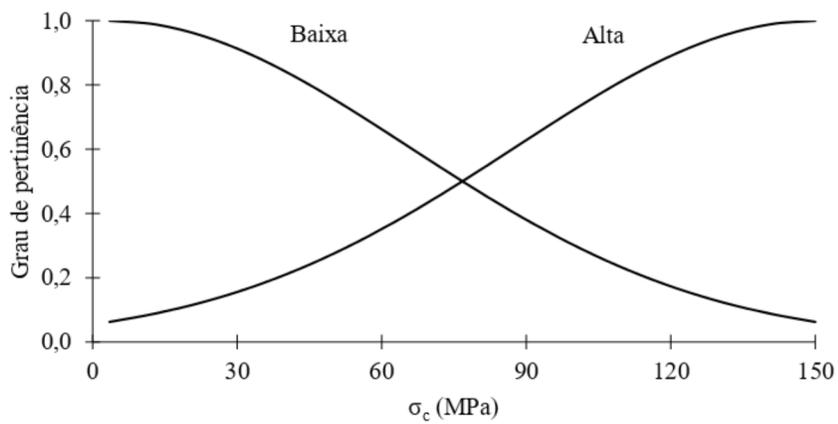
(b) Relação entre a espessura do preenchimento e a altura da aspereza



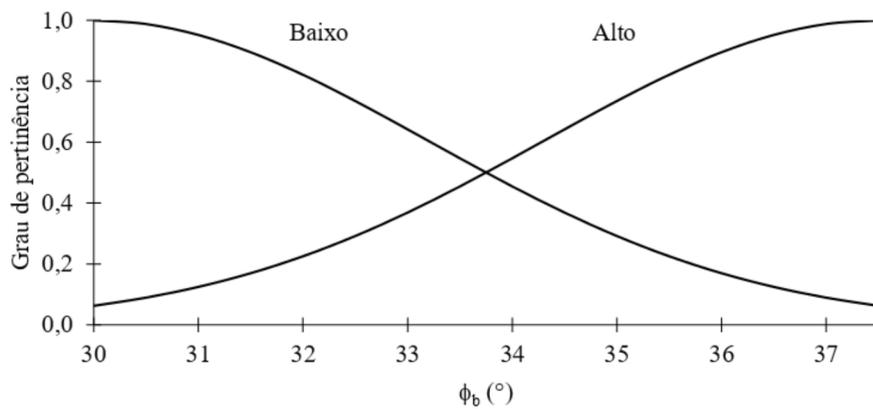
(c) Tensão normal inicial



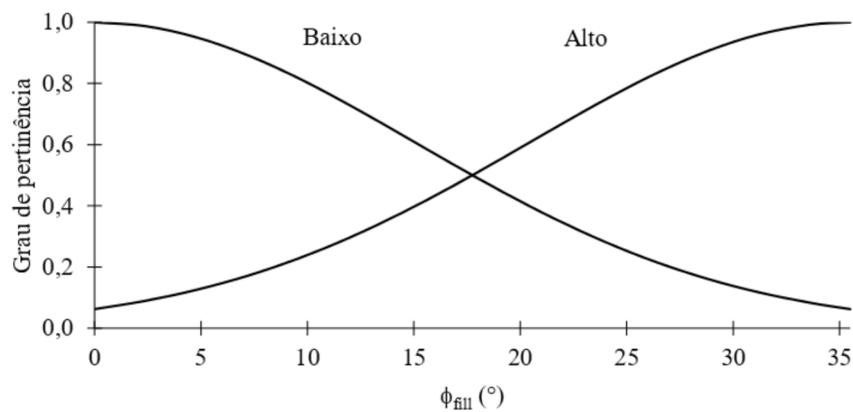
(d) Coeficiente de rugosidade da descontinuidade



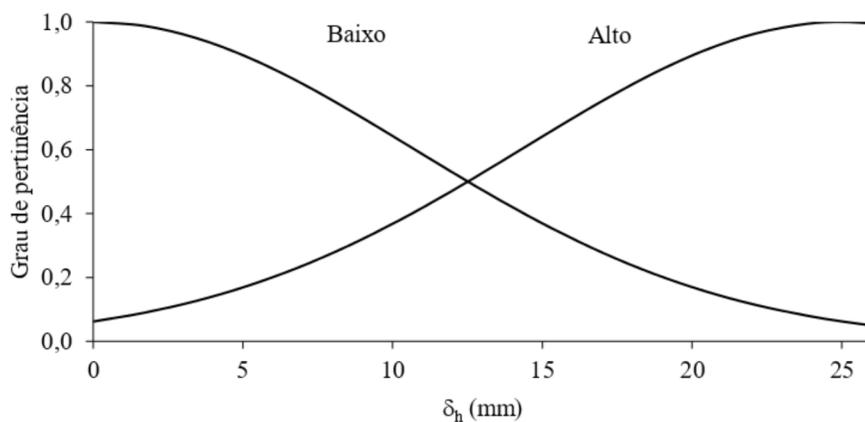
(e) Resistência à compressão uniaxial da rocha intacta



(f) Ângulo de atrito básico da rocha intacta



(g) Ângulo de atrito do material de preenchimento



(h) Deslocamento cisalhante

Fonte: Autor.

Para o funcionamento do sistema neuro-fuzzy T.Cisalhamento – A2, é necessário que os valores dos dados de entrada se encontrem dentro dos intervalos considerados no desenvolvimento do modelo, expostos no Capítulo 4, sendo compreendidos pelas respectivas funções de pertinência apresentadas na Figura 42.

5.4 Validação dos sistemas ANFIS definidos

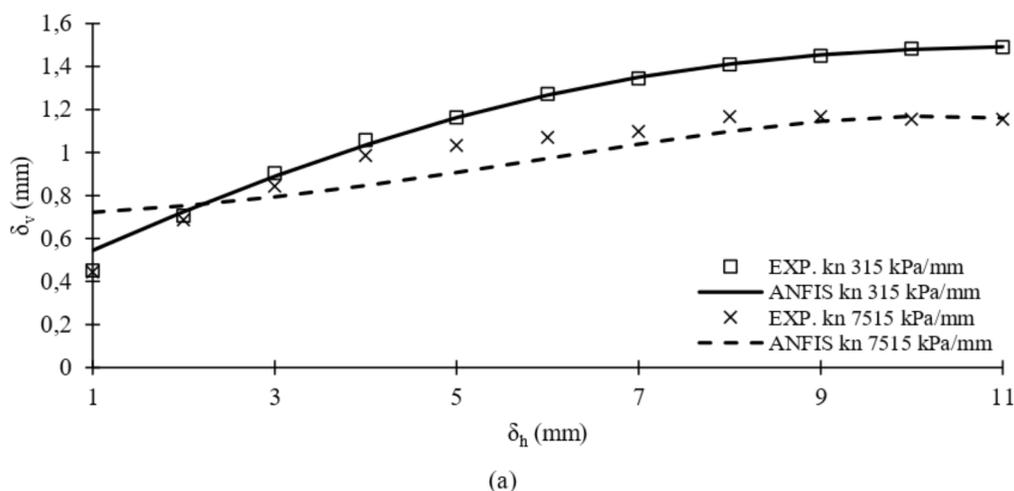
Inicialmente, no Item 5.4.1, as previsões dos modelos Dilatância – A1 e T.Cisalhamento – A2 são comparadas com os dados obtidos experimentalmente e apresentados por Benmokrane e Ballivy (1989), Papaliangas *et al.* (1993), Haque (1999), Indraratna e Haque (2000), e Oliveira, Indraratna e Nencik (2009). Em seguida, no Item 5.4.2, avaliam-se as respostas fornecidas pelos sistemas ANFIS e por outros modelos existentes, relacionando-as com os dados experimentais expostos por Skinas, Bandis e Demiris (1990), Indraratna e Haque (2000) e Shrivastava e Rao (2018).

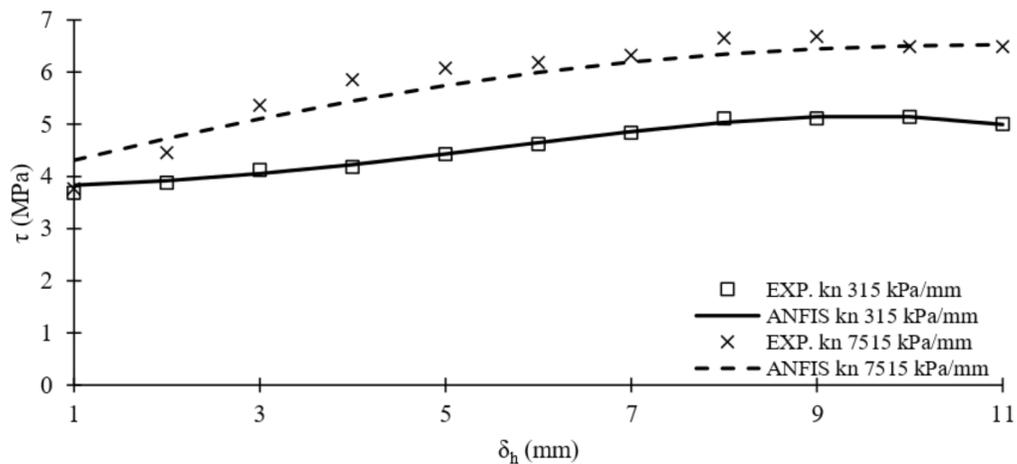
Por fim, no Item 5.4.3, são comparadas as estimativas fornecidas pelos sistemas neuro-fuzzy do tipo ANFIS desenvolvidos com as realizadas por outros modelos existentes, utilizando descontinuidades hipotéticas com e sem preenchimento.

5.4.1 Comparação entre os resultados fornecidos pelos modelos ANFIS desenvolvidos e os dados experimentais

A Figura 43 apresenta a comparação entre as estimativas fornecidas pelos modelos Dilatância – A1 e T.Cisalhamento – A2, e os dados experimentais expostos por Benmokrane e Ballivy (1989). Os ensaios foram realizados em descontinuidades sem preenchimento sob condição CNS, sendo submetidas a diferentes valores de rigidez normal de contorno. Pelas Figuras 43-a e 43-b, observa-se que as previsões fornecidas pelos modelos ANFIS apresentaram uma expressiva correlação com os dados experimentais.

Figura 43 – Comportamento cisalhante de descontinuidades provenientes dos ensaios apresentados por Benmokrane e Ballivy (1989), em (a) Dilatância e (b) Tensão de cisalhamento.



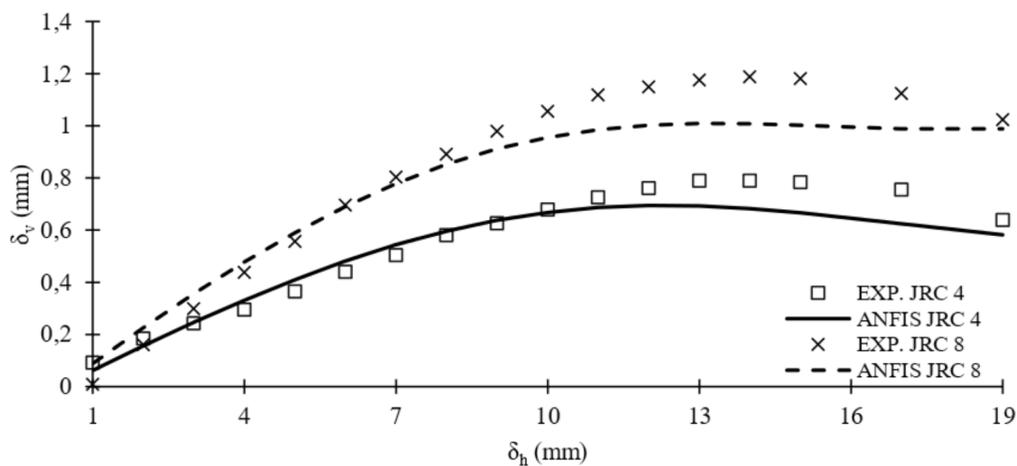


(b)

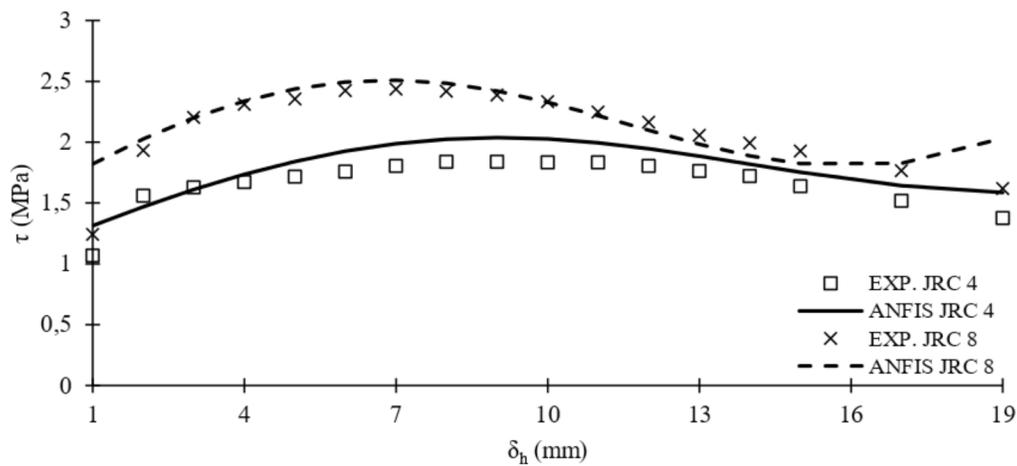
Fonte: Autor.

A Figura 44 apresenta os resultados experimentais obtidos por Haque (1999), em que é possível observar a influência da rugosidade nos valores medidos de dilatação e de tensão de cisalhamento em descontinuidades sem preenchimento sob condição CNS. Pelas Figuras 44-a a 44-b, nota-se que os modelos Dilatância – A1 e T.Cisalhamento – A2 apresentaram satisfatórias previsões, tendo em vista a proximidade de seus valores com os dados fornecidos experimentalmente.

Figura 44 – Comportamento cisalhante de descontinuidades provenientes dos ensaios apresentados por Haque (1999), em (a) Dilatância e (b) Tensão de cisalhamento.



