



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo

RODRIGO GIANINI MANONE

**ANÁLISE NUMÉRICA DA ESTABILIDADE DE
ISOLADORES SÍSMICOS DE PONTES**

CAMPINAS
2022

RODRIGO GIANINI MAMONE

**ANÁLISE NUMÉRICA DA ESTABILIDADE DE
ISOLADORES SÍSMICOS DE PONTES**

Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, na área de Estruturas e Geotécnica.

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Henrique Siqueira

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELO ALUNO RODRIGO GIANINI MAMONE E ORIENTADO PELO PROF. DR. GUSTAVO HENRIQUE SIQUEIRA.

ASSINATURA DO ORIENTADOR

CAMPINAS

2022

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

M311a Mamone, Rodrigo Gianini, 1995-
Análise numérica da estabilidade de isoladores sísmicos de pontes /
Rodrigo Gianini Mamone. – Campinas, SP : [s.n.], 2022.

Orientador: Gustavo Henrique Siqueira.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade
de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo.

1. Elastômeros. 2. Método dos elementos finitos. 3. Estabilidade
estrutural. 4. Pontes. I. Siqueira, Gustavo Henrique, 1980-. II. Universidade
Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e
Urbanismo. III. Título.

Informações Complementares

Título em outro idioma: Numerical analysis of the stability of seismic isolation bearings in bridges

Palavras-chave em inglês:

Elastomers

Finite element method

Structural stability

Bridges

Área de concentração: Estruturas e Geotécnica

Titulação: Mestre em Engenharia Civil

Banca examinadora:

Gustavo Henrique Siqueira [Orientador]

Saulo José de Castro Almeida

Eduardo Toledo de Lima Junior

Data de defesa: 19-12-2022

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Civil

Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a)
- ORCID do autor: <https://orcid.org/0009-0008-3478-4012>
- Currículo Lattes do autor: <http://lattes.cnpq.br/2916095860708401>

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E
URBANISMO

ANÁLISE NUMÉRICA DA ESTABILIDADE DE
ISOLADORES SÍSMICOS DE PONTES

Rodrigo Gianini Mamone

Dissertação de Mestrado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:

Prof. Dr. Gustavo Henrique Siqueira

Presidente e Orientador/UNICAMP

Prof. Dr. Saulo Joé de Castro Almeida

UNICAMP

Prof. Dr. Eduardo Toledo de Lima Junior

UFAL

A Ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no SIGA/Sistema de Fluxo de Dissertação/Tese e na Secretaria do Programa da Unidade.

Campinas, 19 de dezembro de 2022

AGRADECIMENTOS

Aos professores e amigos Gustavo e Luiz, aos quais é difícil de encontrar palavras que descrevam minha gratidão, mas que vela a tentativa. Agradeço a amizade, o companheirismo e a confiança, jamais teria conseguido terminar esse trabalho se não fosse por vocês. Mesmo mais distantes fisicamente, há um espaço especial destinado a vocês no meu coração.

À UNICAMP, agradeço por todas as oportunidades e conhecimentos fornecidos desde o período da graduação.

Aos meus colegas da Progescon, principalmente aos meus amigos Claudius e Rodrigo, agradeço o apoio, compreensão e ajuda durante todas as etapas, que não foram poucas, desse processo.

Aos meus amigos do “pensionatro”, agradeço a amizade que esse ano completa uma década e só posso dizer uma coisa: agora eu sou o “mestrevara” e prometo que me esforçarei para ser um cara maduro, mas não depositem tanta confiança.

Aos meus amigos da República MeGusta, na qual com certeza passei os melhores dias da minha vida, agradeço por todos os dias e momentos inesquecíveis, agradeço por terem mudado a minha vida, agradeço por aguentarem todas as minhas piadas e por último, agradeço por termos formado uma família.

À minha namorada Angélica, agradeço o cafuné para dormir, o balanço da rede, a chance de uma em um milhão, cada passo juntos e o nadar sem se afogar. Agradeço a paciência com o meu jeitinho, a preocupação em dar o melhor de si e por ser a pessoa que eu sempre posso ligar, é você que eu amo.

Aos meus pais Paula e Roberto e ao meu irmão Gustavo, agradeço o amor eterno e inextinguível, o carinho imensurável e a amizade mais sincera e eterna de todas. Vocês são a razão de tudo isso, amo vocês.

RESUMO

Em regiões sujeitas a sismos, é comum a utilização de isoladores sísmicos em apoios de pontes para proteção da superestrutura. Dentre esses isoladores, os elastoméricos são um dos tipos mais utilizados, sendo compostos por camadas vulcanizadas de borrachas com chapas de aço entrepostas. Dessa forma, esses elementos possibilitam deslocamentos laterais devido à baixa rigidez lateral da borracha e elevada resistência axial devido à presença das chapas de aço. Assim, a utilização de isoladores é essencial para evitar a ruptura da superestrutura de pontes em caso de sismos. A literatura registra a realização de diversos estudos numéricos e experimentais a respeito desses isoladores, principalmente acerca de sua estabilidade. De acordo com resultados experimentais, a perda de estabilidade é um dos estados limites dos isoladores, portanto, a sua compreensão é essencial, de modo que as pesquisas realizadas buscaram, em geral, estimar os limites de estabilidade a partir de parâmetros dos isoladores, dentre os quais destacam-se o fator de forma e a esbeltez. Esses estudos, porém, não contemplaram a análise das deformações e tensões atuantes nas camadas internas dos isoladores, principalmente nas chapas de aço, e estudos paramétricos, de forma que nesse trabalho serão realizadas essas análises, utilizando-se modelos numéricos em elementos finitos. Dessa forma, nesse trabalho foi elaborado um modelo numérico desses isoladores, o qual foi calibrado a partir de resultados experimentais. A partir do modelo calibrado foi elaborado um espaço amostral, a partir do qual foram avaliados os tipos de ruptura dos isoladores, a influência dos seus principais parâmetros e, por fim, foram determinados estados limites intermediários para esses isoladores, a partir das tensões internas atuantes.

Palavras chave: Isoladores sísmicos, estabilidade lateral, método dos elementos finitos, estados limites

ABSTRACT

In regions subject to earthquakes, it is common to use seismic isolators on bridge supports to protect the superstructure. Among these isolators, elastomeric ones are one of the most used types, composed of vulcanized layers of rubber with interposed steel plates. Thus, these elements allow lateral displacements due to the low lateral stiffness of the rubber and high axial stiffness due to the presence of the reinforcement steel plates. Therefore, the application of seismic isolators is essential to prevent the rupture of the superstructure of bridges during an earthquake. Several numerical and experimental studies were carried out regarding these isolators, mainly regarding their stability. The loss of stability is one of the limit states of isolators, therefore, its understanding is essential, so the research carried out sought, in general, to estimate the stability limits from isolators parameters, among which stand out the form factor and slenderness. These studies, however, did not include the analysis of deformations and stresses acting on the inner layers of the isolators, mainly on the steel plates, and parametric studies with a large sample space, so in this research, these analyses will be carried out using numerical simulations in finite element models. Thus, in this study, a numerical model of these isolators was elaborated, which is calibrated from experimental results. From the calibrated model, a sample space is elaborated, from which the types of rupture of the isolators are evaluated, the influence of their main parameters from a parametric analysis, and finally, intermediate limit states are determined for these isolators, from the internal stresses acting.

Key words: Seismic isolators, lateral stability, finite element method, limit states.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Modelo de isolador sísmico composto por borracha e chapas de aço.....	14
Figura 2 – Modelo de curva de estabilidade de isoladores sísmicos.	21
Figura 3 – Área reduzida dos isoladores.	22
Figura 4 – Comportamento da borracha quando submetida à compressão.	23
Figura 5 – Efeito do <i>scragging</i> na borracha.....	25
Figura 6 – Efeito de Mullins na borracha	26
Figura 7 – Curva histerética bilinear da borracha.....	27
Figura 8 – Comportamento das tensões de cisalhamento na borracha quando submetida à compressão.	30
Figura 9 – Comportamento das tensões de cisalhamento na borracha quando submetida a um deslocamento lateral.	31
Figura 10 – Tensões de cisalhamento atuantes.....	31
Figura 11 – Modelo elaborado para calibragem.....	35
Figura 12 – Condições de contorno do modelo.....	35
Figura 13 – Modelo constitutivo do aço.....	37
Figura 14 – Resultado obtido do método direto.	38
Figura 15 – Resultados obtidos do CDM.	39
Figura 16 – Aplicação da carga axial e deslocamento no modelo.	40
Figura 17 – Comportamento ao cisalhamento com compressão do isolador analisado.	40
Figura 18 – Curva de estabilidade do isolador.	41
Figura 19 – Determinação da ruptura por cisalhamento no modelo numérico.....	46
Figura 20 – Rompimento por cisalhamento de corpo de prova.....	46
Figura 21 – .Comportamento da borracha na borda do isolador.....	49
Figura 22 – .Malha de elementos finitos para as camadas de borracha.....	50
Figura 23 – .Comportamento da camada de borracha na borda do modelo.....	50
Figura 24 – .Comportamento do isolador durante ensaio experimental.....	51

Figura 25 – .Comportamento do isolador no modelo numérico.	51
Figura 26 – .Comportamento ao cisalhamento para compressão de 5,0 MPa.	52
Figura 27 – . Comportamento ao cisalhamento para compressão de 7,5 MPa.	52
Figura 28 – . Curvas de estabilidade do isolador.	53
Figura 29 – . Tipos de ruptura dos modelos.	54
Figura 30 – Influência do fator de forma.	57
Figura 31 – Influência da esbeltez.	59
Figura 32 – Influência da espessura das chapas de aço.....	61
Figura 33 – Influência da tensão de escoamento das chapas de aço.	65
Figura 34 – Apresentação dos estados limites para diferentes modelos.	71
Figura 35 – Influência do fator de forma.	72
Figura 36 – Influência da esbeltez.	74
Figura 37 – Influência da espessura das chapas de aço.....	77
Figura 38 – Influência da tensão de escoamento das chapas de aço.	81
Figura 39 – Influência do fator de forma.	87
Figura 40 – Influência da esbeltez.	89
Figura 41 – Influência da espessura das chapas de aço.....	91
Figura 42 – Influência da tensão de escoamento das chapas de aço.	95
Figura 43 – Ábacos de definição dos estados limites para diferentes valores de esbeltez.	101

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Fator de modificação da borracha.....	24
Tabela 2 – Parâmetros da borracha para o modelo hiperelástico de Ogden.....	36
Tabela 3 – Valores de carga e deslocamentos horizontais considerados.....	41
Tabela 4 – Valores limites dos parâmetros analisados.....	42
Tabela 5 – Espaço amostral da análise paramétrica.....	42
Tabela 6 – Médias e desvios padrões das diferenças entre fatores de forma.....	69
Tabela 7 – Médias e desvios padrões das diferenças entre esbeltez.....	69
Tabela 8 – Médias e desvios padrões das diferenças entre espessura das chapas de aço.....	69
Tabela 9 – Médias e desvios padrões das diferenças entre tensão de escoamento das chapas de aço.....	69
Tabela 10 – Médias e desvios padrões das diferenças entre fator de forma.....	85
Tabela 11 – Médias e desvios padrões das diferenças entre esbeltez.....	85
Tabela 12 – Médias e desvios padrões das diferenças entre espessura do aço.....	85
Tabela 13 – Médias e desvios padrões das diferenças entre escoamento do aço.....	86
Tabela 14 – Médias e desvios padrões das diferenças entre fator de forma.....	99
Tabela 15 – Médias e desvios padrões das diferenças entre fator de esbeltez.....	99
Tabela 16 – Médias e desvios padrões das diferenças entre espessura do aço.....	99
Tabela 17 – Médias e desvios padrões das diferenças entre escoamento do aço.....	100