(a)

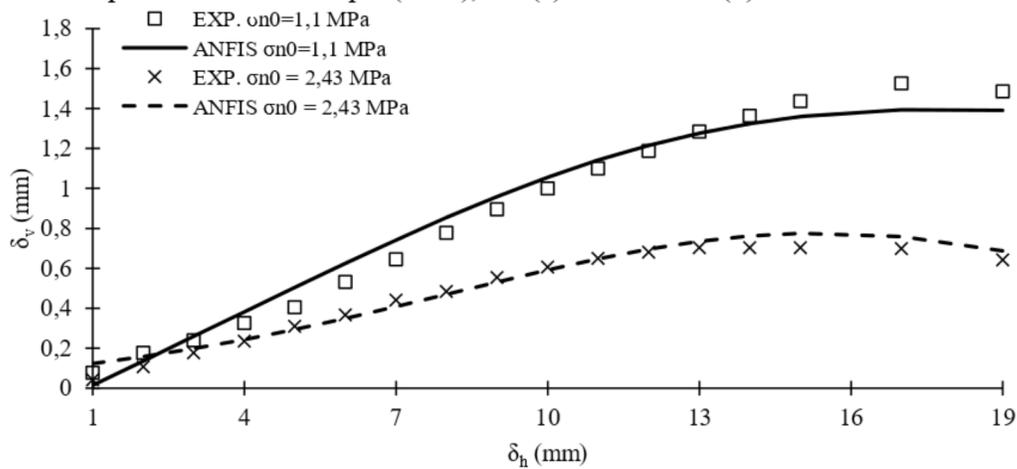


(b)

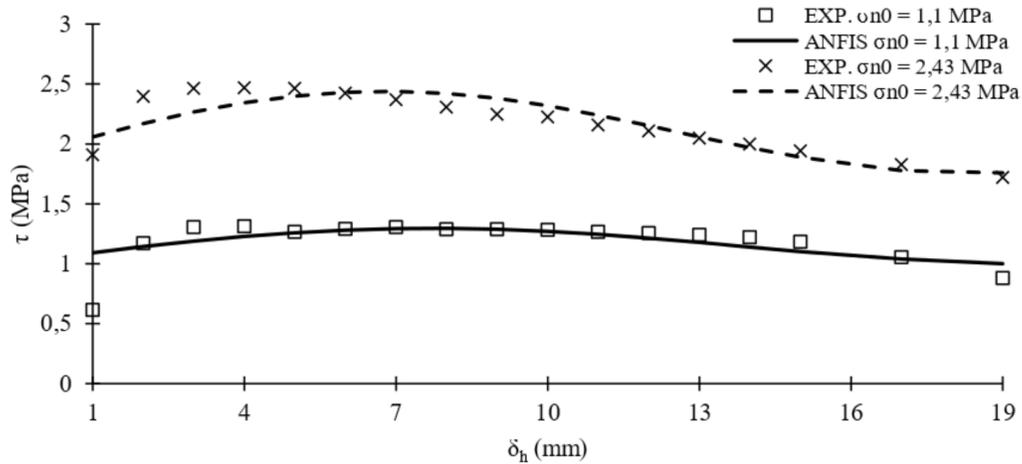
Fonte: Autor.

A Figura 45 apresenta a comparação entre os resultados fornecidos pelos sistemas ANFIS e os dados experimentais expostos por Indraratna e Haque (2000), em descontinuidades sem preenchimento sob condição CNL, quando submetidas à variação de tensão normal inicial. Observando as Figuras 45-a e 45-b, nota-se que os valores previstos de dilatação e de tensão de cisalhamento fornecidos pelos modelos ANFIS apresentaram uma expressiva correlação com os dados experimentais.

Figura 45 – Comportamento cisalhante de descontinuidades provenientes dos ensaios apresentados por Indraratna e Haque (2000), em (a) Dilatância e (b) Tensão de cisalhamento.



(a)

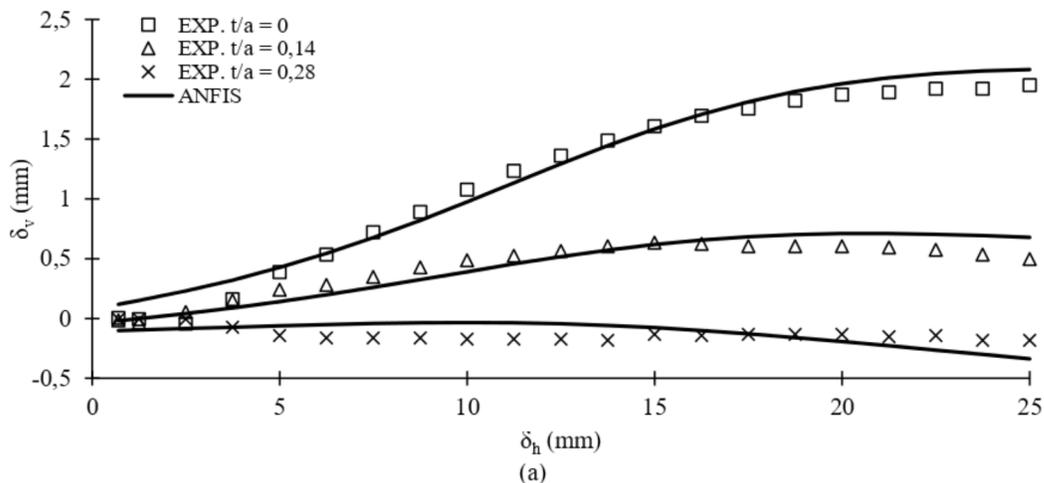


(b)

Fonte: Autor.

As Figuras 46 e 47 ilustram a capacidade dos modelos neuro-fuzzy desenvolvidos em estimarem o efeito do preenchimento no comportamento cisalhante das discontinuidades rochosas, sob condições CNL e CNS, por meio da comparação entre as previsões realizadas e os resultados experimentais expostos por Papaliangas *et al.* (1993) e Oliveira, Indraratna e Nemcik (2009), respectivamente. De acordo com as figuras, observa-se que os resultados obtidos pelos sistemas ANFIS apresentam uma correlação satisfatória com os dados experimentais.

Figura 46 – Comportamento cisalhante de discontinuidades sob condição CNL provenientes dos ensaios apresentados por Papaliangas *et al.* (1993), em (a) Dilatância e (b) Tensão de cisalhamento.



(a)

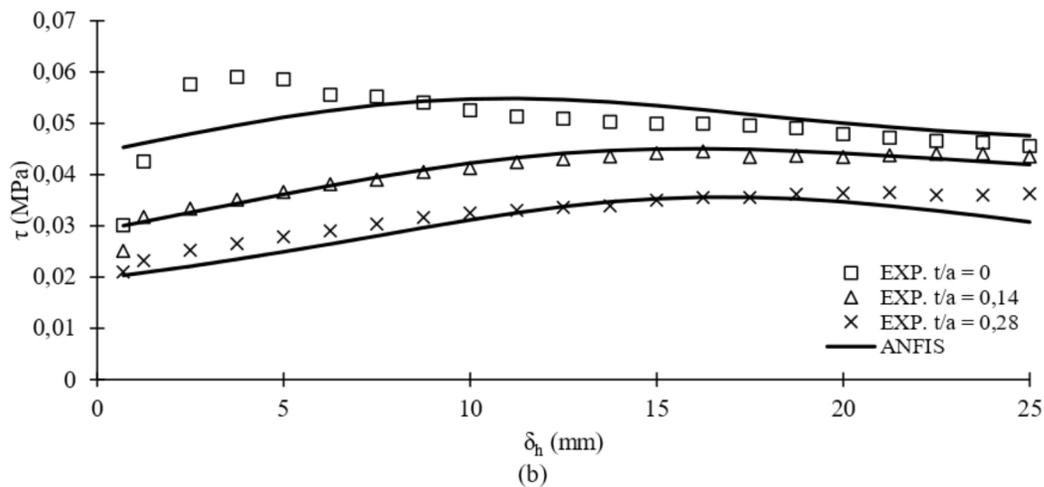
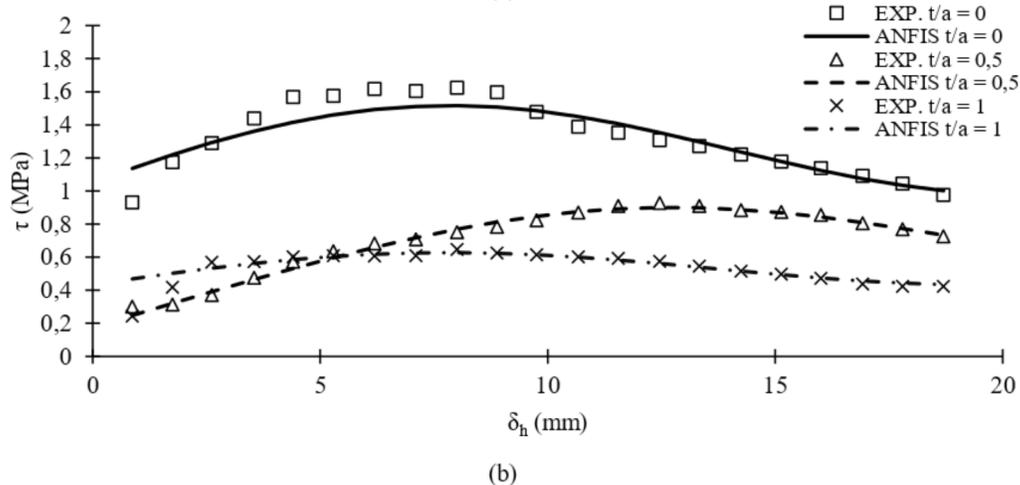
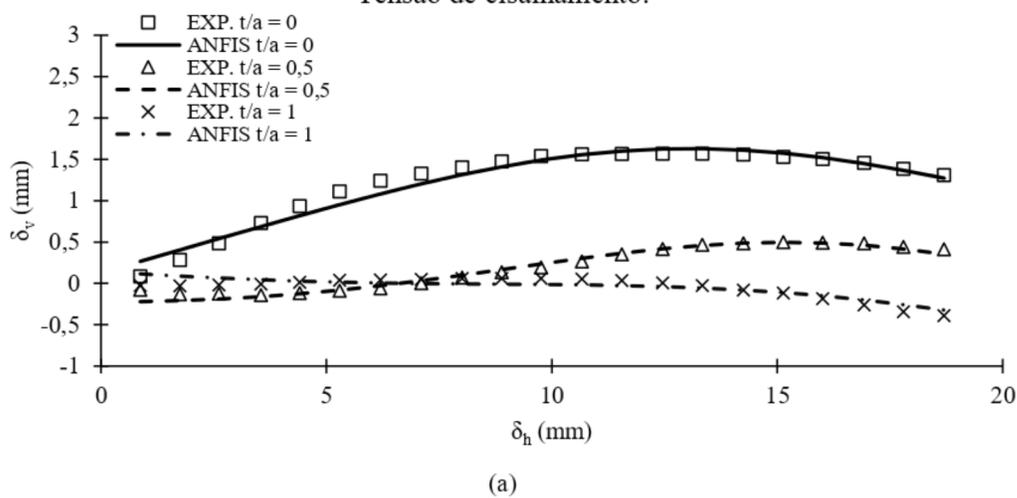


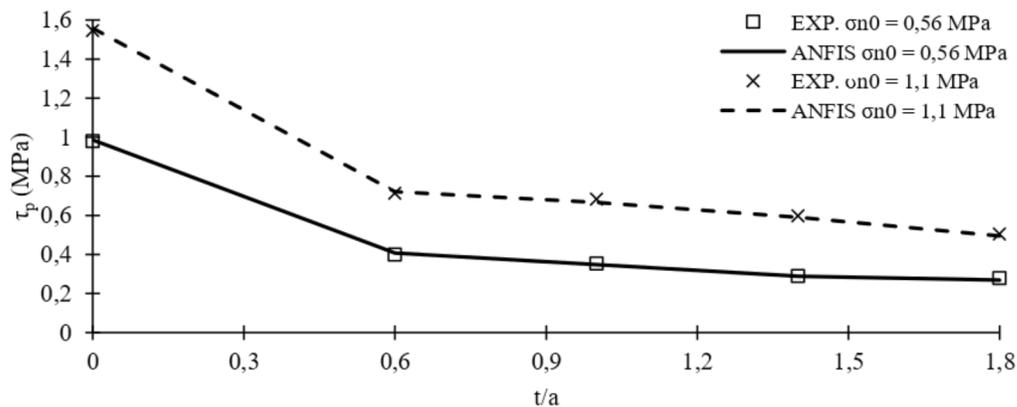
Figura 47 – Comportamento cisalhante de discontinuidades sob condição CNS provenientes dos ensaios apresentados por Oliveira, Indraratna e Nemcik (2009), em (a) Dilatância e (b) Tensão de cisalhamento.



As Figuras 48 e 49 ilustram a aplicação dos sistemas ANFIS no estudo da variação da tensão de cisalhamento de pico com o aumento do valor do parâmetro t/a , comparando as estimativas realizadas com os dados experimentais de descontinuidades sob condição CNS expostos por Haque (1999). Nota-se, pela Figura 48, a redução da tensão de cisalhamento de pico (τ_p) com o aumento de t/a , apresentando ao longo desse comportamento uma tendência assintótica, quando a variação de t/a já não promove uma expressiva redução da tensão de cisalhamento de pico, sendo que os resultados obtidos pelos sistemas ANFIS foram próximos dos dados experimentais.

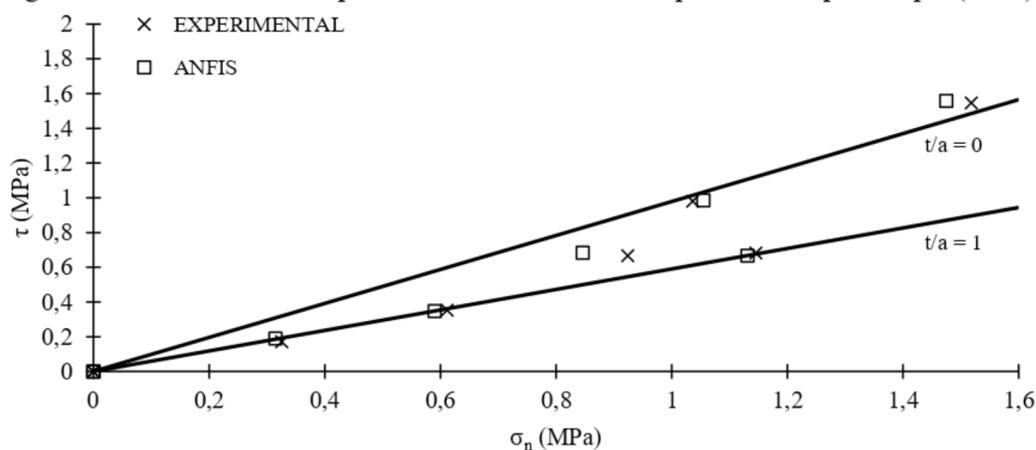
Menores tensões de cisalhamento de pico ocasionadas pela presença do material de preenchimento faz com que ocorra a redução na inclinação das envoltórias de ruptura das descontinuidades, o que é apresentado na Figura 49, em que se observa que os resultados obtidos pelos sistemas ANFIS foram satisfatórios, tendo em vista a proximidade com os dados experimentais.

Figura 48 – Influência de t/a nos valores de tensão de cisalhamento de pico referente aos ensaios apresentados por Haque (1999).



Fonte: Autor.

Figura 49 – Envoltória de ruptura referente aos ensaios apresentados por Haque (1999).



Fonte: Autor.

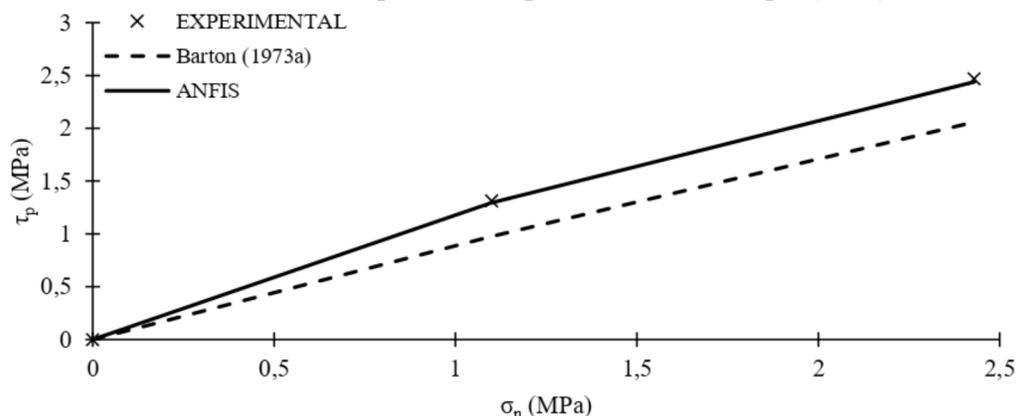
Observa-se que os resultados fornecidos pelos sistemas ANFIS Dilatância – A1 e T.Cisalhamento – A2, no geral, apresentaram satisfatória correlação com os dados experimentais, mostrando a potencialidade da técnica neuro-fuzzy na previsão do comportamento cisalhante das descontinuidades rochosas com e sem preenchimento.

5.4.2 Comparação entre os resultados fornecidos pelos sistemas ANFIS propostos e por outros modelos existentes utilizando descontinuidades experimentais

A avaliação tem como objetivo comparar as previsões dos sistemas neuro-fuzzy, Dilatância – A1 e T.Cisalhamento – A2, com as obtidas por outros modelos que utilizam lógicas, formulações, ou metodologias diferentes de estimativa do comportamento cisalhante das descontinuidades rochosas. Nesse contexto, os dados de saída dos sistemas ANFIS desenvolvidos são comparados com os fornecidos pelos modelos de Barton (1973a), Indraratna e Haque (2000), Dantas Neto *et al.* (2017), Matos (2018) e Leite (2019), relacionando os resultados estimados com os dados experimentais apresentados por Indraratna e Haque (2000), Skinas, Bandis e Demiris (1990) e Shrivastava e Rao (2018).

A Figura 50 apresenta a envoltória de ruptura para uma descontinuidade sem preenchimento sob condição CNL proveniente dos ensaios expostos por Indraratna e Haque (2000), comparando os dados experimentais com as previsões realizadas pelos sistemas ANFIS e pelo modelo de Barton (1973a). Observando a figura, nota-se que os modelos ANFIS representaram de maneira satisfatória a envoltória de ruptura da descontinuidade, sendo que seus dados de saída apresentaram melhor correlação com os dados experimentais do que os resultados obtidos pelo modelo de Barton (1973a).

Figura 50 – Envoltória de ruptura de descontinuidade sem preenchimento sob condição CNL referente aos ensaios apresentados por Indraratna e Haque (2000).

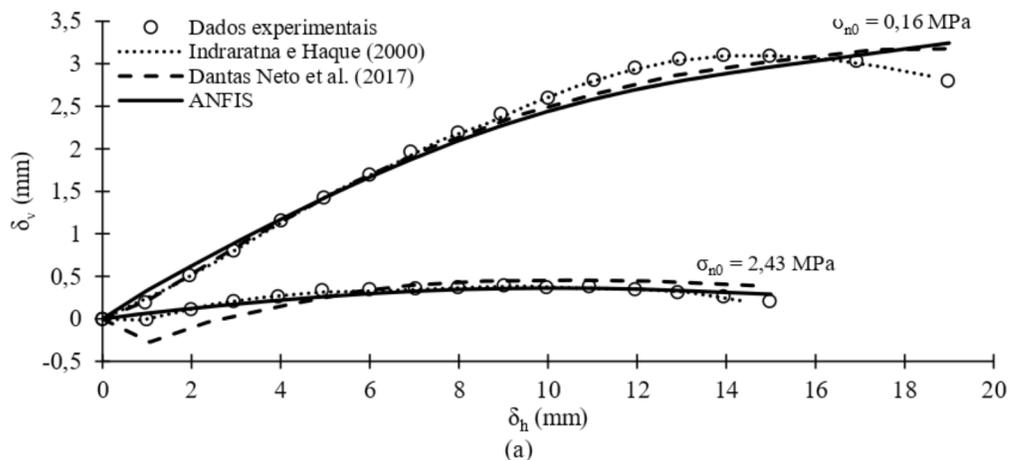


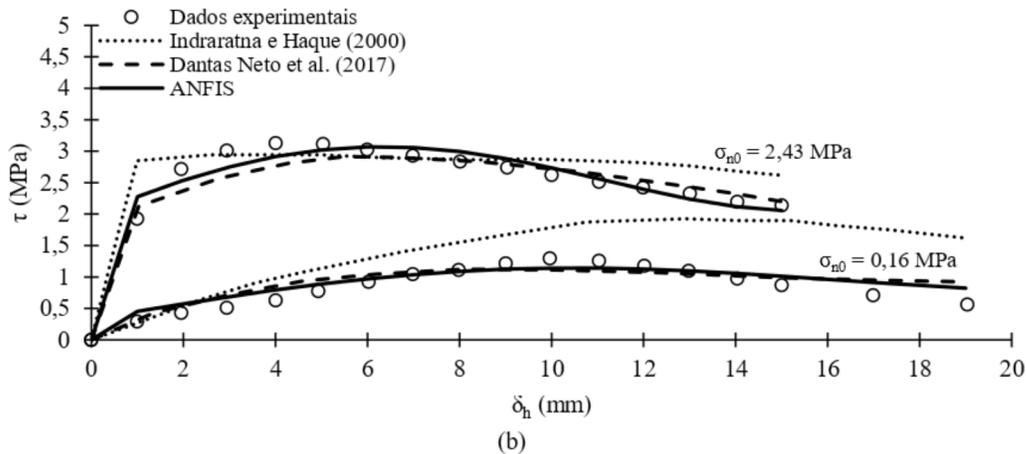
Fonte: Autor.

Ainda em relação às descontinuidades sem preenchimento, a Figura 51 apresenta a comparação entre os resultados fornecidos pelos modelos ANFIS, Dantas Neto *et al.* (2017) e Indraratna e Haque (2000), na previsão do comportamento cisalhante de descontinuidades sob rigidez normal de contorno de 453 kPa/mm, expostas por Indraratna e Haque (2000). Pela Figura 51-a, nota-se que os modelos representaram de maneira satisfatória a variação da dilatação em função do deslocamento cisalhante nas duas condições de tensão normal inicial, 0,16 MPa e 2,43 MPa, apresentando uma expressiva correlação entre seus resultados.

No caso da Figura 51-b, que ilustra a tensão cisalhante presente na descontinuidade em função do deslocamento cisalhante, é possível observar que, quando a descontinuidade foi submetida à tensão normal inicial de 2,43 MPa, houve uma correlação considerável entre os resultados obtidos pelos modelos ANFIS, Dantas Neto *et al.* (2017) e Indraratna e Haque (2000), sendo os valores previstos próximos dos dados experimentais. No entanto, quando a tensão normal inicial apresenta menor valor, como 0,16 MPa, os modelos ANFIS e Dantas Neto *et al.* (2017) forneceram resultados mais próximos dos obtidos experimentalmente, quando comparados com os dados de saída calculados pelo modelo de Indraratna e Haque (2000).

Figura 51 – Comportamento cisalhante de descontinuidades sem preenchimento sob condição CNS provenientes dos ensaios apresentados por Indraratna e Haque (2000) em (a) Dilatância e (b) Tensão de cisalhamento.



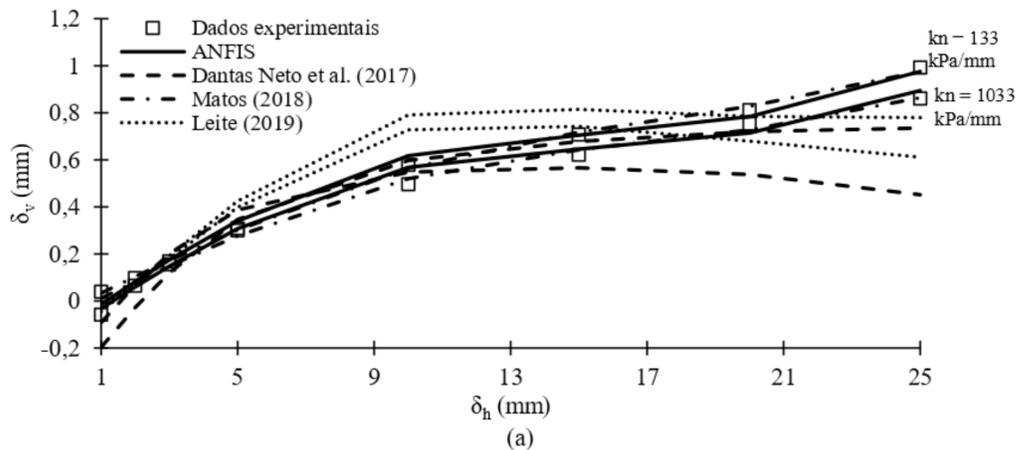


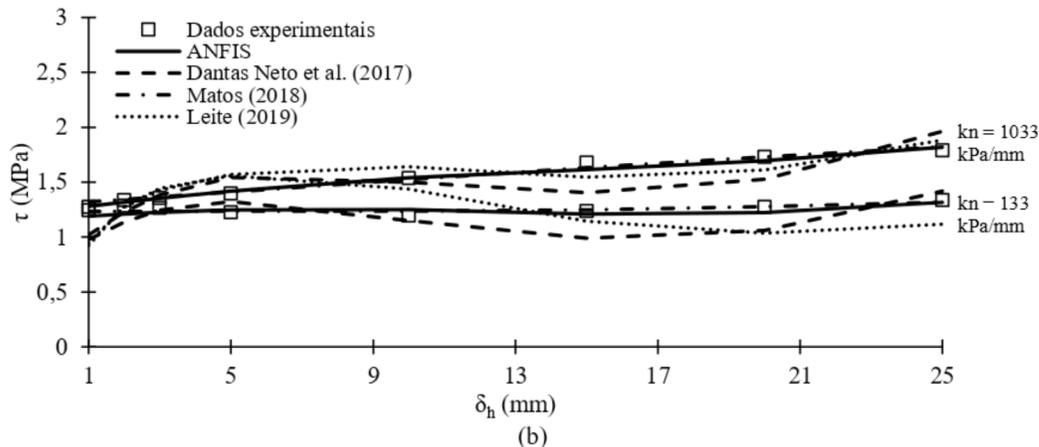
Fonte: Autor.

As Figuras 52-a e 52-b apresentam a comparação entre os resultados fornecidos pelos modelos ANFIS, Dantas Neto *et al.* (2017), Matos (2018) e Leite (2019), e os dados experimentais de descontinuidades sem preenchimento obtidas dos ensaios expostos por Skinas, Bandis e Demiris (1990). Observa-se, pelas figuras, que as previsões realizadas pelos modelos ANFIS e pelos sistemas neuro-fuzzy de Matos (2018) apresentam expressiva correlação entre si, além de serem próximas dos dados obtidos experimentalmente.

Ainda de acordo com as Figuras 52-a e 52-b, nota-se que os resultados fornecidos pelos sistemas neuro-fuzzy do tipo ANFIS foram compatíveis com os dados de saída obtidos dos modelos baseados em redes neurais artificiais, ou seja, Dantas Neto *et al.* (2017) e Leite (2019). No entanto, os modelos em redes neurais artificiais, principalmente o de Leite (2019), tenderam a apresentar superiores tensões de cisalhamento em menores deslocamentos cisalhantes, se aproximando das previsões dos modelos ANFIS em maiores deslocamentos.

Figura 52 – Comportamento cisalhante de descontinuidades provenientes dos ensaios expostos por Skinas, Bandis e Demiris (1990), em (a) Dilatância e (b) Tensão de cisalhamento.



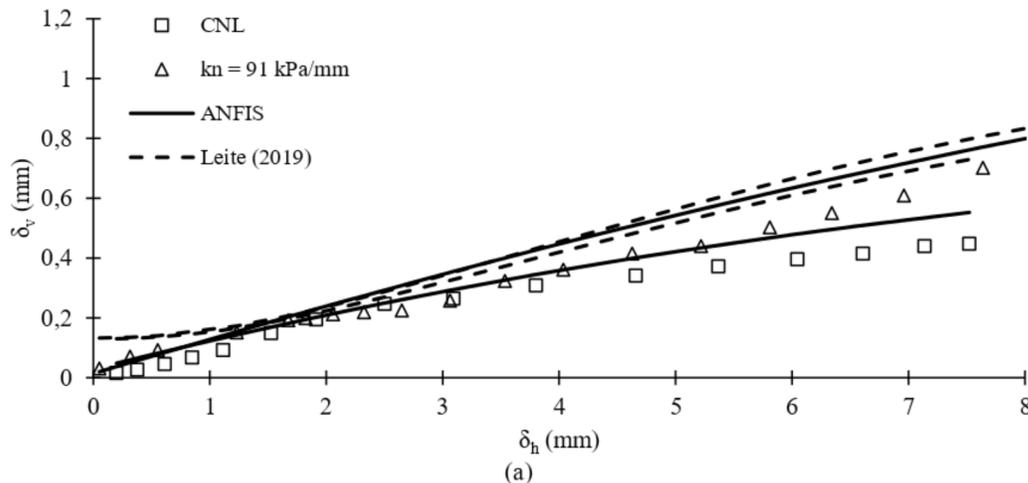


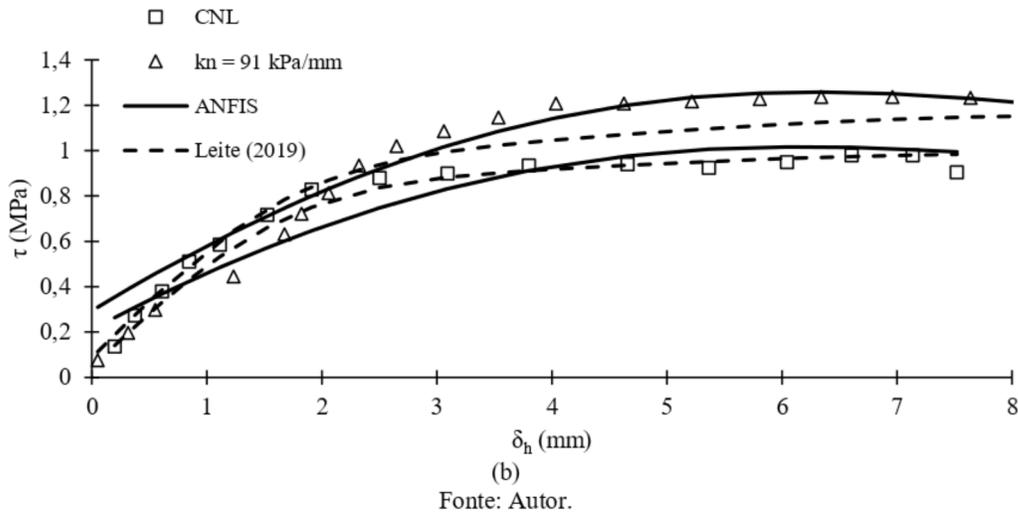
Fonte: Autor.