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
1.1. CONTEXTO.....	14
1.2. JUSTIFICATIVA	15
1.3. OBJETIVOS	16
1.3.1. OBJETIVO GERAL	16
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
1.4. ESTRUTURA DO TRABALHO	17
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1. DESENVOLVIMENTO HISTÓRICO	18
2.2. ESTABILIDADE DE ISOLADORES SÍSMICOS.....	20
2.3. COMPORTAMENTO MECÂNICO DA BORRACHA	22
2.3.1. COMPRESSÃO.....	22
2.3.2. CISALHAMENTO.....	24
2.3.3. EFEITO DE MULLINS, SCRAPING E CRISTALIZAÇÃO	25
2.3.4. COMPORTAMENTO HISTERÉTICO DA BORRACHA.....	27
2.3.5. NORMAS E DIMENSIONAMENTO	27
2.3.6. COMPORTAMENTO DA BORRACHA NOS ISOLADORES QUANDO SUBMETIDOS À COMPRESSÃO E DESLOCAMENTO LATERAL.....	30
2.4. RESUMO DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	32
3. METODOLOGIA.....	33
3.1. MODELAGEM NUMÉRICA	33
3.1.1. GEOMETRIA DO MODELO	33
3.1.2. MODELO CONSTITUTIVO DA BORRACHA	35
3.1.3. MODELO CONSTITUTIVO DO AÇO	37
3.1.4. CARGAS E DESLOCAMENTOS APLICADOS.....	37
3.2. PARÂMETROS UTILIZADOS PARA CALIBRAÇÃO DO MODELO.....	40
3.3. CONSIDERAÇÕES A RESPEITO DA ANÁLISE PARAMÉTRICA	41

3.4. ELABORAÇÃO E PROCESSAMENTO DOS MODELOS DO ESPAÇO AMOSTRAL.....	44
3.5. EXTRAÇÃO DOS RESULTADOS DE RUPTURA POR INSTABILIDADE E CISALHAMENTO DOS ISOLADORES	45
3.6. EXTRAÇÃO DOS RESULTADOS DE ESTADOS LIMITE INTERMEDIÁRIOS.....	46
3.7. ANÁLISE PARAMÉTRICA DO ESPAÇO AMOSTRAL.....	47
3.8. COMPARAÇÃO ENTRE OS ESTADOS LIMITES E DEFINIÇÃO DE CURVAS PARA DISTINÇÃO ENTRE ELES.	48
4. RESULTADOS.....	49
4.1. RESULTADOS DE CALIBRAÇÃO DO MODELO.....	49
4.2. AVALIAÇÃO DOS TIPOS DE RUPTURA PARA O ESTADO LIMITE COMPLETO 53	
4.3. ANÁLISE PARAMÉTRICA: ESTADO LIMITE COMPLETO	56
4.3.1. INFLUÊNCIA DO FATOR DE FORMA.....	57
4.3.2. Influência da esbeltez.....	59
4.3.3. INFLUÊNCIA DA ESPESSURA DAS CHAPAS DE AÇO	61
4.3.4. INFLUÊNCIA DA TENSÃO DE ESCOAMENTO DAS CHAPAS DE AÇO	65
4.3.5. AVALIAÇÃO DA ANÁLISE PARAMÉTRICA.....	68
4.4. ESTADOS LIMITES INTERMEDIÁRIOS.....	70
4.4.1. Influência do fator de forma – EL Moderado.....	72
4.4.2. INFLUÊNCIA DA ESBELTEZ - EL MODERADO.....	74
4.4.3. Influência da espessura das chapas de aço – EL Moderado.....	76
4.4.4. INFLUÊNCIA DA TENSÃO DE ESCOAMENTO DAS CHAPAS DE AÇO – EL MODERADO	81
4.4.5. AVALIAÇÃO DA ANÁLISE PARAMÉTRICA – EL MODERADO	85
4.4.6. Influência do fator de forma – EL Leve	87
4.4.7. Influência da esbeltez – EL Leve	89
4.4.8. INFLUÊNCIA DA ESPESSURA DAS CHAPAS DE AÇO – EL LEVE.....	91
4.4.9. INFLUÊNCIA DA TENSÃO DE ESCOAMENTO DAS CHAPAS DE AÇO – EL LEVE 95	
4.4.10. AVALIAÇÃO DA ANÁLISE PARAMÉTRICA – EL LEVE	99

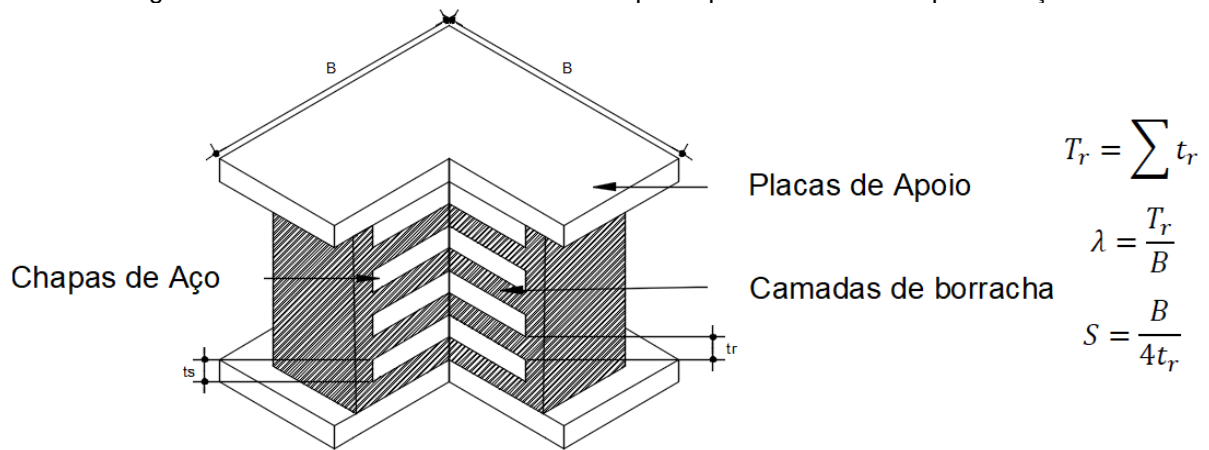
4.5. ÁBACOS DE DEFINIÇÃO DOS ESTADOS LIMITES	100
5. CONCLUSÃO.....	104
6. TRABALHOS FUTUROS	107
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	108

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONTEXTO

Em regiões sujeitas a sismos, é comum a utilização de isoladores sísmicos em apoios de pontes para proteção da superestrutura. Dentre esses isoladores, os elastoméricos são um dos tipos mais utilizados, sendo estes compostos por camadas vulcanizadas de borrachas com chapas de aço entrepostas (Figura 1), assim esses elementos possibilitam deslocamentos laterais devido à baixa rigidez lateral da borracha e elevada resistência axial devido à presença das chapas de aço.

Figura 1 – Modelo de isolador sísmico composto por borracha e chapas de aço.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Devido à essas características mecânicas, os isoladores sísmicos são ideais para a utilização em pontes sujeitas a sismos, visto que eles possuem capacidade de resistir às cargas axiais atuantes e de reduzir os esforços laterais transmitidos à superestrutura no caso de sismos, contribuindo com a sua resistência à sismos.

Nos últimos anos, diversos estudos experimentais e numéricos foram realizados sobre esses aparelhos de apoio. Nesses estudos, foram observados dois principais estados limites para esses elementos: a) Estado limite de ruptura por cisalhamento e b) Estado limite de perda de estabilidade lateral.

O primeiro ocorre devido à ruptura por cisalhamento das camadas de borracha quando submetidas a elevados deslocamentos laterais e o segundo devido

à perda da rigidez lateral dos apoios quando submetidos a uma combinação crítica de forças axiais e deslocamentos laterais.

Desses estados limites, o mais estudado é o de perda de estabilidade lateral, visto que o seu estudo permite o dimensionamento de isoladores mais esbeltos e, conseqüentemente, mais viáveis economicamente. Assim, uma grande quantidade de estudos foi conduzida para análise de estabilidade desses isoladores.

Esses estudos buscaram determinar em análises experimentais e numéricas os estados limites de perda de estabilidade para diferentes formas de isoladores sísmicos, buscando, com os resultados obtidos, estimar esses limites a partir de parâmetros dos elementos. Os principais parâmetros levados em conta nessas análises foram o fator de forma (S) e a esbeltez (λ) dos isoladores. A esbeltez de um isolador é dada pela razão entre a altura total das suas camadas de borracha (T_R) e a medida da sua menor largura, enquanto o fator de forma é dado pela razão entre a área carregada e a área lateral livre de uma camada única de borracha do isolador.

É importante destacar a diferença entre isoladores sísmicos e aparelhos de apoio. Em geral, os aparelhos de apoio apresentam fator de forma máximo de 8 e esbeltez máxima de 0,35, enquanto os isoladores sísmicos apresentam valores maiores. Além disso, os aparelhos de apoio, não são conectados à estrutura por meio de placas de base, como ocorre com os isoladores, em que há essa placa para engastamento, como apresentado na Figura 1.

1.2. JUSTIFICATIVA

Embora muitos estudos, tanto experimentais quanto numéricos, tenham sido realizados acerca da estabilidade lateral dos isoladores sísmicos de pontes, esses estudos não contemplaram os seguintes aspectos:

- a) Estudo das deformações e tensões internas atuantes nos isoladores, possibilitando-se assim a determinação de estados limites intermediários para os isoladores;
- b) Estudo paramétrico em larga escala dos isoladores, contemplando a variação do fator de forma dos isoladores (S), da sua esbeltez (λ)

e da classe de resistência das chapas de aço utilizadas, parâmetro este que é raramente levado em consideração.

Dessa forma, é realizado um estudo numérico dos isoladores sísmicos utilizando-se o Método dos Elementos Finitos (MEF), a fim de se avaliar as tensões e deformações internas nesses elementos até que seja atingido seu limite de estabilidade, abrindo-se assim a possibilidade de determinação de estados limites intermediários. Esses estados limites intermediários visam determinar patamares de carga e deslocamento atuantes nos isoladores que, embora, não levem estes à ruptura, afetem o seu comportamento em serviço.

Além disso, será realizado um estudo paramétrico em larga escala avaliando-se a influência dos fatores citados no limite de estabilidade dos isoladores.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. OBJETIVO GERAL

Tem-se como objetivo geral deste trabalho a análise numérica da estabilidade de isoladores sísmicos e a determinação de estados limites intermediários, avaliando-se seus esforços internos e a influência de diferentes parâmetros no seu limite de estabilidade.

Para isso será calibrado um modelo dos isoladores sísmicos a partir de resultados experimentais utilizando o software ABAQUS, sendo então elaborada uma grande quantidade de modelos com variação paramétrica do fator de forma (S), do índice de esbeltez (λ) e da classe de resistência (f_y) e espessura das chapas de aço (t_s) dos isoladores.

1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos desse trabalho são:

- a) Calibração de modelo numérico a partir de resultados experimentais;
- b) Estudo paramétrico para avaliação da influência do fator de forma (S), do índice de esbeltez (λ) e da classe de resistência das chapas

de aço dos isoladores nos seus estados limites de perda de estabilidade e ruptura por cisalhamento.

- c) Determinação de estados limites intermediários dos isoladores a partir da análise dos esforços internos atuantes;

1.4. ESTRUTURA DO TRABALHO

Para apresentação do trabalho desenvolvido, o texto foi dividido em cinco capítulos.

No Capítulo 2, é apresentada a revisão bibliográfica realizada. Apresenta-se um breve desenvolvimento histórico dos isoladores elastoméricos e os principais aspectos relativos à estabilidade destes e ao comportamento mecânico da borracha, isoladamente e nos isoladores. São também apresentadas algumas normas de dimensionamento de aparelhos de apoio, como base para as análises

No Capítulo 3, é apresentada a metodologia do trabalho. São descritos os principais aspectos da modelagem realizada em elementos finitos, dentre os quais estão a geometria do modelo, a malha utilizada e o modelo constitutivo dos materiais. Além disso, são apresentados os parâmetros utilizados para calibração do modelo com base nos ensaios experimentais realizados nos trabalhos de referência. É então apresentada a metodologia elaborada para realização da análise paramétrica dos limites de ruptura dos isoladores e da análise dos esforços atuantes nas camadas internas dos isoladores para determinação de estados limites intermediários.

No Capítulo 4, são apresentados os resultados obtidos. Estes resultados consistem inicialmente nos obtidos para calibração do modelo e na análise do refinamento e convergência da malha. Posteriormente, são apresentados os resultados da avaliação paramétrica dos fatores de influência dos isoladores e, em seguida, os resultados para determinação dos estados limites intermediários. Por fim, são elaboradas curvas de estado limite com base na esbeltez dos isoladores.

Por fim, no Capítulo 5, são apresentadas as conclusões a respeito do trabalho desenvolvido e sugestões para pesquisas futuras.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, são apresentadas as principais revisões bibliográficas realizadas durante o desenvolvimento do trabalho.