Em descontinuidades com preenchimento, a Figura 53 destaca as previsões do comportamento cisalhante fornecidas pelos modelos ANFIS e Leite (2019), comparando as estimativas com os dados experimentais apresentados por Shrivastava e Rao (2018), em descontinuidades sob condições CNL e CNS, com $t/a = 1,4$. De acordo com a Figura 53-a, observa-se que os dois modelos representaram de maneira satisfatória a dilatância em função do deslocamento cisalhante para as duas condições, tendo o sistema ANFIS apresentado resultados levemente mais próximos dos obtidos experimentalmente.

No caso da Figura 53-b, nota-se, mais uma vez, que os modelos ANFIS e Leite (2019) apresentaram diferenças entre suas previsões de tensões de cisalhamento em menores deslocamentos cisalhantes, sendo diferente do que ocorre em maiores deslocamentos, quando as estimativas se aproximam. Os dois modelos forneceram resultados próximos dos obtidos experimentalmente.

Figura 53 – Comportamento cisalhante de descontinuidades provenientes dos ensaios apresentados por Shrivastava e Rao (2018), em (a) Dilatância e (b) Tensão de cisalhamento.





5.4.3 Comparação entre os resultados fornecidos pelos sistemas ANFIS propostos e por outros modelos existentes utilizando descontinuidades hipotéticas

O comportamento cisalhante de descontinuidades hipotéticas foi estimado com o uso dos sistemas neuro-fuzzy do tipo ANFIS desenvolvidos no presente trabalho. Isso foi feito com o objetivo de avaliar as estimativas fornecidas pelos modelos Dilatância – A1 e T.Cisalhamento – A2 em descontinuidades que não foram utilizadas nos respectivos processos de treinamento. Além disso, foram comparadas as previsões realizadas pelos sistemas ANFIS com as obtidas por outras formulações, as quais se baseiam em metodologias alternativas para a previsão do comportamento cisalhante das descontinuidades rochosas, como os modelos de Dantas Neto *et al.* (2017), Matos (2018) e Leite (2019).

A descontinuidade utilizada tem como referência as descontinuidades hipotéticas apresentadas por Dantas Neto *et al.* (2017) e Leite (2019). Logo, em descontinuidades sem preenchimento, as propriedades escolhidas pelos citados autores são $JRC = 5$; $\sigma_c = 12$ MPa e $\phi_b = 37,5^\circ$, sendo atribuído $\phi_{fill} = 35,5^\circ$ nos casos em que há material de preenchimento, além dos valores de dados de entrada citados.

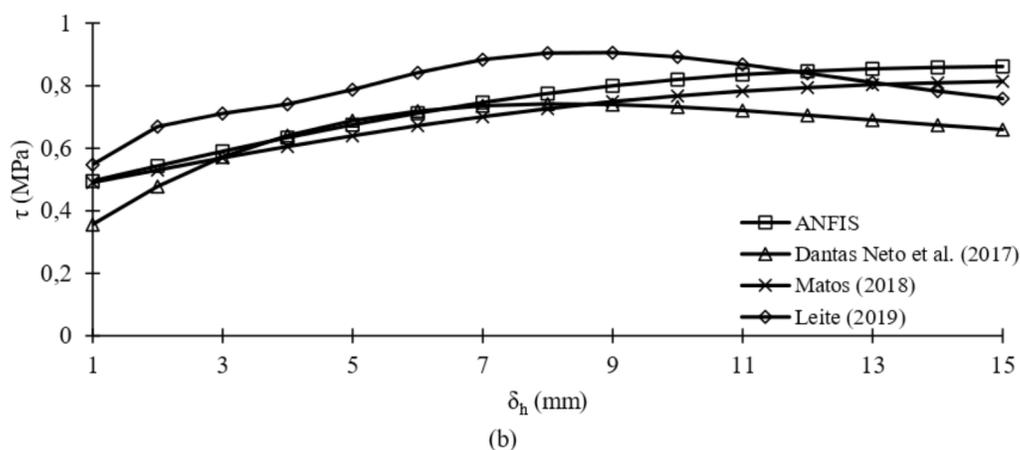
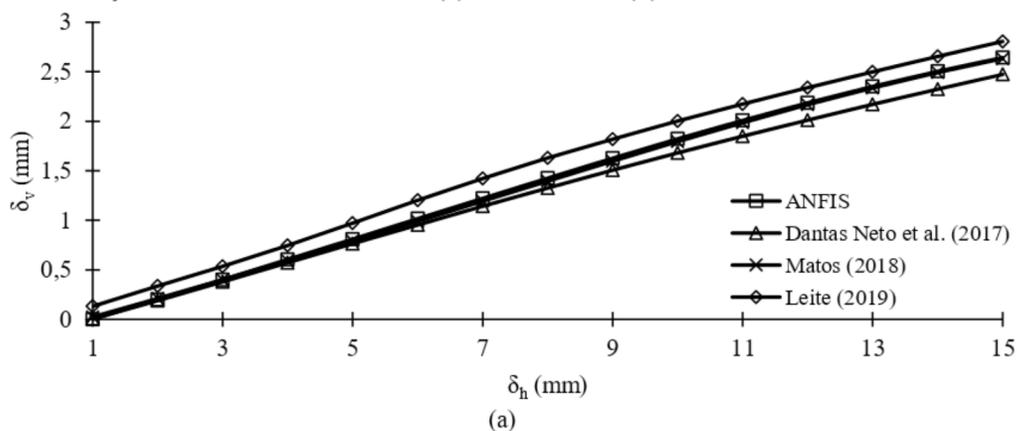
Contemplando as descontinuidades sem preenchimento, ilustra-se, por meio da Figura 54, as estimativas de dilatação e de tensão de cisalhamento obtidas pelos modelos ANFIS, Dantas Neto *et al.* (2017), Matos (2018) e Leite (2019), quando a descontinuidade hipotética se encontra sob tensão normal inicial de 0,5 MPa e sob condição CNL. Pelos resultados apresentados nas Figuras 54-a e 54-b, observa-se que os modelos ANFIS forneceram

estimativas compatíveis com as provenientes dos modelos de Dantas Neto *et al.* (2017), Matos (2018) e Leite (2019).

A expressiva correlação entre os resultados obtidos pelos sistemas neuro-fuzzy, ANFIS e Matos (2018), apresentados na Figura 54, mostra que a consideração de mais variáveis, regras fuzzy e funções de pertinência utilizadas para o desenvolvimento de Dilatância – A1 e de T.Cisalhamento – A2, possibilitando o cálculo da dilatação e da tensão de cisalhamento em descontinuidades com preenchimento, não prejudicou o potencial dos modelos ANFIS em prever o comportamento cisalhante de descontinuidades sem preenchimento.

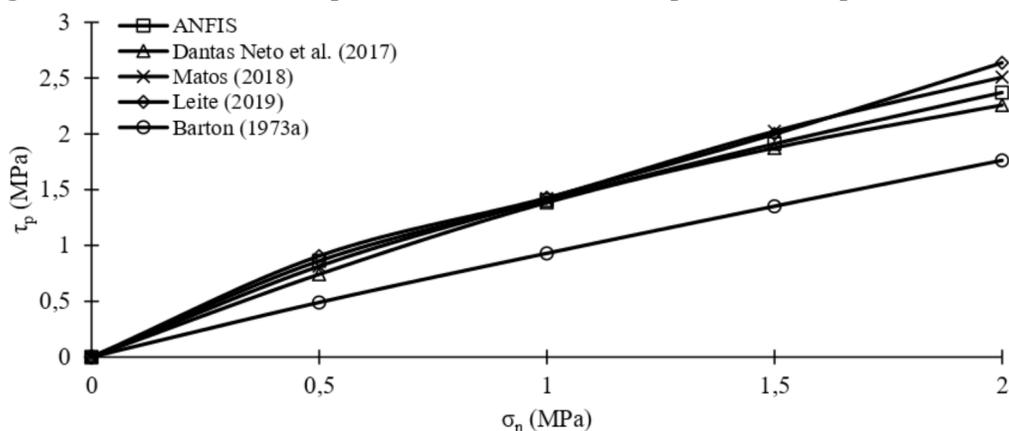
Alterando os valores das tensões normais iniciais impostas à descontinuidade hipotética sem preenchimento, é possível representar a sua envoltória de ruptura, apresentada na Figura 55. Pela figura, observa-se a expressiva correlação entre os resultados fornecidos pelos modelos neuronais e pelos que se baseiam na técnica neuro-fuzzy. Além disso, nota-se que o modelo de Barton (1973a) forneceu resultados inferiores aos dos demais modelos.

Figura 54 – Estimativa do comportamento cisalhante de descontinuidades hipotéticas sob condição CNL com o cálculo de (a) Dilatância e (b) Tensão de cisalhamento.



Fonte: Autor.

Figura 55 – Envoltórias de ruptura de descontinuidades hipotéticas sem preenchimento.



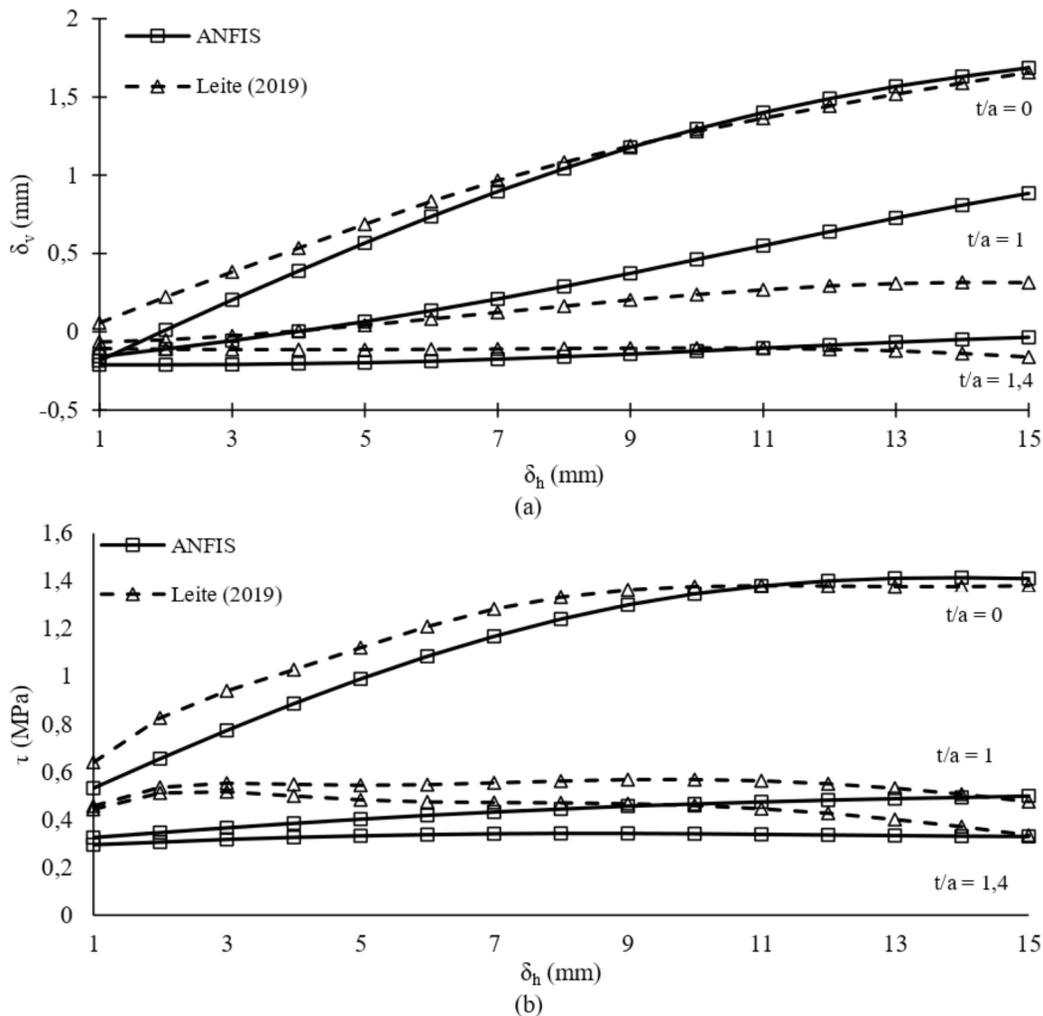
Fonte: Autor.

Em descontinuidades com preenchimento, os modelos ANFIS e Leite (2019) foram utilizados de maneira a avaliar a influência de t/a no comportamento cisalhante dessas estruturas, o que é apresentado na Figura 56, quando a descontinuidade hipotética se encontra sob tensão normal inicial de 0,6 MPa e sob rigidez normal de contorno de 425 kPa/mm. As Figuras 56-a e 56-b ilustram os resultados satisfatórios obtidos pelos modelos, uma vez que se observam as esperadas tendências de redução da dilatância e da tensão de cisalhamento, respectivamente, com o aumento de t/a , assim como nos dados experimentais expostos por Haque (1999), Indraratna, Haque e Aziz (1998, 1999) e Oliveira (2009).

A Figura 57 apresenta a influência do preenchimento na envoltória de ruptura da descontinuidade hipotética de acordo com os dados de saída obtidos pelos modelos ANFIS e Leite (2019). Observa-se que os dois modelos estimam a redução na inclinação da envoltória de ruptura quando a descontinuidade apresenta o material de preenchimento.