2.1. DESENVOLVIMENTO HISTÓRICO

De acordo com Kelly e Takhirov (2007), o estudo e aplicação dos isoladores compostos de aço e borracha datam do começo da década de 1950, sendo os primeiros estudos acerca do tema realizados por Haringx (1948, 1949a, 1949b), admitindo-se a linearidade da borracha e a ocorrência de pequenos deslocamentos laterais.

A utilização desses isoladores em pontes e edifícios passou a ser comum no começo da década de 1990, época em que passaram a ser realizados estudos em maior escala. Esses estudos focaram na ruptura por cisalhamento em elevadas deformações, chegando a 600%, como apresentado por Kelly (1991).

A partir dos anos 2000, os estudos passaram a focar na estabilidade lateral dos isoladores. Nesses estudos, como apresentado por Buckle *et al.* (2002) e por Siqueira *et al.* (2014), foram determinadas curvas de estabilidade, relacionando o máximo deslocamento lateral possível para diferentes valores de carga axial aplicadas sobre os isoladores.

Nos estudos realizados, foram determinadas diversas curvas de estabilidade variando-se o fator de forma (S) dos isoladores, observando-se o impacto da alteração desse parâmetro no comportamento dos apoios.

Gauron *et al.* (2018) realizaram estudo similar, porém considerando também a influência da esbeltez (λ) dos isoladores, realizando um estudo paramétrico variando a esbeltez e o fator de forma de isoladores em escala real e escala reduzida. Nesse estudo foi observado que a esbeltez tem até maior influência do que o fator de forma no comportamento dos isoladores.

Ainda nesse estudo, os autores buscaram determinar estados limites intermediários, entretanto, a maioria dos apoios estudados não apresentou quaisquer danos aparentes até a sua ruptura, o que impossibilitou essa análise.

Quanto aos estudos numéricos, Toopchi-Nezhad *et al.* (2008, 2011) realizaram a modelagem e a análise de isoladores reforçados com fibra submetidos à carga axial e a uma combinação de carga axial e carga lateral. Além disso, foram analisados nesses estudos casos de isoladores com e sem placas de topo, ou seja, fixados e não fixados.

Kalfas *et al.* (2017a, 2017b) realizaram a análise numérica de isoladores reforçados com aço quando submetidos a cargas axial e lateral combinadas, nesse estudo foi observado, como esperado, que o aumento da carga axial de compressão leva a uma redução da rigidez transversal do apoio. Além disso, foi observado que, mesmo quando submetido apenas à uma combinação de compressão e cargas laterais, os isoladores podem apresentar tensões de tração nos seus elementos.

Foram realizados ainda estudos paramétricos utilizando-se modelos numéricos para avaliação da influência dos diversos parâmetros dos aparelhos de apoio.

Han *et al.* (2015) realizaram a análise de diversos parâmetros dos isoladores, como número de camadas de borracha, espessura das camadas de borracha e aço, diâmetro da base e módulo de elasticidade transversal, determinando índices de sensibilidade para cada um dos fatores. Desses índices foi observado que, para os modelos estudados, os principais parâmetros são o número de camadas de borracha, a espessura desta, e o diâmetro da base.

Ainda nos estudos paramétricos, Warn e Weisman (2011) realizaram estudo similar, porém focando na parametrização do fator de forma (S) e da esbeltez dos apoios (λ). Nesse estudo, foi observado que a carga crítica axial dos apoios tem alta influência do seu formato, não dependendo apenas da deformação lateral existente no momento da perda de estabilidade.

Além disso, Khaloo *et al.* (2020), realizaram uma análise paramétrica do comportamento histerético desses isoladores, variando os fatores de forma, porém mantendo a rigidez transversal. Nesse trabalho, foi observada, assim como nos demais, a grande influência da forma dos isoladores no seu comportamento mecânico. Também foram analisadas nesse estudo as tensões e deformações nas chapas de aço, sendo observado que, a depender da deformação lateral existente e da carga axial aplicada, essas placas podem ter regiões de plastificação e até rupturas localizadas.

Recentemente, Rahnavard *et al*, (2019, 2020) realizaram a análise da influência da utilização de núcleos de borracha na estabilidade dos isoladores. Foi observado que a inserção desses núcleos aumenta o amortecimento do isolador, havendo uma maior dissipação de energia. Entretanto, a estabilidade lateral do elemento é reduzida, de forma que esse passa a suportar uma menor carga axial para mesmos níveis de deformação.

2.2. ESTABILIDADE DE ISOLADORES SÍSMICOS

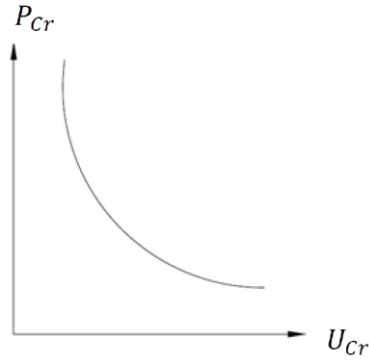
Assim como a perda de estabilidade observada em pilares quando submetidos à elevadas cargas de compressão, os isoladores sísmicos são igualmente suscetíveis a esse fenômeno, havendo, porém, elevada influência da baixa rigidez transversal destes apoios na sua análise.

Dessa forma, quando submetidos concomitantemente a cargas verticais de compressão e deslocamentos laterais, os isoladores apresentam um ponto a partir do qual a força cortante atuante atinge um valor máximo e a rigidez transversal atinge um valor nulo, este ponto é caracterizado como o ponto de perda de estabilidade do isolador, ou seja, quando este atinge a condição de equilíbrio instável.

Observa-se que devido à baixa rigidez transversal dos isoladores, estes apresentam elevados deslocamentos laterais, os quais influenciam diretamente na carga vertical que pode ser aplicada a um isolador até que seja atingido o seu limite de estabilidade lateral, sendo essa carga chamada de carga crítica (P_{cr}).

Como a carga crítica de um isolador depende diretamente do deslocamento lateral atuante, não é possível determinar um valor crítico específico para cada isolador, mas sim uma série de valores que variam de acordo com o deslocamento lateral ao qual o isolador é submetido. Dessa forma, para avaliação da estabilidade dos isoladores são determinadas curvas de estabilidade, as quais relacionam deslocamentos laterais críticos (u_{cr}) com cargas de compressão críticas (P_{cr}). Na Figura 2 é apresentado um modelo dessa curva.

Figura 2 – Modelo de curva de estabilidade de isoladores sísmicos.



Fonte: Dados do autor

A carga crítica de um isolador sísmico para pequenos deslocamentos pode ser estimada analiticamente a partir da teoria de Haringx (1948, 1949a, 1949b), a qual foi posteriormente verificada por Gent (1964) e Koh & Kelly (1989) a partir de resultados experimentais. Segundo Haringx, a carga crítica de um isolador submetido a pequenos deslocamentos é dada por:

$$P_{cr0} = \frac{1}{2}(GA)_{ef} \left[\left(1 + \frac{4P_E}{(GA)_{ef}} \right)^{1/2} - 1 \right] \quad (1)$$

em que P_E é a carga crítica da coluna de Euler, calculada por $P_E = \frac{\pi^2(EI)_{ef}}{h^2}$, $(GA)_{ef}$ é o módulo de rigidez ao cisalhamento efetivo, dado por $GA \frac{h}{T_r}$. Já $(EI)_{ef}$ é o módulo de rigidez à flexão efetivo, dado por $E_r I \frac{h}{T_r}$, em que, G é a rigidez transversal, I é o momento de inércia ao redor do eixo de rotação da camada de borracha, A é a área de cisalhamento da camada de borracha, h é a altura total do isolador, T_r é a espessura total das camadas de borracha do isolador e E_r é o módulo de compressão, dado por $E_r = E_0(1 + 0,742S^2)$.

Dessa expressão, E_0 é o módulo de elasticidade da borracha, considerado geralmente como 3,3 a 4,0 vezes o valor do módulo de elasticidade transversal da borracha e S é o fator de forma, tomado como a razão entre a área carregada de uma camada de borracha e a área não carregada (perimetral) desta;

Uma expressão simplificada para determinação da carga crítica para pequenos deslocamentos foi proposta por Naeim e Kelly (1999) para isoladores

quadrados com fator de forma superior a 5. Essa expressão foi adotada pela norma europeia EN 15129 (2010) e é dada por:

$$P_{cr0} = \frac{\pi}{\sqrt{6}} G A S_1 S_2 \quad (2)$$

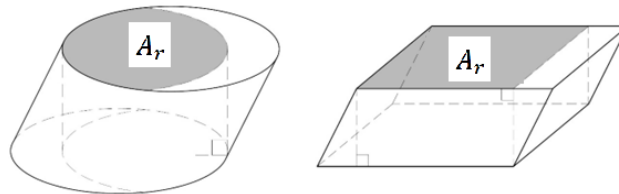
Em que S_1 é o fator de forma S e S_2 é dado por $\frac{1}{\lambda}$, em que λ é a esbeltez do isolador, dada pela razão entre a altura total das camadas de borracha (T_r) e a largura do isolador.

Para a determinação da carga crítica em isoladores submetidos a grandes deslocamentos, Buckle e Liu (1994) propuseram o método da área reduzida, no qual a carga crítica de um isolador submetido a um certo deslocamento lateral u é dada por:

$$P_{cr} = P_{cr0} \left(\frac{A_r}{A} \right) \quad (3)$$

em que A_r é a área reduzida do isolador, representada na Figura 3 e calculada por $A_r = b(b - u)$ em que b é a medida lateral do isolador e u é o deslocamento lateral existente.

Figura 3 – Área reduzida dos isoladores.



Fonte: Adaptado de Gauron *et al.* (2018).

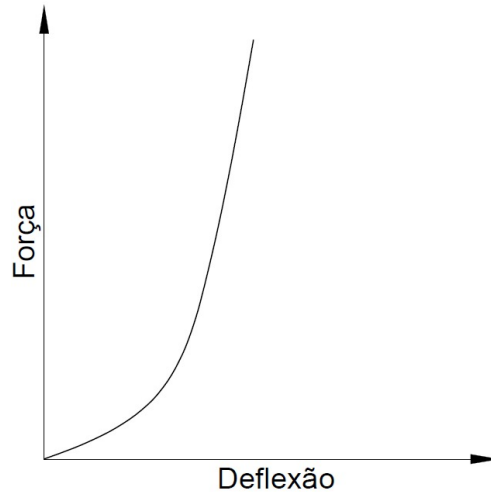
2.3. COMPORTAMENTO MECÂNICO DA BORRACHA

2.3.1. COMPRESSÃO

A borracha quando submetida à compressão apresenta inicialmente um comportamento linear, seguido de um comportamento não linear após enrijecimento

do material quando submetido grandes deformações, de acordo com Roeder (1987). Na Figura 4 é apresentado esse comportamento.

Figura 4 – Comportamento da borracha quando submetida à compressão.



Fonte: Adaptado de Siqueira (2013).

Ainda segundo Roeder (1987), devido à dificuldade de incorporar às análises esse comportamento, usualmente utiliza-se a teoria clássica da elasticidade, supondo comportamento linear, mesmo para maiores deformações, ainda que isso não esteja inteiramente correto.

Para determinação do módulo de elasticidade da borracha quando submetida à compressão, são propostas algumas expressões na literatura. Koh e Kelly (1987) propuseram a $E_c = E(1 + 2,25S^2)$ expressão para isoladores quadrados:

Dentre as expressões propostas, a mais utilizada é a desenvolvida por Gent e Lindley (1959) e empregada na AASHTO (2007), dada por $E_c = E(1 + 2\bar{k}S^2)$, em que $\bar{k}$ é um fator de modificação determinado de acordo com a dureza “Shore A” da borracha, apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Fator de modificação da borracha.

Dureza (<i>Shore A</i>)	50	60	70
$\bar{k}$	0,75	0,60	0,55

Fonte: Adaptado de Siqueira (2013)

Kelly (1997) propôs também expressões simplificadas para determinação do módulo de elasticidade da borracha, para apoios circulares e quadrados, com fatores de forma superiores a 5,0. Essas expressões relacionam diretamente o módulo de elasticidade à compressão com a rigidez transversal (G) do material e são dadas por E_c (circular) = $6,0GS^2$ e E_c (quadrado) = $6,73GS^2$

Observa-se que nenhuma das expressões apresentadas para determinação do módulo de elasticidade da borracha leva em consideração a compressibilidade desta. Entretanto, como apontado por Roeder (1982), para apoios com fatores de forma inferiores à 15, como os usualmente empregados, a compressibilidade destes pode ser negligenciada.

2.3.2. CISALHAMENTO

O comportamento da borracha quando submetido ao cisalhamento é o mais importante de se analisar, visto que é essa propriedade que permite elevados deslocamentos laterais aos apoios e consequentemente reduz os deslocamentos transversais transmitidos à superestrutura das pontes em caso de sismos.

Como apresentado por Roeder (1987), o comportamento da borracha ao cisalhamento pode ser adotado como elástico linear, sendo sua rigidez transversal dada por: $K_t = \frac{GA}{T_r}$.

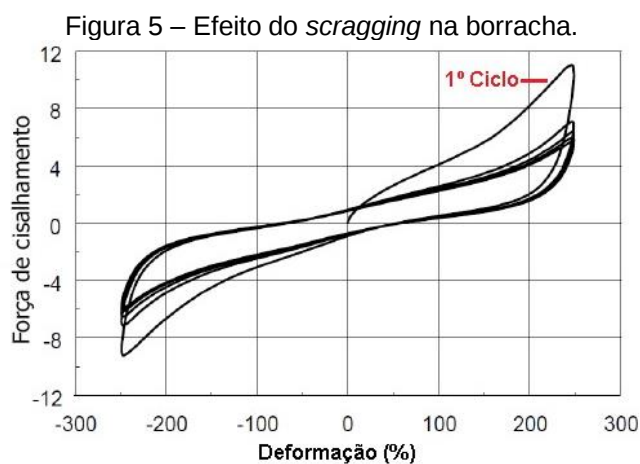
Ainda segundo o mesmo autor, o módulo de deformação transversal da borracha (G) é dependente da carga axial de compressão atuante nesta, sendo que quanto maior a compressão menor é o valor do módulo transversal. Desta forma, como apontado por Siqueira (2013), as normas relacionadas a isoladores sísmicos especificam a obtenção das propriedades da borracha experimentalmente correlacionando essas propriedades do material.

De acordo com Siqueira (2013), os valores de G variam de 0,4 MPa a 1,4 MPa na literatura. A FIB (2007) recomenda adotar valores próximos de 1,0 MPa, enquanto a AASHTO (2007), recomenda valores entre 1,0 MPa e 1,75 MPa.

2.3.3. EFEITO DE MULLINS, *SCRAGGING* E CRISTALIZAÇÃO

A borracha quando ensaiada pela primeira vez apresenta valores elevados de rigidez e resistência para o primeiro ciclo de carregamento, tendendo a estabilizar nos seguintes ciclos, esse efeito, como apresentado por Constantinou e McVitty (2015), é conhecido como *scragging*. Esse efeito está relacionado às perdas das propriedades virgens da borracha e pesquisas recentes realizadas por Constantinou *et al.* (2007) indicam que, com o tempo, essas propriedades tendem a retornar, indicando que as reações químicas na borracha continuam ocorrendo após a vulcanização.

Na Figura 5 pode ser observado esse comportamento, nela é apresentada a curva histórica de uma borracha ensaiada por Thompson *et al* (2000), sendo possível observar a diferença de comportamento no primeiro ciclo de carga.

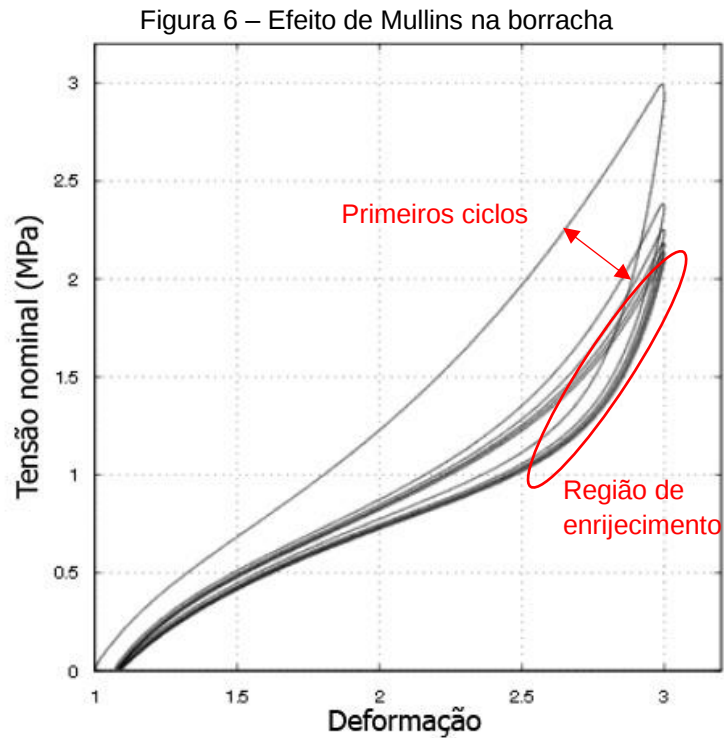


Fonte: Adaptado de Thompson *et al* (2000).

Similarmente ao *scragging*, o efeito de Mullins diz respeito à alteração no comportamento da borracha após aplicação de ciclos de carga, como apresentado por Dorfmann e Ogden (2004). Nesse efeito, é observada uma redução nas tensões atuantes e na rigidez da borracha após os primeiros ciclos de carregamento. Esse

efeito é mais pronunciado entre o primeiro e o segundo ciclos, passando a ser negligenciável a partir de 6 a 10 ciclos, segundo os mesmos autores.

Na Figura 6 é possível observar esse efeito no ensaio cíclico de uma amostra de borracha realizada pelos mesmos autores. Segundo Siqueira (2013), esse efeito ocorre, principalmente, devido a alterações na estrutura molecular na borracha.



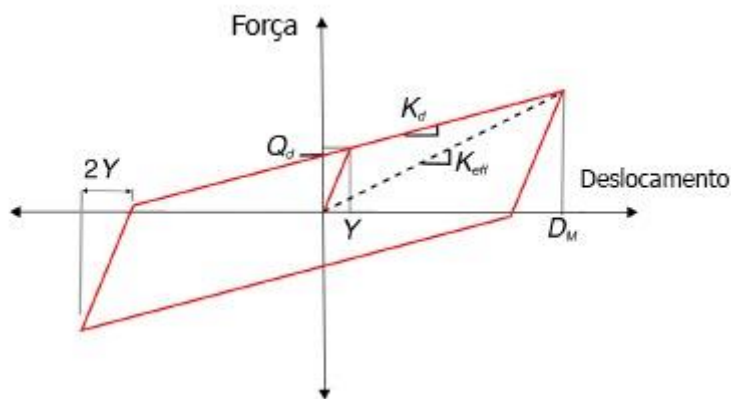
Fonte: Adaptado de Dorfmann e Ogden (2004).

Além desses efeitos, há também o fenômeno de cristalização, como apontado por Siqueira (2013). Nesse fenômeno ocorre um enrijecimento da borracha quando submetida a elevadas deformações (da ordem de 150% a 200%), como é possível observar na Figura 6. Observa-se que fenômeno é mais acentuado em borrachas com aditivos, embora ainda ocorra mesmo sem a presença destes.

2.3.4. COMPORTAMENTO HISTERÉTICO DA BORRACHA

Como apresentado por Constantinou e McVitty (2015) o comportamento histerético da borracha quando submetida a um esforço lateral pode ser representado por uma curva histerética bilinear, como mostrado na Figura 7.

Figura 7 – Curva histerética bilinear da borracha.



Fonte: Constantinou e McVitty (2015).

Tem-se que Q_d é a resistência característica da borracha, tomada como a força no ponto da curva de deslocamento nulo, K_d é a rigidez pós elástica; Y é o deslocamento ao fim do regime elástico e K_{eff} é a rigidez efetiva.

Ainda segundo os autores o amortecimento efetivo do material é dado por

$$\varepsilon_{eff} = \frac{2Q(D_M - Y)}{\pi K_{eff} D_M^2}$$

Segundo Siqueira (2013), para borrachas convencionais o amortecimento varia de 5% a 10%, enquanto para borrachas com alta taxa de amortecimento esse valor varia de 10% a 20%.

2.3.5. NORMAS E DIMENSIONAMENTO

A seguir, são apresentados os critérios de dimensionamento de aparelhos de apoio elastomérico fretados para algumas normas, especificamente a norma brasileira NBR 9062:2017 e a americana AASHTO.

Vale ressaltar que a norma brasileira supracitada trata de concreto pré-moldado e apenas um item desta cita o dimensionamento deste tipo de apoio,

deixando clara a necessidade de mais estudos na área para elaboração de norma específica.

2.3.5.1. NBR 9062:2017

A seguir são apresentados os critérios de dimensionamento desta norma, relativos a limites de tensão.

- Pressão de contato dos aparelhos de apoio (σ_k):

A pressão de contato deve ser limitada aos seguintes valores:

$$\sigma_k = 8,0 \text{ MPa}, \quad a \leq 15$$

$$\sigma_k = 11,0 \text{ MPa}, \quad 15 < a \leq 20$$

$$\sigma_k = 12,5 \text{ MPa}, \quad 20 < a \leq 30$$

$$\sigma_k = 15,0 \text{ MPa}, \quad a > 30$$

Onde, a é a menor dimensão em planta do aparelho de apoio, expressa em centímetros (cm).

- Tensão de cisalhamento no elastômero

$$\tau = \tau_n + \tau_h + \tau_\theta \leq 5G \quad (4)$$

Em que:

$$\tau_n = \frac{1,5 \cdot (N_g + 1,5 \cdot N_q)}{S_i \cdot a \cdot b} \quad (5)$$

$$\tau_h = \frac{G \cdot a_h}{\sum h_i} = \frac{(H_g + 0,5 \cdot H_q)}{a \cdot b} \quad (6)$$

$$\tau_\theta = \frac{G \cdot a^2}{2 \cdot h_i \cdot \sum h_i} \cdot (\tan \theta_g + 1,5 \cdot \tan \theta_q) \quad (7)$$

Em que as parcelas se referem, respectivamente, às tensões de cisalhamento geradas por: carga de compressão, deslocamento lateral e rotação.

Nessas expressões, N_g e N_q são, respectivamente as cargas permanentes e as variáveis.

Como critério de estabilidade, a norma define que não é necessária qualquer verificação caso a esbeltez do elemento de apoio seja igual ou inferior a 0,2.

Ressalta-se que a maioria das verificações da norma brasileira tem como base as especificações da UIC (*International union of railways*).

2.3.5.2. AASHTO (2012)

- Tensão de cisalhamento devido deformação por cisalhamento:

$$\frac{\Delta_s}{T} \leq 0,5$$
, em que, $T = \sum t_i$ (espessura da borracha), Δ_s é a deformação total por cisalhamento.
- Força de cisalhamento: $H = \frac{G \cdot \Delta_s}{T} L \cdot W$, com $L = 2a$ e $W = 2b$, em que G é o módulo de cisalhamento e L e W são as dimensões em planta do aparelho de apoio.
- Capacidade de Rotação: $\alpha = \frac{2 \cdot \Delta_c}{L}$
- Deslocamentos permitidos:

$$|\Delta_s^+| + |\Delta_s^-| \leq 0,5 \cdot T \quad \text{cisalhamento admissível}$$

$$\Delta_c \leq 0,07 \cdot T \quad \text{deslocamento vertical admissível}$$
- Tensão de compressão média:

$$\bar{\sigma}_c = \frac{P}{A} \leq 800 \text{ psi} \sim 5 \text{ MPa}$$
- Requisitos de estabilidade $T \leq \frac{L}{3}$ e $T \leq \frac{W}{2}$

2.3.5.3. Comentários a respeito das normas de dimensionamento

Em seu trabalho, Roeder (1982), realizou uma intensa pesquisa e compilação de dados a respeito de apoios elastoméricos. Nesta pesquisa, foi realizada uma comparação entre as diversas normas e seus critérios de

dimensionamento existentes na época, dentre os quais a maioria permanece sendo aplicada até hoje.

Desta análise, o principal ponto a se destacar, sendo válido para esse trabalho, é a grande divergência existente para os critérios de ruptura da borracha quando submetida à cisalhamento na condição de fadiga. Enquanto alguns trabalhos definem esse valor de ruptura como $3G$, em que G é o módulo de elasticidade transversal, outros definem como $5G$ e outros ainda como uma porcentagem do alongamento da ruptura na tração.