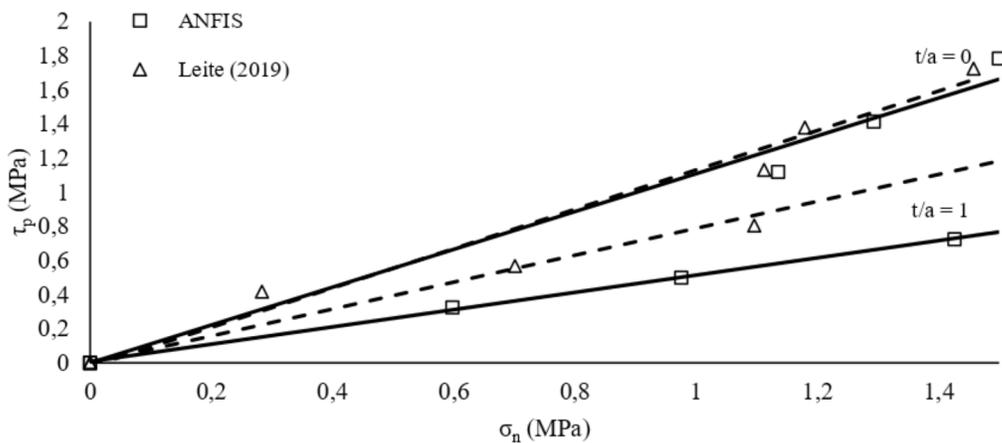
De acordo com as Figuras 56 e 57, nota-se que os resultados fornecidos pelos sistemas neuro-fuzzy do tipo ANFIS desenvolvidos e pela rede neural artificial de Leite (2019) apresentaram, no geral, uma correlação considerável entre si, mesmo que em determinados casos houvesse uma diferença mais expressiva entre suas estimativas. Essa diferença também ocorreu quando foram utilizadas descontinuidades experimentais, conforme exposto no Item 5.4.2.

Figura 56 – Estimativa do comportamento cisalhante de descontinuidades hipotéticas com preenchimento com o cálculo de (a) Dilatância e (b) Tensão de cisalhamento.



Fonte: Autor.

Figura 57 – Estimativa da envoltória de ruptura em descontinuidade hipotética com e sem preenchimento.



Fonte: Autor.

5.5 Limitações dos sistemas ANFIS propostos

À princípio, uma das limitações dos sistemas ANFIS propostos é a necessidade de programas mais sofisticados para o seu desenvolvimento, como o MATLAB. Há, ainda, a dificuldade de implementação dos sistemas neuro-fuzzy em uma planilha eletrônica, o que conferiria um acesso mais facilitado aos modelos.

Outra limitação dos sistemas neuro-fuzzy do tipo ANFIS propostos é a capacidade de estimar somente um dado de saída, a dilatância ou a tensão de cisalhamento, o que difere de outros tipos de metodologias, como as redes neurais artificiais, que podem apresentar diversas variáveis de saída.

No que diz respeito aos modelos Dilatância – A1 e T.Cisalhamento – A2, o uso deles está limitado aos intervalos das variáveis de entrada apresentados no Capítulo 4, sendo possível lidar com essa condição na medida em que novos dados de entrada estejam disponíveis. Além disso, os sistemas neuro-fuzzy desenvolvidos não consideram outros fatores importantes que influenciam o comportamento cisalhante das descontinuidades rochosas, como a coesão, o grau de saturação, a condição de drenagem, entre outros.

CAPÍTULO 6: CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

6.1 Conclusões

O uso de sistemas inteligentes, como as redes neurais artificiais, a lógica fuzzy e as técnicas neuro-fuzzy, tem sido crescente em Mecânica das Rochas, tendo em vista que eles se apresentam como promissoras ferramentas na previsão de fenômenos complexos, não-lineares, e que envolvem muitas variáveis. Entre as diversas vantagens da aplicação desses sistemas na previsão do comportamento cisalhante das descontinuidades rochosas, destacam-se o tratamento diferenciado dos dados utilizados em seus desenvolvimentos e as estimativas rápidas fornecidas pelos modelos.

A motivação para a realização do presente trabalho fundamenta-se no fato de que ainda não tinham sido desenvolvidos modelos de previsão do comportamento cisalhante de descontinuidades rochosas com preenchimento que utilizassem a capacidade de aprendizagem das redes neurais artificiais no desenvolvimento de conjuntos fuzzy, considerando as incertezas presentes nos valores dos dados de entrada. Isto pode ser realizado com o desenvolvimento de sistemas inteligentes neuro-fuzzy. Nesse contexto, foram modelados sistemas neuro-fuzzy do tipo ANFIS que estimam valores de dilatância e de tensão de cisalhamento de descontinuidades com e sem preenchimento, fornecendo previsões do comportamento cisalhante de descontinuidades rochosas frente às solicitações que podem ser impostas em campo.

No desenvolvimento dos sistemas neuro-fuzzy, foi utilizada uma série de dados de ensaios de cisalhamento direto realizados em descontinuidades rochosas apresentados por diversos autores. Nestes dados, apresentavam-se descontinuidades sob condições CNS, CNL, com e sem preenchimento, rochas brandas e duras, pouco a muito rugosas, o que reflete na amplitude de trabalho dos modelos desenvolvidos.

As variáveis de entrada utilizadas nos sistemas neuro-fuzzy desenvolvidos foram a rigidez normal de contorno (k_n), em kPa/mm; a relação entre a espessura do preenchimento e a amplitude da aspereza (t/a); a tensão normal inicial (σ_{n0}), em MPa; o coeficiente de rugosidade da descontinuidade (JRC); a resistência à compressão uniaxial da rocha intacta (σ_c), em MPa; o ângulo de atrito básico da rocha intacta (ϕ_b), em graus; o ângulo de atrito do material de preenchimento (ϕ_{fill}), em graus, e o deslocamento cisalhante (δ_h), em mm.

Entre os 72 sistemas neuro-fuzzy do tipo ANFIS desenvolvidos para a previsão da dilatância e da tensão de cisalhamento em descontinuidades rochosas, os modelos Dilatância –

A1 e T.Cisalhamento – A2 apresentaram os melhores desempenhos frente aos testes realizados. Eles foram formados a partir do uso de 80% dos dados experimentais para a etapa de treinamento e 20% para a etapa de teste, com estrutura inicial baseada na técnica de repartição em grades.

O modelo Dilatância – A1 é constituído por 2 funções de pertinência do tipo gaussiana para todas as variáveis de entrada escolhidas para o sistema, totalizando 256 regras de inferência fuzzy. No caso do modelo T.Cisalhamento – A2, a variável t/a é composta por 3 funções de pertinência do tipo gaussiana, e as demais variáveis apresentam 2 funções de pertinência do mesmo tipo, totalizando 384 regras de inferência fuzzy.

O valor do coeficiente de determinação (R^2) obtido nas fases de treinamento e de teste com a aplicação do modelo Dilatância – A1 foi de 0,99. Isso demonstra que as previsões fornecidas pelo sistema neuro-fuzzy em questão apresentaram uma correlação satisfatória com os dados experimentais utilizados nas respectivas fases de treinamento e de teste.

Os resultados fornecidos pelo modelo Dilatância – A1 foram próximos dos dados observados em descontinuidades experimentais. Além disso, suas estimativas conseguiram representar as tendências esperadas da variação da dilatância com a modificação dos parâmetros governantes do comportamento cisalhante das descontinuidades rochosas. Entre os diversos testes que foram realizados, é possível destacar que o modelo compreendeu de maneira satisfatória a redução da dilatância com valores superiores de k_n , t/a e σ_{n0} , sendo obtidos maiores valores de dilatância com o aumento de JRC.

Utilizando descontinuidades hipotéticas para avaliar as respostas do sistema Dilatância – A1 em descontinuidades que não foram utilizadas em seu desenvolvimento, foi possível observar que o modelo conseguiu estimar de maneira satisfatória a variação da dilatância com a modificação dos parâmetros governantes do processo de cisalhamento das descontinuidades rochosas.

Foram calculados valores de R^2 nas fases de treinamento e de teste de 0,97 e 0,96, respectivamente, quando foi aplicado o sistema neuro-fuzzy T.Cisalhamento – A2, o que mostra que as estimativas realizadas pelo modelo apresentaram expressiva correlação com os dados experimentais utilizados em suas fases de treinamento e de teste. Além disso, por meio de descontinuidades hipotéticas, observa-se que suas previsões corresponderam às tendências esperadas com a variação dos parâmetros governantes do comportamento cisalhante das descontinuidades rochosas, sendo fornecidas superiores tensões de cisalhamento com maiores valores de k_n , JRC e σ_{n0} , além de menores previsões com o aumento dos valores de t/a .

As estimativas fornecidas pelos sistemas neuro-fuzzy do tipo ANFIS definidos foram comparadas com as obtidas por outros modelos existentes. Foi possível observar, fundamentando-se em resultados provenientes de descontinuidades experimentais, que os dados de saída estimados pelos sistemas ANFIS, por vezes, foram mais próximos dos dados observados do que as previsões fornecidas pelas formulações analíticas utilizadas.

Utilizando descontinuidades experimentais e hipotéticas, os dados de saída de Dilatância – A1 e de T.Cisalhamento – A2 foram comparados com os resultados fornecidos por outros sistemas inteligentes, que utilizam redes neurais artificiais e técnicas neuro-fuzzy. Em descontinuidades sem preenchimento, foi possível observar que, no geral, todos os modelos apresentaram expressiva correlação entre suas previsões.

Em descontinuidades hipotéticas e experimentais, ambas com preenchimento, foi possível comparar os resultados obtidos pelos sistemas ANFIS desenvolvidos com os fornecidos pelo modelo neuronal utilizado. Foi observado, no geral, que as previsões de dilatação e de tensão de cisalhamento realizadas pelos modelos apresentaram expressiva correlação entre si, embora em determinados casos haja certa divergência entre seus valores.

Observa-se a funcionalidade dos modelos neuro-fuzzy desenvolvidos em estimar o comportamento cisalhante de descontinuidades rochosas com e sem preenchimento, a partir da consideração dos fatores que governam o processo de cisalhamento dessas estruturas. No entanto, é válido ressaltar que o uso desses sistemas está condicionado e limitado aos intervalos atribuídos às respectivas variáveis de entrada. Outra limitação dos modelos ANFIS é o fato de que eles não consideram outros fatores que influenciam o comportamento cisalhante das descontinuidades, como a condição de drenagem, o grau de saturação e a coesão do material de preenchimento, entre outros.

Por fim, ressalta-se que os sistemas neuro-fuzzy desenvolvidos não visam substituir os ensaios que devem ser realizados em amostras provenientes de maciços rochosos. Os modelos ANFIS surgem como uma ferramenta potencial para a estimativa preliminar do comportamento cisalhante das descontinuidades rochosas, por meio da atribuição de valores às variáveis de entrada utilizadas, fornecendo respostas rápidas que visam auxiliar a avaliação por parte do projetista.

6.2 Sugestões para trabalhos futuros

Entre as sugestões que podem ser apontadas para o desenvolvimento de pesquisas futuras, recomenda-se:

- Incluir novos conjuntos de dados de descontinuidades experimentais que possibilitem a melhoria de desempenho dos modelos neuro-fuzzy, abrangendo novas condições e limites dos parâmetros das variáveis;
- Desenvolvimento de ábacos que representem os modelos neuro-fuzzy desenvolvidos, e permitam o cálculo direto de suas estimativas de dilatância e de tensão de cisalhamento;
- Considerar outras variáveis de entrada, como a condição de drenagem, a umidade e a coesão do material de preenchimento, em modelos neuro-fuzzy para a previsão do comportamento cisalhante das descontinuidades rochosas;
- Utilizar os sistemas neuro-fuzzy do tipo ANFIS desenvolvidos em análises de estabilidade de taludes rochosos reais com o objetivo de verificar a acurácia dos modelos;
- Fazer a implementação dos sistemas ANFIS em códigos que permitam a análise numérica de maciços rochosos fraturados considerando o comportamento cisalhante das descontinuidades previsto pelos modelos desenvolvidos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALIREZA, K.; SOMAIEH, A. -Z. Sizing of rock fragmentation modeling due to bench blasting using adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS). **International Journal of Mining Science and Technology**, vol. 23, p. 809-813, 2013.
- BANDIS, S.; LUMSDEN, A. C.; BARTON, N. R. Experimental studies of scale effects on the shear behaviour of rock joints. **Int. J. of Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.**, vol. 18, p. 1-21, 1981.
- BARLA, G.; FORLATI, F.; ZANINETTI, A. Shear behaviour of discontinuities. **Proceedings of International Symposium on fundamentals of rock joints**, Bjorkiden, Sweden, p. 163-172, 1985.
- BARTON, N. R. A relationship between joint roughness and joint shear strength. In: **Int. Symp. Rock Mech.** Nancy, p 1-8, 1971.
- BARTON, N. R. A Review of a New Shear-Strength Criterion for Rock Joints. **Engineering Geology**. v. 7, n. 4, p 287–332, 1973a.
- BARTON, N. R. A review of the shear strength of filled discontinuities in rock. **Norwegian Geotechnical Institute Publication**, n. 105, p. 1–38, 1973b.
- BARTON, N. R. The shear strength of rock and rock joints. **Int. J. Rock Mech. Min. Sci.**, vol. 13, no. 9, p. 255–279, 1976.
- BARTON, N. R. Shear strength criteria for rock, rock joints, rockfill and rock masses: Problems and some solutions. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**., v. 5, p. 249-261, 2013.
- BARTON, N. R. Non-linear shear strength for rock, rock joints, rockfill and interfaces. **Innov. Infrastruct. Solut.**, v. 1, n. 1, p. 1-30, 2016.
- BARTON, N. R.; CHOUBEY, V. The shear strength of rock joints in theory and practice. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, v. 10, no. 1–2, p. 1–54, 1977.
- BARTON, N. R.; BANDIS, S. C. Review of predictive capabilities of JRC-JCS model in engineering practice. In: **Rock Joints**, Barton & Stephansson (Eds), Balkema, Rotterdam, p. 603-610, 1990.
- BENMOKRANE, B.; BALLIVY, G. Laboratory study of shear behaviour of rock joints under constant normal stiffness conditions. **Rock Mechanics as a Guide for Efficient Utilization of Natural Resources**, Khair (Ed.), Balkema, Rotterdam, p. 899- 906, 1989.
- BERTACCHI, P. *et al.* Laboratory tests on the shear behaviour of filled discontinuities. **Proceedings of international symposium on engineering in complex rock formation.**, Beijing, China, p. 262-270, 1986.

BYERLEE, J. D.; BRACE, W. F. Stick Slip, State Sliding, and Earthquakes – Effect of Rock Type, Pressure, Strain Rate, and Stiffness. **Journal of Geophysical Research**, v. 73, No. 18, p. 6031–6037, 1968.

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

DANTAS NETO, S. A.; INDRARATNA B.; OLIVEIRA D. A. F. Prediction of the Shear Behaviour of Clean Joints in Soft Rocks Using Perceptron. *In: VII Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas – SBMR 2016*, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brazil, p. 1817– 1831, 2016.

DANTAS NETO, S. A.; SILVA, A. V.; SOUZA FILHO, F. A. Avaliação da Influência do Nível de Incerteza Existente nos Parâmetros Geotécnicos no Risco de Falha em Barragens de Terra Utilizando Operações com Números Fuzzy. **XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (COBRAMSEG 2016)**, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil, 2016.