Avaliando esse cenário, uma das condições levantadas pelo autor é a apresentada pelo trabalho de Beatty (1949), o qual afirma que, se em qualquer momento da vida útil do aparelho de apoio a borracha sofrer uma inversão de tensões, os valores de resistência à fadiga são severamente alterados.

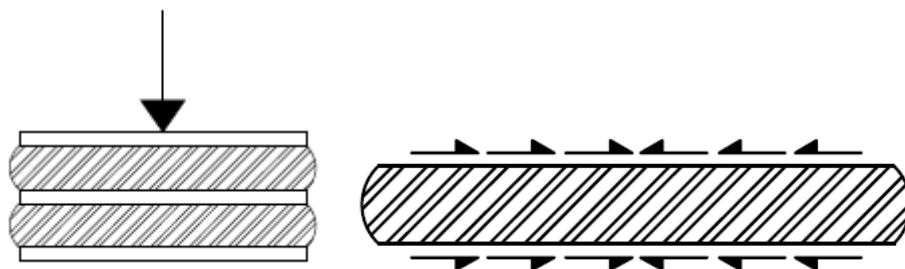
Por fim, outro ponto levantado por Roeder (1982) é a questão do início da plastificação das chapas de aço do apoio, visto que esta ocorrência altera o comportamento do isolador e conseqüentemente o seu comportamento em serviço.

As informações citadas anteriormente, são de grande importância para este trabalho, visto que a partir destas que serão definidos os estados limites intermediários dos isoladores

2.3.6. COMPORTAMENTO DA BORRACHA NOS ISOLADORES QUANDO SUBMETIDOS À COMPRESSÃO E DESLOCAMENTO LATERAL

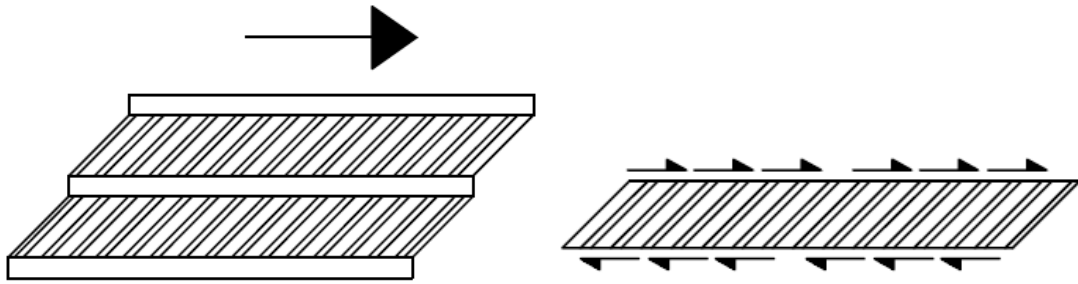
Para melhor compreensão dos esforços de cisalhamento atuantes nas camadas de borracha, apresenta-se nas figuras a seguir como se configuram essas tensões para cargas de compressão e deslocamento lateral.

Figura 8 – Comportamento das tensões de cisalhamento na borracha quando submetida à compressão.



Fonte: Dados do autor.

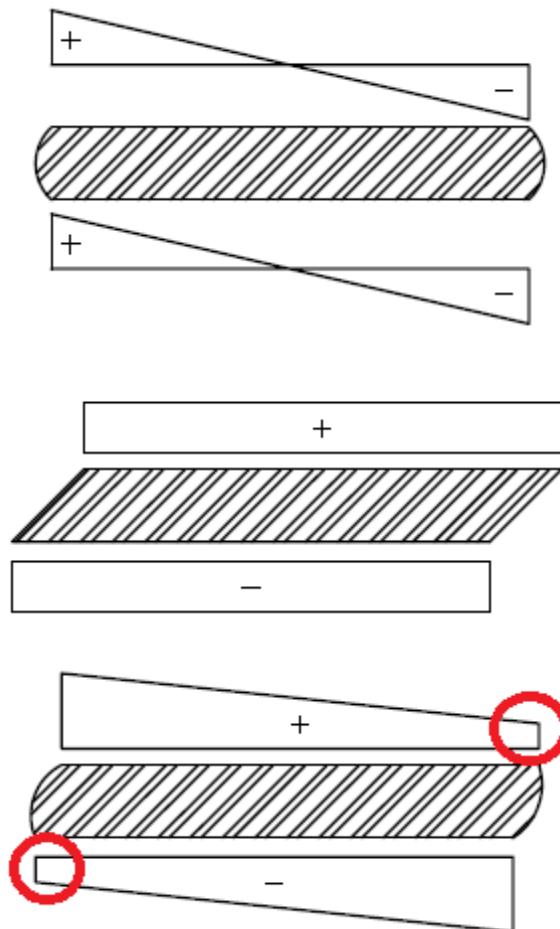
Figura 9 – Comportamento das tensões de cisalhamento na borracha quando submetida a um deslocamento lateral.



Fonte: Dados do autor.

Observa-se da Figura 8 que as tensões vão da borda ao centro no caso de compressão, enquanto na Figura 9 as tensões sempre têm a mesma orientação para a face da borracha analisada. Na Figura 10, são apresentados gráficos representativos dessas tensões de cisalhamento atuantes para cada um dos casos e, por fim, o caso dessa atuação concomitante. Observa-se que os sinais são ilustrativos.

Figura 10 – Tensões de cisalhamento atuantes.



Fonte: Dados o autor.

É importante perceber dessa figura que, no caso da sobreposição de solicitações, as tensões podem vir a sofrer alteração de sinal nos pontos marcados em vermelho. Essa análise é importante, visto que isto definirá um dos estados limites analisados neste trabalho, uma vez que ocorre inversão de tensões, fato que, como citado na seção anterior, pode alterar o comportamento do isolador quando submetido à fadiga.

2.4.RESUMO DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo da dissertação foi apresentada a revisão bibliográfica do trabalho. Esta consistiu em um resumo do desenvolvimento histórico dos isoladores e na revisão teórica dos principais tópicos relacionados ao trabalho: estabilidade de isoladores sísmicos e comportamento mecânico da borracha.

No próximo capítulo, será apresentada a metodologia desenvolvida durante a elaboração do trabalho.

3. METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho consistiu nos seguintes passos:

- a) Elaboração de modelo numérico no software ABAQUS;
- b) Determinação dos parâmetros utilizados para calibração do modelo;
- c) Determinação do espaço amostral para análise;
- d) Elaboração e processamento dos modelos propostos do espaço amostral proposto;
- e) Extração dos resultados de ruptura por instabilidade e cisalhamento dos isoladores;
- f) Extração dos resultados de estados limite intermediários;
- g) Análise paramétrica do espaço amostral, tanto para o caso da ruptura do isolador quanto para o caso dos limites intermediários;
- h) Comparação entre os estados limites e definição de curvas para distinção entre eles.

3.1. MODELAGEM NUMÉRICA

A modelagem numérica inicial dos isoladores sísmicos foi realizada com o intuito de se calibrar o modelo, comparando os resultados obtidos com resultados experimentais presentes na literatura, optando-se por utilizar valores do trabalho de Gauron *et al.* (2018).

Para o modelo foram utilizados elementos sólidos hexaédricos do tipo C3D8RH. Observa-se que foi necessário utilizar uma formulação híbrida, visto que materiais incompressíveis ou muito próximos a isso, caso da borracha, requerem a utilização dessa formulação. A formulação híbrida é utilizada, pois numericamente não se tem valores representativos de deslocamento nos nós dos elementos, assim é utilizada uma variável adicional que correlaciona a pressão atuante no elemento.

Observa-se que para processamento desses modelos foi necessário a utilização do tipo de análise dinâmica implícita com solução das iterações a partir do método de Newton.

3.1.1. GEOMETRIA DO MODELO

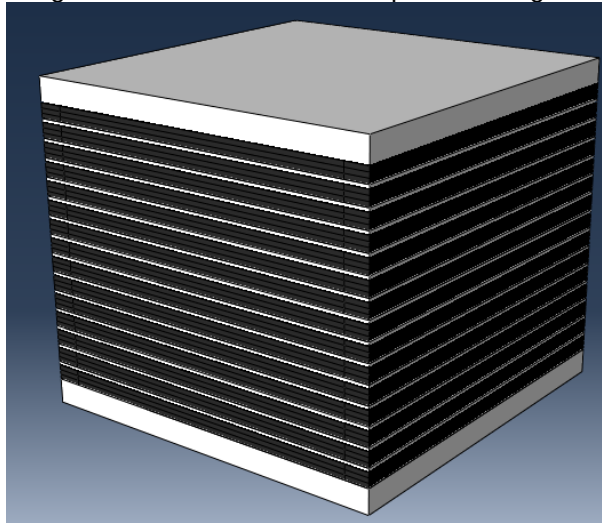
A geometria do modelo foi a utilizada no modelo B1 do trabalho de Gauron *et al.* (2018) e apresenta as seguintes características:

- Dimensões: 300 mm x 300 mm;
- Espessura das camadas de borracha: 12 mm;
- Número de camadas de borracha: 15;
- Espessura das chapas de aço: 3 mm;
- Número de chapas de aço: 14;
- Dimensões das placas de apoio: 300 mm x 300 mm;
- Espessura das placas de apoio: 20 mm.

Na Figura 11 é apresentado o modelo elaborado no software ABAQUS. Para a malha, foi considerado o seguinte refinamento:

- Tamanho do elemento padrão nas direções horizontais: 10mm;
- Na borda das camadas de borracha foram utilizadas malhas mais refinadas, com tamanhos de aproximadamente 2,5mm na horizontal na direção da aplicação do deslocamento;
- Para as camadas de aço, na vertical, foram consideradas medidas iguais à espessura das chapas, ou seja, as camadas de aço têm apenas um elemento ao longo da direção vertical.
- Para as camadas de borracha, na vertical, foram consideradas 3 subdivisões, independentemente da altura da camada. É importante destacar que essa definição é a mais sensível do modelo, sendo observado melhor relação custo benefício para esse número de elementos na direção vertical.

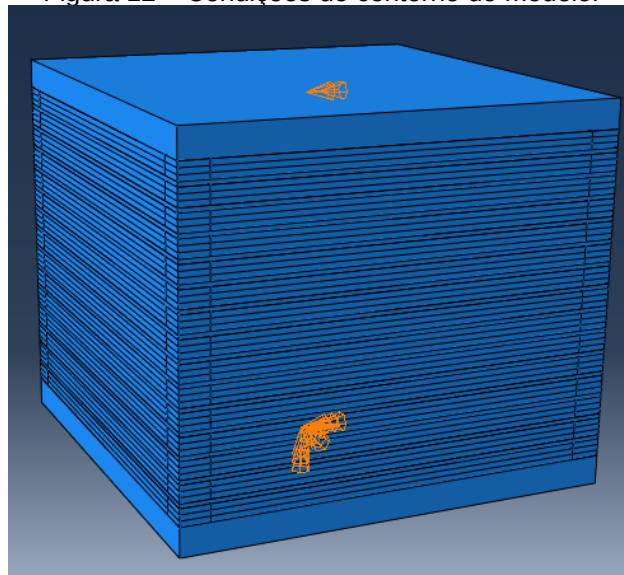
Figura 11 – Modelo elaborado para calibragem.



Fonte: Dados do autor.

Como condição de contorno foi aplicado um engaste na placa de apoio inferior e foi restrito o giro na placa superior, de forma a garantir o paralelismo entre as placas, condição usualmente empregada nos ensaios. O modelo contendo as condições de contorno é apresentado na Figura 12.

Figura 12 – Condições de contorno do modelo.



Fonte: Dados do autor.

3.1.2. MODELO CONSTITUTIVO DA BORRACHA

O comportamento mecânico da borracha pode ser adequadamente caracterizado a partir de um modelo hiperelástico. Dentro dos modelos hiperelásticos,

os mais conhecidos são o modelo Neo-Hookeano, o modelo de Mooney-Rivlin e o modelo de Ogden, como apresentado por Kim *et al.* (2012). Os modelos hiperelásticos são baseados no cálculo da energia de deformação, levando em conta a não linearidade do material e a sua compressibilidade.

Dentre os modelos citados, segundo os mesmos autores, o de Ogden é o que atinge resultados satisfatórios para os maiores valores de deformação em cisalhamento, chegando a apresentar valores compatíveis para deformações de ordem de 700%, enquanto esses valores são de 200% e 100% para os modelos de Mooney-Rivlin e Neo-Hookeano, respectivamente.

A energia de deformação no modelo de Ogden é dada por:

$$U = \sum_{n=1}^3 \frac{\mu_n}{\alpha_n} (\lambda_1^{\alpha_n} + \lambda_2^{\alpha_n} + \lambda_3^{\alpha_n} - 3) + D_1 (J - 1)^2 \quad (8)$$

Em que:

- μ_n , α_n e D_1 são parâmetros do material;
- λ_i são os valores nas direções principais do tensor direito de deformação;
- J é a variação volumétrica do elemento.

As propriedades do material utilizadas no modelo, foram obtidas de Gauron *et al.* (2018) e são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros da borracha para o modelo hiperelástico de Ogden.

$\mu_1 (MPa)$	α_1	$\mu_2 (MPa)$	α_2	$\mu_3 (MPa)$	α_3	$D_1 (MPa^{-1})$
0,3796	3,150	0,004996	4,898	-0,005413	-2,000	0,001

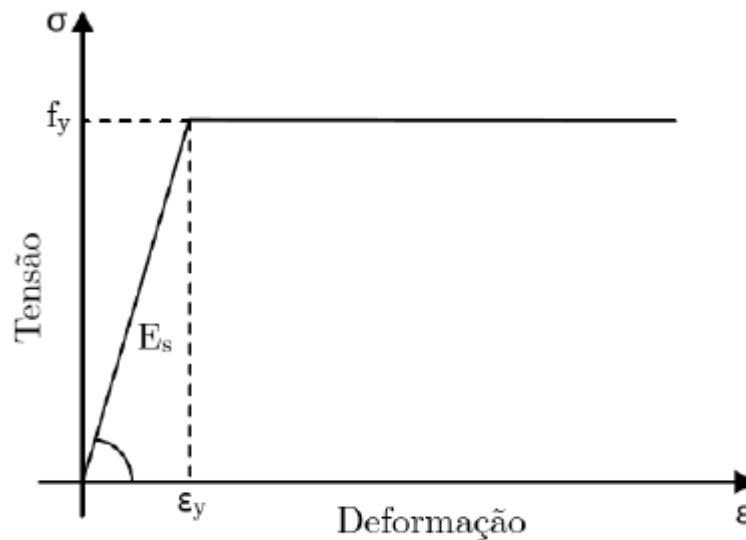
Fonte: Gauron *et al.* (2014)

Observa-se que esse modelo constitutivo leva em consideração a compressibilidade do material, sendo esta considerada na determinação do parâmetro D_1 .

3.1.3. MODELO CONSTITUTIVO DO AÇO

Para o aço foi considerado um modelo constitutivo elastoplástico perfeito, apresentando comportamento elástico linear regido pelo módulo de elasticidade E_s para tensões abaixo da tensão de escoamento (f_y), e comportamento perfeitamente plástico após esse valor. Na Figura 13 é apresentado esse comportamento.

Figura 13 – Modelo constitutivo do aço.



Fonte: Dados do autor.

No trabalho de referência para dados experimentais de Gauron *et al.* (2018), o aço utilizado foi o 300W (o qual não tem equivalência com qualquer tipo disponível em território nacional), dessa forma, tem-se as seguintes propriedades mecânicas:

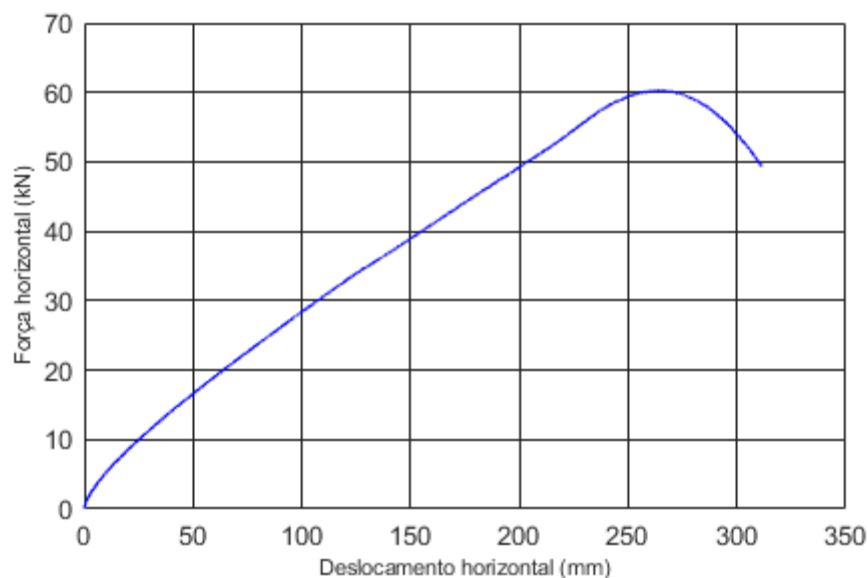
- $E_s = 200 \text{ GPa}$;
- $f_y = 300 \text{ MPa}$;

3.1.4. CARGAS E DESLOCAMENTOS APLICADOS

Seguindo o adotado no trabalho de referência para dados experimentais de Gauron *et al.* (2018), o carregamento consistiu em aplicar concomitantemente uma carga axial de compressão e um deslocamento lateral.

Para os resultados experimentais, foram utilizados o método direto de ensaio e o método dos deslocamentos constantes (ou CDM – *constant displacement method*). No primeiro, o isolador é carregado axialmente com uma carga predeterminada, e então é aplicado um deslocamento lateral que vai sendo aumentado até que seja atingido o limite de estabilidade do isolador (ponto em que a rigidez transversal se torna nula). Um exemplo de gráfico resultante desse método é apresentado na Figura 14 para o isolador apresentado na seção 3.1.1.

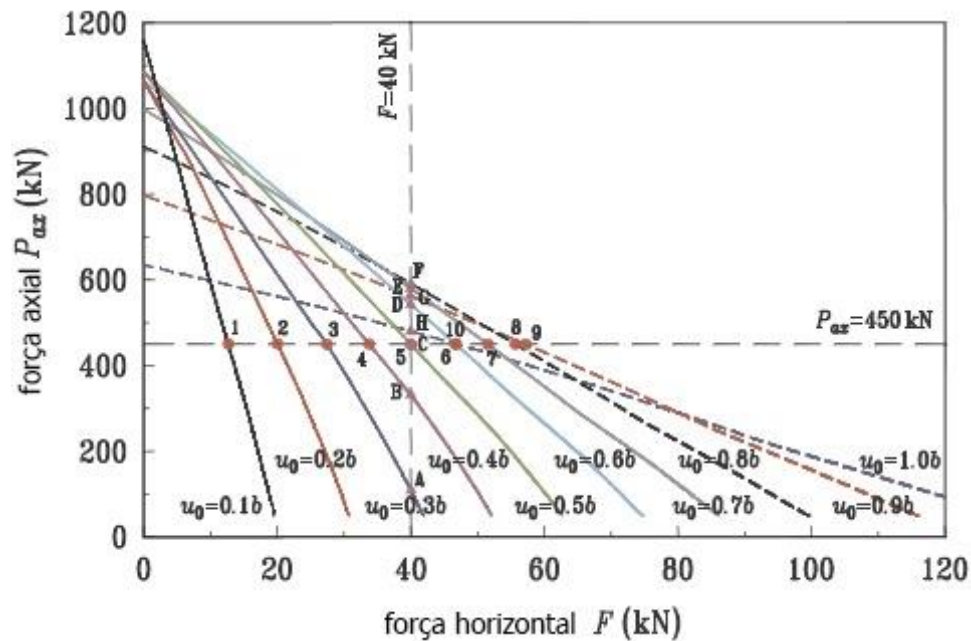
Figura 14 – Resultado obtido do método direto.



Fonte: Adaptado de Gauron *et al* (2018).

O método direto, embora seja mais prático para análise dos dados, pode danificar o isolador, de forma que o CDM têm sido uma alternativa para evitar danos ao espécime. O CDM consiste em se aplicar um deslocamento horizontal em pequenos passos, e então para cada uma dessas fases o carregamento axial é aumentado até que a força lateral aplicada se torne nula. O resultado desse processo é apresentado na Figura 15. A partir desse ensaio é possível se determinar indiretamente a curva de resposta obtida no método direto.

Figura 15 – Resultados obtidos do CDM.



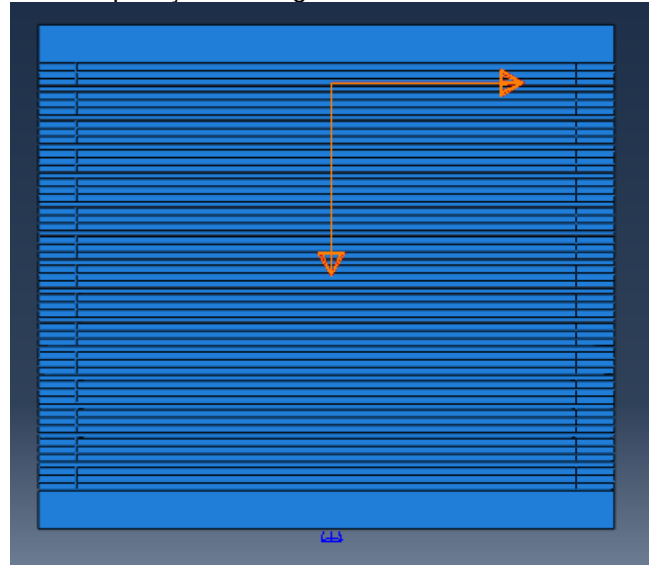
Fonte: Adaptado de Gauron *et al* (2018).

Como no modelo numérico, diferentemente dos ensaios experimentais, não há problemas com relação a danos nos isoladores, optou-se por utilizar o método mais simples na modelagem, dessa forma foi utilizado um processo semelhante ao método direto.

Assim, inicialmente foi aplicada uma carga axial predeterminada em uma primeira etapa do modelo e, em seguida, foi aplicado um deslocamento lateral, o qual foi variado até atingir o deslocamento crítico (u_{cr}) para aquela carga axial, de forma que repetindo esse processo para diferentes níveis de cargas axiais, é possível se determinar a curva de estabilidade do isolador, como apresentada na Figura 2. O deslocamento crítico é determinado no ponto em que a rigidez transversal do isolador se torna nula.

Na Figura 16 são apresentadas a aplicação da carga axial e do deslocamento lateral no modelo.

Figura 16 – Aplicação da carga axial e deslocamento no modelo.

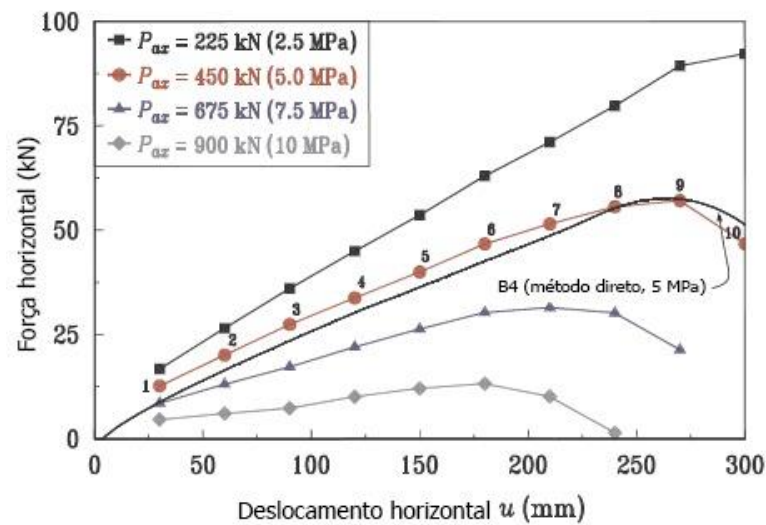


Fonte: Dados do autor.