DANTAS NETO, S. A. *et al.* Modelling the Shear Behaviour of Clean Rock Discontinuities Using Artificial Neural Networks. **Rock Mech Rock Eng**, v. 50, p. 1817-1831, 2017.

DANTAS NETO, S. A.; BARRETO, G. A.; MATOS, Y. M. P. Using Intelligent Systems for Evaluating the Rock Slope Stability Defined by Unfilled Discontinuities. **14th International Congress on Rock Mechanics and Rock Engineering (ISRM 2009)**, Foz do Iguaçu, Paraná, Brazil, v. 6, 2019.

DEHGHAN, S. *et al.* Prediction of uniaxial compressive strength and modulus of elasticity for Travertine samples using regression and artificial neural networks. **Mining Science and Technology**, v. 20, p. 41–46, 2010.

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.

DOMBI, J. Membership function as an evaluation. **Fuzzy Sets and Systems**, n.35, p.01-21, 1990.

FENG, X. -T. *et al.* A New Direction – Intelligent Rock Mechanics and Rock Engineering. **Int. J. Rock Mech. Sci.**, v. 34, n. 01, p. 135-141, 1997.

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. *et al.* A neuro-fuzzy model for modulus of deformation of jointed rock masses. **Computers and Geotechnics**, n.31, p. 375-383, 2004.

GONG, L.; NEMCIK, J.; REN, T. Numerical Simulation of the Shear Behaviour of Rock Joints Filled with Unsaturated Soil. **Int. J. Geomech.**, v. 18, n. 9, 16 p., 2018.

GOODMAN, R. E. The Deformability of Joints. In: Determination of the In-Situ Modulus of Deformation of Rock. **ASTM, STP 477**: p. 174-196, 1970.

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

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**. 271 f. Tese de Doutorado. Doctor of Philosophy. University of Wollong. Department of Civil, Mining and Environmental Engineering. Wollongong, Austrália, 1999.

HARRISON, J. P.; HUDSON, J. A. Incorporating Parameter Variability in Rock Mechanics Analyses: Fuzzy Mathematics Applied to Underground Rock Spalling. **Rock Mech Rock Eng**, v. 43, p. 219-224, 2010.

HAYKIN, S. **Neural networks and learning machines**. 3. ed. Ontario, Canada: Pearson, 2008.

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

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.; JAYANATHAN, M.; BROWN, E. T. Shear strength model for overconsolidated clay-infilled idealised rock joints. **Géotechnique**, v. 58, n. 1, p. 55-65, 2008.

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, 2010.

INDRARATNA, B. *et al.* 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, 2010.

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

INDRARATNA, B. *et al.* Shear strength of rock joints influenced by compacted infill. **Int. J. Rock Mech. Min. Sci.**, v. 70, p. 296-307, 2014.

INDRARATNA, B. *et al.* Modelling the Shear Behaviour of Rock Joints with Asperity Damage Under Constant Normal Stiffness. **Rock Mech Rock Eng**, v. 48, p. 179-195, 2015.

ISMAIL, M. K. A. *et al.* Shear strength behaviour of rock joint material influenced by diferent weathering grade. **Journal of Physics: Conference Series**, v.1349, 9 p., 2019.

JALALIFAR, H. *et al.* 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.

JAYANATHAN, M. **Shear behaviour of normally consolidated and overconsolidated infilled rock joints under undrained triaxial conditions**. 257 f. Tese (Doutorado) -School of Civil, Mining and Environmental Engineering, University of Wollongong, Wollongong, 2007.

JOHNSTONE, I. W.; LAM, T. S. K. Shear behaviour of regular triangular concrete/rock joints – analysis. **J. Geotech. Engng. Div.**, ASCE 115, n. 5, p. 711-727, 1989.

KANJI, M. A. Unconventional laboratory tests for the determination of the shear strength of soil-rock contacts. **Proc. 3rd Congr. Int. Soc. Rock Mech.**, Denver, p. 241-247, 1974.

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.

KHANDELWAL, M.; SINGH, T. N. Prediction of blast induced ground vibrations and frequency in opencast mine: A neural network approach. **Journal of Sound and Vibration**, n.289, p. 711-725, 2006.

KUTTER, H. K; RAUTENBERG, A. The residual shear strength of filled joints in rock. **Proc. 4th Int. Cong. Rock Mech.**, Montreux, p. 221-227, 1979.

LADANYI, B.; ARCHAMBAULT, G. Simulation of Shear Behavior of a Jointed Rock Mass. **Eleventh U.S. Symposium on Rock Mechanics: Theory and Practice**. p. 105–125, 1969.

LADANYI, B.; ARCHAMBAULT, G. Shear Strength and Deformability of Filled Indented Joints. **Proc. Int. Symp. On Geotechnics of Structurally Complex Formations**. v. 1, p. 317-326, p. 317 – 326, 1977.

LAMA, R. L. Influence of clay filling on shear behaviour of joints. **Proc. 3rd Congr. Int. Assoc. Eng. Geol.**, Madrid, p. 27-34, 1978.

LEICHNITZ, W. Mechanical Properties of Rock Joints. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics**. v. 22, n. 5, p. 313 – 321. 1985.

LEITE, A. R. S. **Aplicações de redes neurais artificiais para previsão do comportamento cisalhante em descontinuidades de maciços rochosos**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Geotecnia, Fortaleza 2019.

LEITE, A. R. S. *et al.* Study on the shear behaviour of rock joints using different models of artificial neural networks. **International Congress on Rock Mechanics and Rock Engineering**, v. 6, p. 2707 – 2714, 2019.

LEITE, A. R. S.; DANTAS NETO, S. A.; ALBINO, M. C. Modelo de rede neural artificial para previsão do comportamento cisalhante de descontinuidades rochosas. **XL Ibero-Latin American Congress on Computational Methods in Engineering (CILAMCE 2019)**, Natal, Rio Grande do Norte, Brazil, 2019.

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

MATOS, Y. M. P. **Desenvolvimento de modelos de previsão do comportamento cisalhante em descontinuidades sem preenchimento de maciços rochosos utilizando técnicas fuzzy e neuro-fuzzy**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Geotecnia, Fortaleza, 2018.

MATOS, Y. M. P; DANTAS NETO, S. A.; BARRETO, G. A. Previsão da Dilatância em Descontinuidades de Maciços Rochosos Utilizando Técnicas Fuzzy, **V Congresso Brasileiro de Sistemas Fuzzy (CBSF)**, Fortaleza, Ceará, Brasil, 2018a.

MATOS, Y. M. P; DANTAS NETO, S. A.; BARRETO, G. A. Desenvolvimento de um Modelo Fuzzy para Previsão da Dilatância em Descontinuidades Sem Preenchimento em Maciços Rochosos, **Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas (SBMR 2018)**, Salvador, Bahia, Brasil, 2018b.

MATOS, Y. M. P; DANTAS NETO, S. A.; BARRETO, G. A. A Takagi-Sugeno fuzzy model for predicting the clean rock joints shear strength, **REM - Int. Eng. J.**, v. 72, o. 2, p. 193–198, 2019a.

MATOS, Y. M. P; DANTAS NETO, S. A.; BARRETO, G. A. Predicting the Shear Strength of Unfilled Rock Joints with the First-Order Takagi-Sugeno Fuzzy Approach. **Soils and Rocks**, v. 42, n. 1, p. 21–29, 2019b.

MEHRISHAL, S. *et al.* An Experimental Study on Normal Stress and Shear Rate Dependency of Basic Friction Coefficient in Dry and Wet Limestone Joints. **Rock Mech. Rock Eng.**, v. 49, n. 12, p. 4607–4629, 2016.

MEULENKAMP F.; GRIMA M. A. Application of neural networks for the prediction of the unconfined compressive strength (UCS) from Equotip hardness. **Int. J. Rock Mech. Min. Sci.**, v. 36 p. 29–39, 1999.

MIRZAGHORBANALI, A. *et al.* Effects of shearing Direction on shear behaviour of rock joints. **14th Coal Operators' Conference**, University of Wollongong, The Australasian Institute of Mining and Metallurgy & Mine Managers Association of Australia, p. 202–209, 2014.

MONJEZI, M.; DEGHANI, H. Evaluation of effect of blasting pattern parameters on back break using neural networks. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, n. 45, p. 1446-1453, 2008.

MOZELLI, L. A. **Controle fuzzy para sistemas Takagi-Sugeno: condições aprimoradas e aplicações**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Belo Horizonte, 2008.

NAGHADEHI, M. Z. Laboratory Study of the Shear Behaviour of Natural Rough Rock Joints Infilled by Different Soils. **Periodica Polytechnica Civil Engineering**. v. 59, n. 3, p. 413-421, 2015.

NAUCK, D.; KRUSE, R. Neuro-fuzzy systems for function approximation. **Fuzzy Sets and Systems**, v. 101, p. 261-271, 1999.

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.

OBERT, L.; BRADY, B. T.; SCHMECHEL, F. W. The Effect of Normal Stiffness on the Shear Resistance of Rock. **Rock Mechanics**, v. 8, p. 57–72, 1976.

OCAK, I.; SEKER, S. E. Estimation of Elastic Modulus of Intact Rocks by Artificial Neural Network. **Rock Mech Rock Eng**, v. 45, p. 1047-1054, 2012.

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

OLIVEIRA, D. A F.; INDRARATNA, B.; NEMCIK, J. Critical Review on Shear Strength Models for Soil-Infilled Joints. **Geomechanics and Geoengineering**. v. 4, n. 3, p. 237–244, 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. *et al.* Shear strength of modelled filled rock joints. **Rock Joints; Proc. Int. Symp. on Rock Joints**, Loen, Norway (N. Barton and O. Stephansson, Eds), p. 275-282, Balkema, Rotterdam, 1990.

PAPALIANGAS, T. *et al.* The Effect of Frictional Fill Thickness on the Shear Strength of Rock Discontinuities. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomatics**. v. 30, n. 2, p. 81–91, 1993.

PATTON, F.D., 1966. Multiple modes of shear failure in rocks. **Proceedings of the 1st Congress of the International Society for Rock Mechanics**, Lisbon. p. 509-513, 1966.

PEREIRA, J. P. Shear strength of filled discontinuities. **Proceedings of international symposium on rock joints**, Loen, Norway, p. 283-287, 1990.

PHIEN-WEJ, N.; SHRESTHA, U. B.; RANTUCCI, G. Effect of infill thickness on shear behaviour of rock joints. **Proceedings of international symposium on rock joints**, Loen, Norway, p. 289-294, 1990.

PREMADASA, W. N. **The influence of infill saturation on the shear strength of soil-infilled rock joints**. 297 f. Tese (Doutorado) -School of Civil, Mining and Environmental Engineering, University of Wollongong, Wollongong, 2013.

PREMADASA, W.; INDRARATNA, B. Shear behaviour of infilled rock joints related to partially saturated infill conditions. **International Conference on Geotechnical Engineering**, Colombo, 2015.

RAM, B. K.; BASU, A. Shear Behaviour of Unfilled-Planar Quartzitic Rock Joints with Reference to Weathering Grade of Joint Surfaces. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 9 p., 2019.

RUMELHART, D. E.; HINTON, G. E.; WILLIAMS, R. J. Learning internal representations by error propagation. In: **Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition**, D. E. Rumelhart and James L. McClelland (Eds), Cambridge, MA: MIT, v. 1, ch. 8, p. 318-362, 1986.

SADAGHIANI, M. H; NAFISI, A. The Effects of Water Moisture Content of Filling Material, Infill Thickness, and Normal Stress on Shear Behavior of Filled Joints. **Electronic Journal of Geotechnical Engineering**, v. 19, p. 7011– 7019, 2014.

SADROSSADAT, E. *et al.* Use of adaptive neuro-fuzzy inference system and gene expression programming methods for estimation of the bearing capacity of rock foundations. **Engineering Computations**, v. 35, n. 5, p. 2078– 2106, 2018.

SAKURAI, S.; SHIMIZU, N. Assessment of rock slope stability by fuzzy set theory. In: **Proceedings of the 6th Congress of the International Society for Rock Mechanics**. A.A. Balkema, Rotterdam, p. 503– 506, 1987.

SAYADI, A. *et al.* A comparative study on the application of various artificial neural networks to simultaneous prediction of rock fragmentation and backbreak. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, v. 05, p. 318-324, 2013.

SHRIVASTAVA, A. K.; RAO, K. S.; RATHOD, G. W. Shear behaviour of infill joint under CNS boundary condition. **Proceedings of Indian Geotechnical Conference**, Kochi, n. 369, p. 981-984, 2011.

SHRIVASTAVA, A. K.; RAO, K. S. Physical Modeling of Shear Behavior of Infilled Rock Joints Under CNL and CNS Boundary Conditions. **Rock Mech. Rock Eng.**, v. 51, n. 1, p. 101–118, 2018.

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)**, Golden, Colorado, p. 1-7, 2006.

SINGH V. K.; SINGH D.; SINGH T. N. Prediction of strength properties of some schistose rocks from petrographic properties using artificial neural networks. **Int. J. Rock Mech. Min. Sci.**, v. 38, p. 269–284, 2001.

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. *et al.* Estimation of rock modulus: For intact rocks with an artificial neural network and for rock masses with a new empirical equation. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, n.43, p. 224-235, 2006.

SONMEZ, H *et al.* Predicting uniaxial compressive strength and deformation modulus of volcanic bimrocks considering engineering dimension. **Int. J. Rock Mech. Min. Sci.**, v. 86, p. 91–103, 2016.

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.

TIRYAKI, B. Application of artificial neural networks for predicting the cuttability of rocks by drag tools. **Tunnelling and Underground Space Technology**, v. 23, p. 273-280, 2008.

TRIOLA, M. F. **Introdução à estatística**, 10ª ed., Rio de Janeiro: LTC, 2008.

TSUKAMOTO, Y. An approach to fuzzy reasoning method. In: M. M. Gupta, R. K. Ragade, R. R. Yager, Eds., **Advances in Fuzzy Set Theory and Applications**. Amsterdam, p. 137-149, 1979.

WANG, X.; WANG, R.; ZHANG, Z. Numerical Analysis Method of Shear Properties of Infilled Joints under Constant Normal Stiffness Condition. **Advances in Civil Engineering**, v. 2018, 13 p., 2018.

WELIDENIYA, H. S. **Laboratory evaluation and modelling of shear strength of infilled joints under constant normal stiffness (CNS) conditions**. 310 f. Tese (Doutorado) - Department of Civil, Mining and Environmental Engineering, University of Wollongong, Wollongong, 2005.

YESILOGLU-GULTEKIN, N. *et al.* An 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.

YILMAZ, I.; YUKSEK, A. G. An example of artificial neural network (ANN) application for indirect estimation of rock parameters. **Rock Mech. Rock Eng.**, v. 41, n.5, p. 781–795, 2008.