3.2. PARÂMETROS UTILIZADOS PARA CALIBRAÇÃO DO MODELO

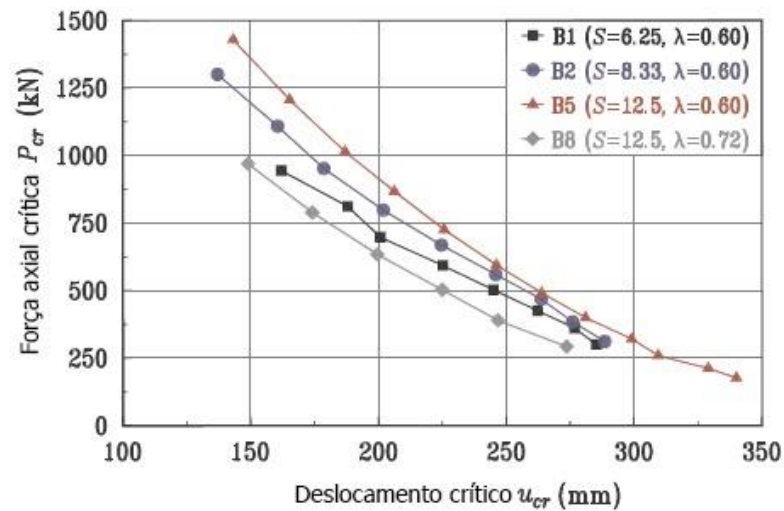
Como já mencionado, para calibração do modelo foram utilizados os resultados experimentais obtidos por Gauron *et al.* (2018) utilizando-se como referência o isolador apresentado na seção 3.1.1. Os resultados para esse isolador são apresentados na Figura 17 e na Figura 18.

Figura 17 – Comportamento ao cisalhamento com compressão do isolador analisado.



Fonte: Adaptado de Gauron *et al.* (2018).

Figura 18 – Curva de estabilidade do isolador.



Fonte: Adaptado de Gauron *et al.* (2018).

Assim, para calibração serão considerados os resultados apresentados nessas figuras, determinando-se o comportamento ao cisalhamento com compressão do modelo e sua curva de estabilidade. Dessa forma, na Tabela 3, são apresentados os valores de carga e deslocamentos (valores para garantir que o deslocamento crítico seja atingido) aplicados no modelo.

Tabela 3 – Valores de carga e deslocamentos horizontais considerados.

Tensão de compressão axial (MPa)	Deslocamento horizontal (mm)
2.5	400
5.0	300
7.5	300
10.0	300

Fonte: Adaptado de Gauron *et al.* (2018).

3.3. CONSIDERAÇÕES A RESPEITO DA ANÁLISE PARAMÉTRICA

Para a análise paramétrica dos isoladores a partir do modelo numérico calibrado, foram considerados os seguintes parâmetros:

- Fator de forma (S);

- Esbeltez (λ);
- Resistência ao escoamento (f_y) e espessura das chapas de aço (t_s).

A partir desses parâmetros e dos valores usuais deles apresentados na literatura foi elaborada a Tabela 4, na qual são apresentados os limites mínimos e máximos considerados para esses parâmetros na análise, assim como a variação considerada na análise para cada um deles dentro do intervalo.

Tabela 4 – Valores limites dos parâmetros analisados.

Parâmetro	Limite mínimo	Limite máximo	Variação na análise
S	6	15	3
λ	0,4	0,7	0,1
f_y (MPa)	250	400	150
t_s (mm)	3	5	2

Fonte: Dados do autor.

A partir da Tabela 4 foi elaborada a Tabela 5 , na qual é apresentado o espaço amostral da análise paramétrica. Nela são apresentados os valores dos parâmetros para cada um dos modelos numéricos do espaço amostral proposto.

Tabela 5 – Espaço amostral da análise paramétrica.

Modelo	S	λ	f_y (MPa)	t_s (mm)
M-6/0,4/250/3	6	0,4	250	3
M-6/0,5/250/3	6	0,5	250	3
M-6/0,6/250/3	6	0,6	250	3
M-6/0,7/250/3	6	0,7	250	3
M-9/0,4/250/3	9	0,4	250	3
M-9/0,5/250/3	9	0,5	250	3
M-9/0,6/250/3	9	0,6	250	3
M-9/0,7/250/3	9	0,7	250	3
M-12/0,4/250/3	12	0,4	250	3
M-12/0,5/250/3	12	0,5	250	3
M-12/0,6/250/3	12	0,6	250	3

Tabela 5 – Espaço amostral da análise paramétrica.

Modelo	S	λ	f_y (MPa)	t_s (mm)
M-12/0,7/250/3	12	0,7	250	3
M-15/0,4/250/3	15	0,4	250	3
M-15/0,5/250/3	15	0,5	250	3
M-15/0,6/250/3	15	0,6	250	3
M-15/0,7/250/3	15	0,7	250	3
M-6/0,4/400/3	6	0,4	400	3
M-6/0,5/400/3	6	0,5	400	3
M-6/0,6/400/3	6	0,6	400	3
M-6/0,7/400/3	6	0,7	400	3
M-9/0,4/400/3	9	0,4	400	3
M-9/0,5/400/3	9	0,5	400	3
M-9/0,6/400/3	9	0,6	400	3
M-9/0,7/400/3	9	0,7	400	3
M-12/0,4/400/3	12	0,4	400	3
M-12/0,5/400/3	12	0,5	400	3
M-12/0,6/400/3	12	0,6	400	3
M-12/0,7/400/3	12	0,7	400	3
M-15/0,4/400/3	15	0,4	400	3
M-15/0,5/400/3	15	0,5	400	3
M-15/0,6/400/3	15	0,6	400	3
M-15/0,7/400/3	15	0,7	400	3
M-6/0,4/250/5	6	0,4	250	5
M-6/0,5/250/5	6	0,5	250	5
M-6/0,6/250/5	6	0,6	250	5
M-6/0,7/250/5	6	0,7	250	5
M-9/0,4/250/5	9	0,4	250	5
M-9/0,5/250/5	9	0,5	250	5
M-9/0,6/250/5	9	0,6	250	5
M-9/0,7/250/5	9	0,7	250	5
M-12/0,4/250/5	12	0,4	250	5

Tabela 5 – Espaço amostral da análise paramétrica.

Modelo	S	λ	f_y (MPa)	t_s (mm)
M-12/0,5/250/5	12	0,5	250	5
M-12/0,6/250/5	12	0,6	250	5
M-12/0,7/250/5	12	0,7	250	5
M-15/0,4/250/5	15	0,4	250	5
M-15/0,5/250/5	15	0,5	250	5
M-15/0,6/250/5	15	0,6	250	5
M-15/0,7/250/5	15	0,7	250	5
M-6/0,4/400/5	6	0,4	400	5
M-6/0,5/400/5	6	0,5	400	5
M-6/0,6/400/5	6	0,6	400	5
M-6/0,7/400/5	6	0,7	400	5
M-9/0,4/400/5	9	0,4	400	5
M-9/0,5/400/5	9	0,5	400	5
M-9/0,6/400/5	9	0,6	400	5
M-9/0,7/400/5	9	0,7	400	5
M-12/0,4/400/5	12	0,4	400	5
M-12/0,5/400/5	12	0,5	400	5
M-12/0,6/400/5	12	0,6	400	5
M-12/0,7/400/5	12	0,7	400	5
M-15/0,4/400/5	15	0,4	400	5
M-15/0,5/400/5	15	0,5	400	5
M-15/0,6/400/5	15	0,6	400	5
M-15/0,7/400/5	15	0,7	400	5

Fonte: Dados do autor.

Com isso, tem-se o total de 64 modelos no espaço amostral.

3.4. ELABORAÇÃO E PROCESSAMENTO DOS MODELOS DO ESPAÇO AMOSTRAL

Como toda análise numérica em larga escala, há uma grande dificuldade na elaboração e processamento dos modelos, visto que o tempo demandado é extenso e a quantidade de dados é significativa.

Buscando otimizar esse processo, foi elaborado um código no software MATLAB para geração desses modelos. Para isso, utilizou-se um arquivo de extensão .JNL gerado pelo software Abaqus a partir do qual foi observado o padrão de escrita e então elaborou-se um código para determinação das informações do modelo, como numeração e locação de nós, numeração e locação de elementos, definição de materiais e condições de contorno, isto é, apoios e carregamentos externos. Com isso, foi necessário apenas importar os arquivos no software de MEF para processamento destes.

Para o processamento, foram utilizados 4 computadores em paralelo a fim de se otimizar essa etapa, visto que cada etapa de carga de cada um dos 64 modelos chegou a levar até um dia inteiro para processamento. Destaca-se também a dificuldade para armazenamento de todos os dados, visto que estes totalizaram mais de 2TB de dados.

3.5. EXTRAÇÃO DOS RESULTADOS DE RUPTURA POR INSTABILIDADE E CISALHAMENTO DOS ISOLADORES

Após o processamento de todos os 64 modelos, para cada um dos 4 patamares de carga, totalizando 256 análises, a próxima etapa foi a extração dos dados de ruptura dos isoladores, esta ruptura por cisalhamento ou instabilidade.

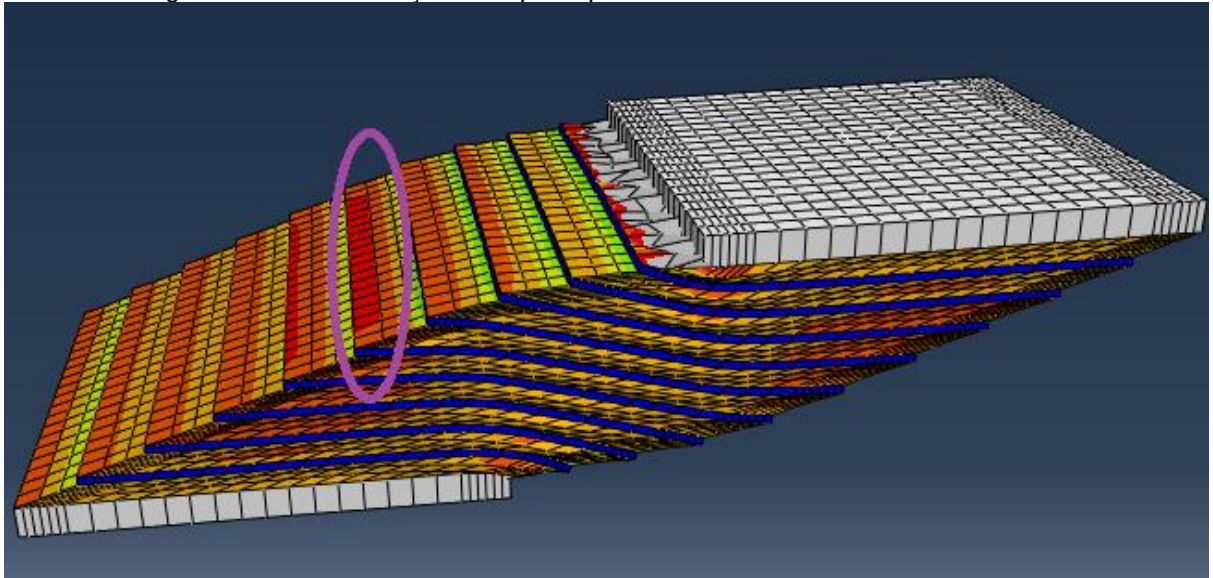
Para o caso de ruptura por instabilidade, esta foi determinada como apresentada no modelo de calibração, observando-se o ponto em que a rigidez transversal atingia um valor nulo.

Já para o caso de ruptura por cisalhamento, está foi determinada seguindo o critério apresentado por Gauron (2014), o qual se resume em determinar quando a borracha atinge uma certa deformação máxima na sua direção principal, esta deformação máxima foi considerada como 4,03, como estabelecido no trabalho supracitado.

Para exemplificar e demonstrar a coerência dessa definição, é apresentada a seguir uma foto de um dos casos em que o isolador rompeu por cisalhamento, sendo

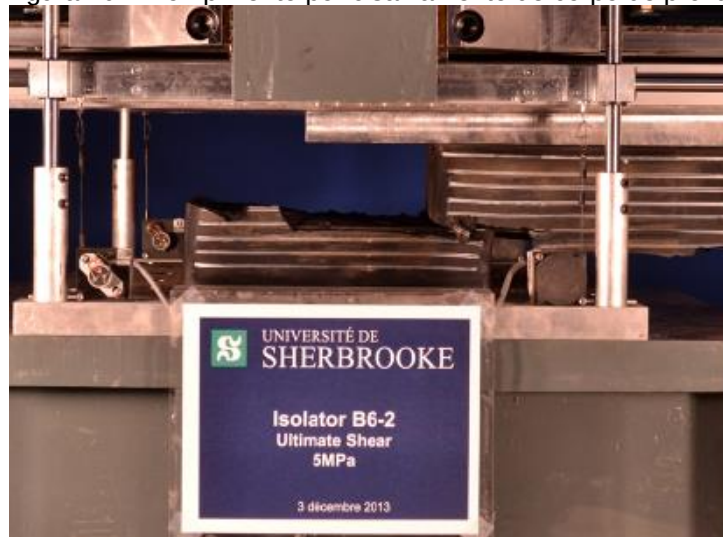
possível observar na Figura 19 o ponto em que a borracha atinge a deformação máxima, sendo esta comparado com a Figura 20 de um dos ensaios experimentais realizados por Gauron *et al.* (2018). Das figuras é possível observar um comportamento de rompimento muito similar.