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

ZHANG, Q.; SONG, J.; NIE, X. Application of Neural Network Models to Rock Mechanics and Rock Engineering. **Int. J. Rock Mech. Sci & Geomech. Abstr.**, v. 28, n. 06, p. 535-540, 1991.

APÊNDICE A – REGRAS DE INFERÊNCIA FUZZY PARA DETERMINAÇÃO DE δ_V

1. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (dv é saída1) (1)
2. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (dv é saída2) (1)
3. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (dv é saída3) (1)
4. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (dv é saída4) (1)
5. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (dv é saída5) (1)
6. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (dv é saída6) (1)
7. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (dv é saída7) (1)
8. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (dv é saída8) (1)
9. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (dv é saída9) (1)
10. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (dv é saída10) (1)
11. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (dv é saída11) (1)
12. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (dv é saída12) (1)
13. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (dv é saída13) (1)
14. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (dv é saída14) (1)
15. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (dv é saída15) (1)
16. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (dv é saída16) (1)

17. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (dv é saída17) (1)
18. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (dv é saída18) (1)
19. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (dv é saída19) (1)
20. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (dv é saída20) (1)
21. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (dv é saída21) (1)
22. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (dv é saída22) (1)
23. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (dv é saída23) (1)
24. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (dv é saída24) (1)
25. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (dv é saída25) (1)
26. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (dv é saída26) (1)
27. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (dv é saída27) (1)
28. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (dv é saída28) (1)
29. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (dv é saída29) (1)
30. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (dv é saída30) (1)
31. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (dv é saída31) (1)
32. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (dv é saída32) (1)
33. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (dv é saída33) (1)

34. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (dv é saída34) (1)
35. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (dv é saída35) (1)
36. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (dv é saída36) (1)
37. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (dv é saída37) (1)
38. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (dv é saída38) (1)
39. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (dv é saída39) (1)
40. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (dv é saída40) (1)
41. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (dv é saída41) (1)
42. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (dv é saída42) (1)
43. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (dv é saída43) (1)
44. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (dv é saída44) (1)
45. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (dv é saída45) (1)
46. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (dv é saída46) (1)
47. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (dv é saída47) (1)
48. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (dv é saída48) (1)
49. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (dv é saída49) (1)
50. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (dv é saída50) (1)

51. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (dv é saída51) (1)
52. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (dv é saída52) (1)
53. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (dv é saída53) (1)
54. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (dv é saída54) (1)
55. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (dv é saída55) (1)
56. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (dv é saída56) (1)
57. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (dv é saída57) (1)
58. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (dv é saída58) (1)
59. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (dv é saída59) (1)
60. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (dv é saída60) (1)
61. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (dv é saída61) (1)
62. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (dv é saída62) (1)
63. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (dv é saída63) (1)
64. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (dv é saída64) (1)
65. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (dv é saída65) (1)
66. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (dv é saída66) (1)
67. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (dv é saída67) (1)

68. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (dv é saída68) (1)
69. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (dv é saída69) (1)
70. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (dv é saída70) (1)
71. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (dv é saída71) (1)
72. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (dv é saída72) (1)
73. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (dv é saída73) (1)
74. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (dv é saída74) (1)
75. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (dv é saída75) (1)
76. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (dv é saída76) (1)
77. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (dv é saída77) (1)
78. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (dv é saída78) (1)
79. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (dv é saída79) (1)
80. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (dv é saída80) (1)
81. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (dv é saída81) (1)
82. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (dv é saída82) (1)
83. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (dv é saída83) (1)
84. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (dv é saída84) (1)

85. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (dv é saída85) (1)
86. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (dv é saída86) (1)
87. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (dv é saída87) (1)
88. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (dv é saída88) (1)
89. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (dv é saída89) (1)
90. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (dv é saída90) (1)
91. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (dv é saída91) (1)
92. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (dv é saída92) (1)
93. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (dv é saída93) (1)
94. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (dv é saída94) (1)
95. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (dv é saída95) (1)
96. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (dv é saída96) (1)
97. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (dv é saída97) (1)
98. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (dv é saída98) (1)
99. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (dv é saída99) (1)
100. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (dv é saída100) (1)
101. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (dv é saída101) (1)

102. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (dv é saída102) (1)
103. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (dv é saída103) (1)
104. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (dv é saída104) (1)
105. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (dv é saída105) (1)
106. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (dv é saída106) (1)
107. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (dv é saída107) (1)
108. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (dv é saída108) (1)
109. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (dv é saída109) (1)
110. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (dv é saída110) (1)
111. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (dv é saída111) (1)
112. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (dv é saída112) (1)
113. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (dv é saída113) (1)
114. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (dv é saída114) (1)
115. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (dv é saída115) (1)
116. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (dv é saída116) (1)
117. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (dv é saída117) (1)
118. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (dv é saída118) (1)

119. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (dv é saída119) (1)
120. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (dv é saída120) (1)
121. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (dv é saída121) (1)
122. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (dv é saída122) (1)
123. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (dv é saída123) (1)
124. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (dv é saída124) (1)
125. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (dv é saída125) (1)
126. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (dv é saída126) (1)
127. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (dv é saída127) (1)
128. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (dv é saída128) (1)
129. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (dv é saída129) (1)
130. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (dv é saída130) (1)
131. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (dv é saída131) (1)
132. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (dv é saída132) (1)
133. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (dv é saída133) (1)
134. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (dv é saída134) (1)
135. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (dv é saída135) (1)

136. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (dv é saída136) (1)
137. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (dv é saída137) (1)
138. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (dv é saída138) (1)
139. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (dv é saída139) (1)
140. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (dv é saída140) (1)
141. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (dv é saída141) (1)
142. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (dv é saída142) (1)
143. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (dv é saída143) (1)
144. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (dv é saída144) (1)
145. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (dv é saída145) (1)
146. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (dv é saída146) (1)
147. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (dv é saída147) (1)
148. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (dv é saída148) (1)
149. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (dv é saída149) (1)
150. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (dv é saída150) (1)
151. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (dv é saída151) (1)
152. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (dv é saída152) (1)

153. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (dv é saída153) (1)
154. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (dv é saída154) (1)
155. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (dv é saída155) (1)
156. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (dv é saída156) (1)
157. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (dv é saída157) (1)
158. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (dv é saída158) (1)
159. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (dv é saída159) (1)
160. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (dv é saída160) (1)
161. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (dv é saída161) (1)
162. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (dv é saída162) (1)
163. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (dv é saída163) (1)
164. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (dv é saída164) (1)
165. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (dv é saída165) (1)
166. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (dv é saída166) (1)
167. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (dv é saída167) (1)
168. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (dv é saída168) (1)
169. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (dv é saída169) (1)

170. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (dv é saída170) (1)
171. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (dv é saída171) (1)
172. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (dv é saída172) (1)
173. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (dv é saída173) (1)
174. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (dv é saída174) (1)
175. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (dv é saída175) (1)
176. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (dv é saída176) (1)
177. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (dv é saída177) (1)
178. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (dv é saída178) (1)
179. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (dv é saída179) (1)
180. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (dv é saída180) (1)
181. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (dv é saída181) (1)
182. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (dv é saída182) (1)
183. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (dv é saída183) (1)
184. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (dv é saída184) (1)
185. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (dv é saída185) (1)
186. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (dv é saída186) (1)

187. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (dv é saída187) (1)
188. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (dv é saída188) (1)
189. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (dv é saída189) (1)
190. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (dv é saída190) (1)
191. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (dv é saída191) (1)
192. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (dv é saída192) (1)
193. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (dv é saída193) (1)
194. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (dv é saída194) (1)
195. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (dv é saída195) (1)
196. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (dv é saída196) (1)
197. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (dv é saída197) (1)
198. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (dv é saída198) (1)
199. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (dv é saída199) (1)
200. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (dv é saída200) (1)
201. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (dv é saída201) (1)
202. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (dv é saída202) (1)
203. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (dv é saída203) (1)

204. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (dv é saída204) (1)
205. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (dv é saída205) (1)
206. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (dv é saída206) (1)
207. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (dv é saída207) (1)
208. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (dv é saída208) (1)
209. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (dv é saída209) (1)
210. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (dv é saída210) (1)
211. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (dv é saída211) (1)
212. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (dv é saída212) (1)
213. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (dv é saída213) (1)
214. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (dv é saída214) (1)
215. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (dv é saída215) (1)
216. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (dv é saída216) (1)
217. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (dv é saída217) (1)
218. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (dv é saída218) (1)
219. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (dv é saída219) (1)
220. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (dv é saída220) (1)

221. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (dv é saída221) (1)
222. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (dv é saída222) (1)
223. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (dv é saída223) (1)
224. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (dv é saída224) (1)
225. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (dv é saída225) (1)
226. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (dv é saída226) (1)
227. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (dv é saída227) (1)
228. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (dv é saída228) (1)
229. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (dv é saída229) (1)
230. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (dv é saída230) (1)
231. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (dv é saída231) (1)
232. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (dv é saída232) (1)
233. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (dv é saída233) (1)
234. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (dv é saída234) (1)
235. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (dv é saída235) (1)
236. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (dv é saída236) (1)
237. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (dv é saída237) (1)

238. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (dv é saída238) (1)
239. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (dv é saída239) (1)
240. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (dv é saída240) (1)
241. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (dv é saída241) (1)
242. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (dv é saída242) (1)
243. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (dv é saída243) (1)
244. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (dv é saída244) (1)
245. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (dv é saída245) (1)
246. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (dv é saída246) (1)
247. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (dv é saída247) (1)
248. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (dv é saída248) (1)
249. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (dv é saída249) (1)
250. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (dv é saída250) (1)
251. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (dv é saída251) (1)
252. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (dv é saída252) (1)
253. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (dv é saída253) (1)
254. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (dv é saída254) (1)

255. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (dv é saída255) (1)

256. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (dv é saída256) (1)

APÊNDICE B – REGRAS DE INFERÊNCIA FUZZY PARA DETERMINAÇÃO DE τ

1. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (th é saída1) (1)
2. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (th é saída2) (1)
3. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (th é saída3) (1)
4. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (th é saída4) (1)
5. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (th é saída5) (1)
6. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (th é saída6) (1)
7. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (th é saída7) (1)
8. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (th é saída8) (1)
9. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (th é saída9) (1)
10. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (th é saída10) (1)
11. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (th é saída11) (1)
12. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (th é saída12) (1)
13. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (th é saída13) (1)
14. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (th é saída14) (1)
15. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (th é saída15) (1)
16. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (th é saída16) (1)

17. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (th é saída17) (1)
18. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (th é saída18) (1)
19. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (th é saída19) (1)
20. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (th é saída20) (1)
21. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (th é saída21) (1)
22. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (th é saída22) (1)
23. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (th é saída23) (1)
24. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (th é saída24) (1)
25. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (th é saída25) (1)
26. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (th é saída26) (1)
27. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (th é saída27) (1)
28. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (th é saída28) (1)
29. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (th é saída29) (1)
30. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (th é saída30) (1)
31. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (th é saída31) (1)
32. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (th é saída32) (1)
33. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (th é saída33) (1)

34. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (th é saída34) (1)
35. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (th é saída35) (1)
36. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (th é saída36) (1)
37. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (th é saída37) (1)
38. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (th é saída38) (1)
39. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (th é saída39) (1)
40. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (th é saída40) (1)
41. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (th é saída41) (1)
42. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (th é saída42) (1)
43. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (th é saída43) (1)
44. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (th é saída44) (1)
45. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (th é saída45) (1)
46. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (th é saída46) (1)
47. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (th é saída47) (1)
48. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (th é saída48) (1)
49. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (th é saída49) (1)
50. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (th é saída50) (1)

51. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (th é saída51) (1)
52. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (th é saída52) (1)
53. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (th é saída53) (1)
54. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (th é saída54) (1)
55. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (th é saída55) (1)
56. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (th é saída56) (1)
57. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (th é saída57) (1)
58. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (th é saída58) (1)
59. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (th é saída59) (1)
60. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (th é saída60) (1)
61. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (th é saída61) (1)
62. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (th é saída62) (1)
63. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (th é saída63) (1)
64. Se (kn é Baixa) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (th é saída64) (1)
65. Se (kn é Baixa) e (t/a é Média) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (th é saída65) (1)
66. Se (kn é Baixa) e (t/a é Média) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (th é saída66) (1)
67. Se (kn é Baixa) e (t/a é Média) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (th é saída67) (1)

68. Se (kn é Baixa) e (t/a é Média) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (th é saída68) (1)
69. Se (kn é Baixa) e (t/a é Média) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (th é saída69) (1)
70. Se (kn é Baixa) e (t/a é Média) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (th é saída70) (1)
71. Se (kn é Baixa) e (t/a é Média) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (th é saída71) (1)
72. Se (kn é Baixa) e (t/a é Média) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (th é saída72) (1)
73. Se (kn é Baixa) e (t/a é Média) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (th é saída73) (1)
74. Se (kn é Baixa) e (t/a é Média) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (th é saída74) (1)
75. Se (kn é Baixa) e (t/a é Média) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (th é saída75) (1)
76. Se (kn é Baixa) e (t/a é Média) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (th é saída76) (1)
77. Se (kn é Baixa) e (t/a é Média) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (th é saída77) (1)
78. Se (kn é Baixa) e (t/a é Média) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (th é saída78) (1)
79. Se (kn é Baixa) e (t/a é Média) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (th é saída79) (1)
80. Se (kn é Baixa) e (t/a é Média) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (th é saída80) (1)
81. Se (kn é Baixa) e (t/a é Média) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (th é saída81) (1)
82. Se (kn é Baixa) e (t/a é Média) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (th é saída82) (1)
83. Se (kn é Baixa) e (t/a é Média) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (th é saída83) (1)
84. Se (kn é Baixa) e (t/a é Média) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (th é saída84) (1)

85. Se (kn é Baixa) e (t/a é Média) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (th é saída85) (1)
86. Se (kn é Baixa) e (t/a é Média) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (th é saída86) (1)
87. Se (kn é Baixa) e (t/a é Média) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (th é saída87) (1)
88. Se (kn é Baixa) e (t/a é Média) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (th é saída88) (1)
89. Se (kn é Baixa) e (t/a é Média) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (th é saída89) (1)
90. Se (kn é Baixa) e (t/a é Média) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (th é saída90) (1)
91. Se (kn é Baixa) e (t/a é Média) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (th é saída91) (1)
92. Se (kn é Baixa) e (t/a é Média) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (th é saída92) (1)
93. Se (kn é Baixa) e (t/a é Média) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (th é saída93) (1)
94. Se (kn é Baixa) e (t/a é Média) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (th é saída94) (1)
95. Se (kn é Baixa) e (t/a é Média) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (th é saída95) (1)
96. Se (kn é Baixa) e (t/a é Média) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (th é saída96) (1)
97. Se (kn é Baixa) e (t/a é Média) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (th é saída97) (1)
98. Se (kn é Baixa) e (t/a é Média) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (th é saída98) (1)
99. Se (kn é Baixa) e (t/a é Média) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (th é saída99) (1)
100. Se (kn é Baixa) e (t/a é Média) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (th é saída100) (1)
101. Se (kn é Baixa) e (t/a é Média) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (th é saída101) (1)

102. Se (kn é Baixa) e (t/a é Média) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (th é saída102) (1)
103. Se (kn é Baixa) e (t/a é Média) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (th é saída103) (1)
104. Se (kn é Baixa) e (t/a é Média) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (th é saída104) (1)
105. Se (kn é Baixa) e (t/a é Média) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (th é saída105) (1)
106. Se (kn é Baixa) e (t/a é Média) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (th é saída106) (1)
107. Se (kn é Baixa) e (t/a é Média) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (th é saída107) (1)
108. Se (kn é Baixa) e (t/a é Média) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (th é saída108) (1)
109. Se (kn é Baixa) e (t/a é Média) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (th é saída109) (1)
110. Se (kn é Baixa) e (t/a é Média) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (th é saída110) (1)
111. Se (kn é Baixa) e (t/a é Média) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (th é saída111) (1)
112. Se (kn é Baixa) e (t/a é Média) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (th é saída112) (1)
113. Se (kn é Baixa) e (t/a é Média) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (th é saída113) (1)
114. Se (kn é Baixa) e (t/a é Média) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (th é saída114) (1)
115. Se (kn é Baixa) e (t/a é Média) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (th é saída115) (1)
116. Se (kn é Baixa) e (t/a é Média) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (th é saída116) (1)
117. Se (kn é Baixa) e (t/a é Média) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (th é saída117) (1)
118. Se (kn é Baixa) e (t/a é Média) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (th é saída118) (1)

119. Se (kn é Baixa) e (t/a é Média) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (th é saída119) (1)
120. Se (kn é Baixa) e (t/a é Média) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (th é saída120) (1)
121. Se (kn é Baixa) e (t/a é Média) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (th é saída121) (1)
122. Se (kn é Baixa) e (t/a é Média) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (th é saída122) (1)
123. Se (kn é Baixa) e (t/a é Média) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (th é saída123) (1)
124. Se (kn é Baixa) e (t/a é Média) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (th é saída124) (1)
125. Se (kn é Baixa) e (t/a é Média) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (th é saída125) (1)
126. Se (kn é Baixa) e (t/a é Média) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (th é saída126) (1)
127. Se (kn é Baixa) e (t/a é Média) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (th é saída127) (1)
128. Se (kn é Baixa) e (t/a é Média) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (th é saída128) (1)
129. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (th é saída129) (1)
130. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (th é saída130) (1)
131. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (th é saída131) (1)
132. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (th é saída132) (1)
133. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (th é saída133) (1)
134. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (th é saída134) (1)
135. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (th é saída135) (1)

136. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (th é saída136) (1)
137. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (th é saída137) (1)
138. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (th é saída138) (1)
139. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (th é saída139) (1)
140. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (th é saída140) (1)
141. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (th é saída141) (1)
142. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (th é saída142) (1)
143. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (th é saída143) (1)
144. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (th é saída144) (1)
145. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (th é saída145) (1)
146. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (th é saída146) (1)
147. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (th é saída147) (1)
148. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (th é saída148) (1)
149. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (th é saída149) (1)
150. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (th é saída150) (1)
151. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (th é saída151) (1)
152. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (th é saída152) (1)

153. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (th é saída153) (1)
154. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (th é saída154) (1)
155. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (th é saída155) (1)
156. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (th é saída156) (1)
157. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (th é saída157) (1)
158. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (th é saída158) (1)
159. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (th é saída159) (1)
160. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (th é saída160) (1)
161. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (th é saída161) (1)
162. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (th é saída162) (1)
163. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (th é saída163) (1)
164. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (th é saída164) (1)
165. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (th é saída165) (1)
166. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (th é saída166) (1)
167. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (th é saída167) (1)
168. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (th é saída168) (1)
169. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (th é saída169) (1)

170. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (th é saída170) (1)
171. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (th é saída171) (1)
172. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (th é saída172) (1)
173. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (th é saída173) (1)
174. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (th é saída174) (1)
175. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (th é saída175) (1)
176. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (th é saída176) (1)
177. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (th é saída177) (1)
178. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (th é saída178) (1)
179. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (th é saída179) (1)
180. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (th é saída180) (1)
181. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (th é saída181) (1)
182. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (th é saída182) (1)
183. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (th é saída183) (1)
184. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (th é saída184) (1)
185. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (th é saída185) (1)
186. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (th é saída186) (1)

187. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (th é saída187) (1)
188. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (th é saída188) (1)
189. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (th é saída189) (1)
190. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (th é saída190) (1)
191. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (th é saída191) (1)
192. Se (kn é Baixa) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (th é saída192) (1)
193. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (th é saída193) (1)
194. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (th é saída194) (1)
195. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (th é saída195) (1)
196. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (th é saída196) (1)
197. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (th é saída197) (1)
198. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (th é saída198) (1)
199. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (th é saída199) (1)
200. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (th é saída200) (1)
201. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (th é saída201) (1)
202. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (th é saída202) (1)
203. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (th é saída203) (1)

204. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (th é saída204) (1)
205. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (th é saída205) (1)
206. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (th é saída206) (1)
207. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (th é saída207) (1)
208. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (th é saída208) (1)
209. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (th é saída209) (1)
210. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (th é saída210) (1)
211. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (th é saída211) (1)
212. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (th é saída212) (1)
213. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (th é saída213) (1)
214. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (th é saída214) (1)
215. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (th é saída215) (1)
216. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (th é saída216) (1)
217. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (th é saída217) (1)
218. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (th é saída218) (1)
219. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (th é saída219) (1)
220. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (th é saída220) (1)

221. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (th é saída221) (1)
222. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (th é saída222) (1)
223. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (th é saída223) (1)
224. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (th é saída224) (1)
225. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (th é saída225) (1)
226. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (th é saída226) (1)
227. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (th é saída227) (1)
228. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (th é saída228) (1)
229. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (th é saída229) (1)
230. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (th é saída230) (1)
231. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (th é saída231) (1)
232. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (th é saída232) (1)
233. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (th é saída233) (1)
234. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (th é saída234) (1)
235. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (th é saída235) (1)
236. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (th é saída236) (1)
237. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (th é saída237) (1)

238. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (th é saída238) (1)
239. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (th é saída239) (1)
240. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (th é saída240) (1)
241. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (th é saída241) (1)
242. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (th é saída242) (1)
243. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (th é saída243) (1)
244. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (th é saída244) (1)
245. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (th é saída245) (1)
246. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (th é saída246) (1)
247. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (th é saída247) (1)
248. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (th é saída248) (1)
249. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (th é saída249) (1)
250. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (th é saída250) (1)
251. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (th é saída251) (1)
252. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (th é saída252) (1)
253. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (th é saída253) (1)
254. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (th é saída254) (1)

255. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (th é saída255) (1)
256. Se (kn é Alta) e (t/a é Baixa) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (th é saída256) (1)
257. Se (kn é Alta) e (t/a é Média) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (th é saída257) (1)
258. Se (kn é Alta) e (t/a é Média) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (th é saída258) (1)
259. Se (kn é Alta) e (t/a é Média) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (th é saída259) (1)
260. Se (kn é Alta) e (t/a é Média) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (th é saída260) (1)
261. Se (kn é Alta) e (t/a é Média) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (th é saída261) (1)
262. Se (kn é Alta) e (t/a é Média) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (th é saída262) (1)
263. Se (kn é Alta) e (t/a é Média) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (th é saída263) (1)
264. Se (kn é Alta) e (t/a é Média) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (th é saída264) (1)
265. Se (kn é Alta) e (t/a é Média) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (th é saída265) (1)
266. Se (kn é Alta) e (t/a é Média) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (th é saída266) (1)
267. Se (kn é Alta) e (t/a é Média) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (th é saída267) (1)
268. Se (kn é Alta) e (t/a é Média) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (th é saída268) (1)
269. Se (kn é Alta) e (t/a é Média) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (th é saída269) (1)
270. Se (kn é Alta) e (t/a é Média) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (th é saída270) (1)
271. Se (kn é Alta) e (t/a é Média) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (th é saída271) (1)

272. Se (kn é Alta) e (t/a é Média) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (th é saída272) (1)
273. Se (kn é Alta) e (t/a é Média) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (th é saída273) (1)
274. Se (kn é Alta) e (t/a é Média) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (th é saída274) (1)
275. Se (kn é Alta) e (t/a é Média) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (th é saída275) (1)
276. Se (kn é Alta) e (t/a é Média) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (th é saída276) (1)
277. Se (kn é Alta) e (t/a é Média) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (th é saída277) (1)
278. Se (kn é Alta) e (t/a é Média) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (th é saída278) (1)
279. Se (kn é Alta) e (t/a é Média) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (th é saída279) (1)
280. Se (kn é Alta) e (t/a é Média) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (th é saída280) (1)
281. Se (kn é Alta) e (t/a é Média) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (th é saída281) (1)
282. Se (kn é Alta) e (t/a é Média) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (th é saída282) (1)
283. Se (kn é Alta) e (t/a é Média) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (th é saída283) (1)
284. Se (kn é Alta) e (t/a é Média) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (th é saída284) (1)
285. Se (kn é Alta) e (t/a é Média) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (th é saída285) (1)
286. Se (kn é Alta) e (t/a é Média) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (th é saída286) (1)
287. Se (kn é Alta) e (t/a é Média) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (th é saída287) (1)
288. Se (kn é Alta) e (t/a é Média) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (th é saída288) (1)

289. Se (kn é Alta) e (t/a é Média) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (th é saída289) (1)
290. Se (kn é Alta) e (t/a é Média) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (th é saída290) (1)
291. Se (kn é Alta) e (t/a é Média) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (th é saída291) (1)
292. Se (kn é Alta) e (t/a é Média) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (th é saída292) (1)
293. Se (kn é Alta) e (t/a é Média) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (th é saída293) (1)
294. Se (kn é Alta) e (t/a é Média) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (th é saída294) (1)
295. Se (kn é Alta) e (t/a é Média) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (th é saída295) (1)
296. Se (kn é Alta) e (t/a é Média) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (th é saída296) (1)
297. Se (kn é Alta) e (t/a é Média) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (th é saída297) (1)
298. Se (kn é Alta) e (t/a é Média) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (th é saída298) (1)
299. Se (kn é Alta) e (t/a é Média) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (th é saída299) (1)
300. Se (kn é Alta) e (t/a é Média) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (th é saída300) (1)
301. Se (kn é Alta) e (t/a é Média) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (th é saída301) (1)
302. Se (kn é Alta) e (t/a é Média) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (th é saída302) (1)
303. Se (kn é Alta) e (t/a é Média) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (th é saída303) (1)
304. Se (kn é Alta) e (t/a é Média) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (th é saída304) (1)
305. Se (kn é Alta) e (t/a é Média) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (th é saída305) (1)

306. Se (kn é Alta) e (t/a é Média) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (th é saída306) (1)
307. Se (kn é Alta) e (t/a é Média) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (th é saída307) (1)
308. Se (kn é Alta) e (t/a é Média) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (th é saída308) (1)
309. Se (kn é Alta) e (t/a é Média) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (th é saída309) (1)
310. Se (kn é Alta) e (t/a é Média) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (th é saída310) (1)
311. Se (kn é Alta) e (t/a é Média) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (th é saída311) (1)
312. Se (kn é Alta) e (t/a é Média) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (th é saída312) (1)
313. Se (kn é Alta) e (t/a é Média) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (th é saída313) (1)
314. Se (kn é Alta) e (t/a é Média) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (th é saída314) (1)
315. Se (kn é Alta) e (t/a é Média) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (th é saída315) (1)
316. Se (kn é Alta) e (t/a é Média) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (th é saída316) (1)
317. Se (kn é Alta) e (t/a é Média) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (th é saída317) (1)
318. Se (kn é Alta) e (t/a é Média) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (th é saída318) (1)
319. Se (kn é Alta) e (t/a é Média) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (th é saída319) (1)
320. Se (kn é Alta) e (t/a é Média) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (th é saída320) (1)
321. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (th é saída321) (1)
322. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (th é saída322) (1)

323. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (th é saída323) (1)
324. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (th é saída324) (1)
325. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (th é saída325) (1)
326. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (th é saída326) (1)
327. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (th é saída327) (1)
328. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (th é saída328) (1)
329. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (th é saída329) (1)
330. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (th é saída330) (1)
331. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (th é saída331) (1)
332. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (th é saída332) (1)
333. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (th é saída333) (1)
334. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (th é saída334) (1)
335. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (th é saída335) (1)
336. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (th é saída336) (1)
337. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (th é saída337) (1)
338. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (th é saída338) (1)
339. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (th é saída339) (1)

340. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (th é saída340) (1)
341. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (th é saída341) (1)
342. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (th é saída342) (1)
343. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (th é saída343) (1)
344. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (th é saída344) (1)
345. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (th é saída345) (1)
346. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (th é saída346) (1)
347. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (th é saída347) (1)
348. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (th é saída348) (1)
349. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (th é saída349) (1)
350. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (th é saída350) (1)
351. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (th é saída351) (1)
352. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Baixa) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (th é saída352) (1)
353. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (th é saída353) (1)
354. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (th é saída354) (1)
355. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (th é saída355) (1)
356. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (th é saída356) (1)

357. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (th é saída357) (1)
358. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (th é saída358) (1)
359. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (th é saída359) (1)
360. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (th é saída360) (1)
361. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (th é saída361) (1)
362. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (th é saída362) (1)
363. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (th é saída363) (1)
364. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (th é saída364) (1)
365. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (th é saída365) (1)
366. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (th é saída366) (1)
367. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (th é saída367) (1)
368. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Baixo) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (th é saída368) (1)
369. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (th é saída369) (1)
370. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (th é saída370) (1)
371. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (th é saída371) (1)
372. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (th é saída372) (1)
373. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (th é saída373) (1)

374. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (th é saída374) (1)
375. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (th é saída375) (1)
376. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Baixa) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (th é saída376) (1)
377. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (th é saída377) (1)
378. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (th é saída378) (1)
379. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (th é saída379) (1)
380. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Baixo) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (th é saída380) (1)
381. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Baixo) então (th é saída381) (1)
382. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Baixo) e (dh é Alto) então (th é saída382) (1)
383. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Baixo) então (th é saída383) (1)
384. Se (kn é Alta) e (t/a é Alta) e (sn0 é Alta) e (JRC é Alto) e (sc é Alta) e (fb é Alto) e (ffill é Alto) e (dh é Alto) então (th é saída384) (1)