Figura 19 – Determinação da ruptura por cisalhamento no modelo numérico.



Fonte: Dados do autor.

Figura 20 – Rompimento por cisalhamento de corpo de prova.



Fonte: Gauron *et al* (2018).

3.6. EXTRAÇÃO DOS RESULTADOS DE ESTADOS LIMITE INTERMEDIÁRIOS

Como mencionado nas seções acima, os estados limites intermediários foram determinados para 2 condições, sendo elas:

- (a) Determinação do deslocamento horizontal para o qual houve inversão das tensões de cisalhamento na borracha, como exemplificado na Figura 10. Este estado limite foi baseado no estudo de Beatty (1949) e leva em consideração que a ocorrência deste fato afeta a resistência de cisalhamento à fadiga da borracha. Como este estado limite não compromete o comportamento do isolador, mas pode vir a reduzir a vida útil deste, foi definido como um Estado Limite Leve;
- (b) Determinação do ponto a partir do qual foi observada plastificação das chapas de aço em algum ponto. De acordo com Roeder (1982), a ocorrência desse fato resulta em uma alteração do comportamento do isolador, embora, não leve à impossibilidade da utilização deste, de forma que este foi definido com um Estado Limite Moderado.

Observa-se que se pretendia acrescentar um Estado Limite Extenso nessa análise, que seria no caso da ruptura das chapas de aço em algum ponto, entretanto, isso não foi observado em qualquer dos isoladores.

Dessa forma, por fim, foram determinados ao todo três estados limites, sendo dois deles intermediários (e apresentados acima) e um estado limite de ruptura, chamado daqui para frente de Estado Limite Completo, caracterizado pelo rompimento do isolador por cisalhamento ou instabilidade.

3.7. ANÁLISE PARAMÉTRICA DO ESPAÇO AMOSTRAL

Para cada um dos estados limites citados acima foi realizada uma análise paramétrica dos seguintes parâmetros:

- Fator de forma (S);
- Esbeltez (λ);
- Espessura das chapas de aço (t_s);
- Tensão de escoamento das chapas de aço (f_y).

A análise paramétrica foi realizada da seguinte forma para cada um dos estados limites: todos os parâmetros, exceto um, foram deixados fixos, de forma a ser possível observar a influência isolada do parâmetro estudado. Observa-se que dessa forma foram gerados 16 gráficos para avaliação do fator de forma e 16 para esbeltez, e 32 gráficos para avaliação da espessura das chapas de aço, assim como para a tensão de escoamento.

Quantitativamente, a influência dos fatores foi medida observando a variação de resultados para cada patamar de tensão para cada um dos gráficos em que os outros fatores foram fixados, sendo por fim, avaliada a média total entre estes.

A partir dessa análise, foi possível determinar os fatores mais influentes para cada um dos estados limites estudados

3.8. COMPARAÇÃO ENTRE OS ESTADOS LIMITES E DEFINIÇÃO DE CURVAS PARA DISTINÇÃO ENTRE ELES.

Nessa etapa, foram elaborados gráficos Deslocamento crítico x Tensão de compressão para cada um dos 64 modelos, apresentando todos os estados limites estudados.

Por fim, como será apresentado na seção de resultados, observou-se que o fator mais influente é a esbeltez (λ), assim, para facilitar a análise e apresentar os resultados de uma maneira mais resumida a última etapa deste trabalho consistiu em se elaborar quatro gráficos, com valores de esbeltez variando entre 0,4 e 0,7, sendo apresentadas, em cada um, curvas representativas dos três estados limites avaliados.

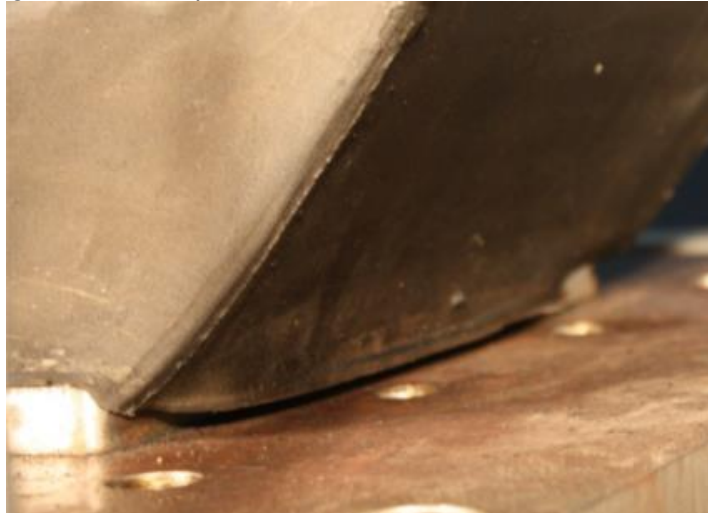
Observa-se que, por se tratar de um trabalho de estudo e análise de comportamento, as curvas citadas acima foram elaboradas a partir da média do resultado dos demais parâmetros, isto é, fator de forma, espessura das chapas de aço e tensão de escoamento das chapas de aço.

4. RESULTADOS

4.1. RESULTADOS DE CALIBRAÇÃO DO MODELO

Após elaboração do modelo numérico, de acordo com o apresentado na metodologia do trabalho, foi realizado o seu processamento. Durante esta etapa, verificou-se a dificuldade da convergência do modelo, principalmente nas bordas do isolador, devido à alta deformabilidade da borracha. O comportamento citado pode ser observado na Figura 21 durante ensaio experimental realizado por Gauron *et al.* (2018).

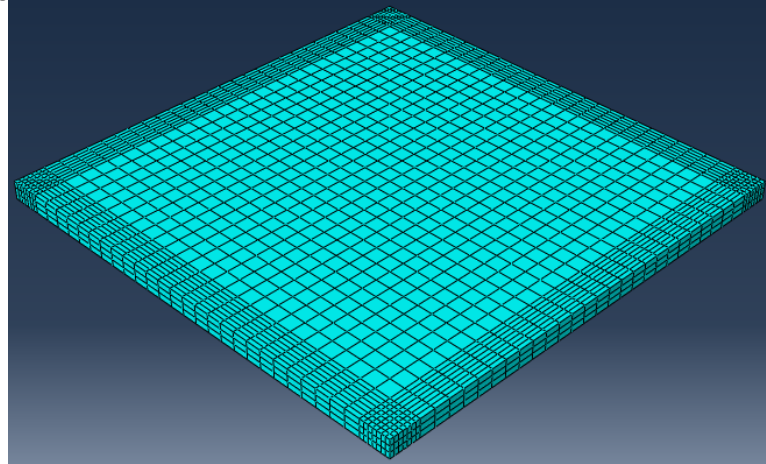
Figura 21 – .Comportamento da borracha na borda do isolador.



Fonte: Gauron *et al* (2018).

Devido à essa dificuldade de convergência do modelo foi necessário refinar a malha das camadas de borracha na região das extremidades, assim, nas extremidades, as dimensões laterais dos elementos foram tomadas como um terço das dimensões dos elementos centrais, os quais não foram reduzidos devido ao elevado tempo de processamento requerido para isso. Na Figura 22, é apresentada a malha final utilizada nas camadas de borracha do modelo.

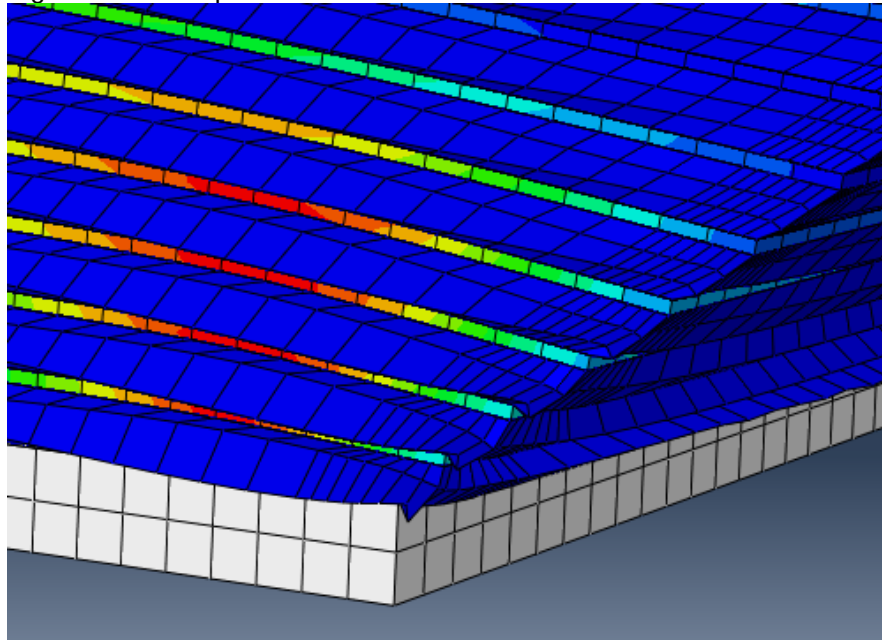
Figura 22 – .Malha de elementos finitos para as camadas de borracha.



Fonte: Dados do autor.

Utilizando-se então a malha adotada foi possível garantir a convergência do modelo. Na Figura 23, é apresentado o comportamento do modelo na região de borda mostrada na Figura 22, sendo possível verificar como este se assemelha com o observado no ensaio experimental.

Figura 23 – .Comportamento da camada de borracha na borda do modelo.

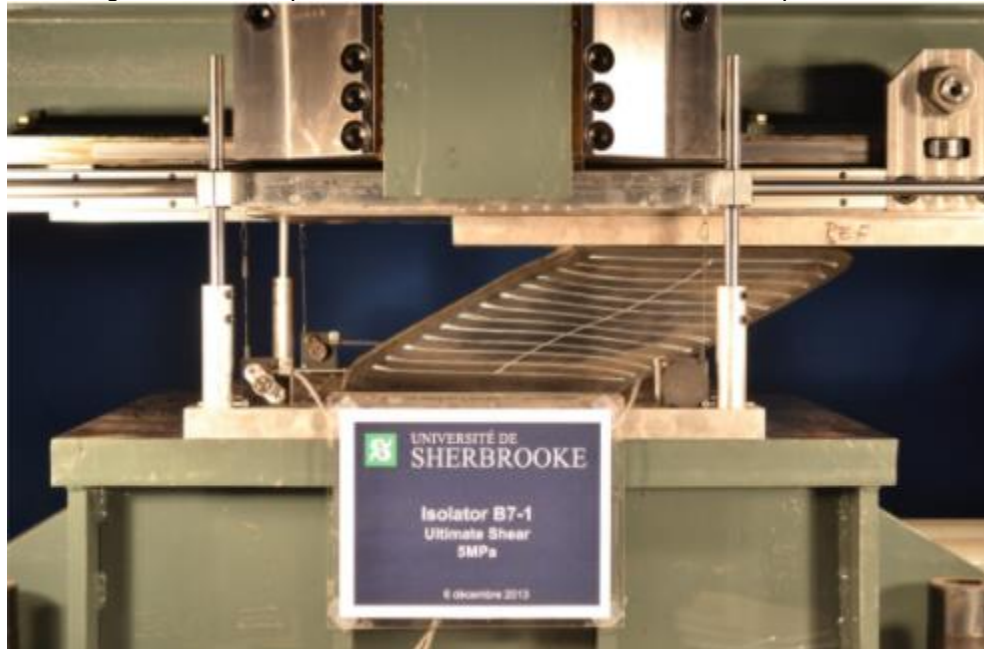


Fonte: Dados do autor.

Além disso, são apresentados na Figura 24 e na Figura 25 o comportamento do isolador deformado nos ensaios experimentais e no modelo

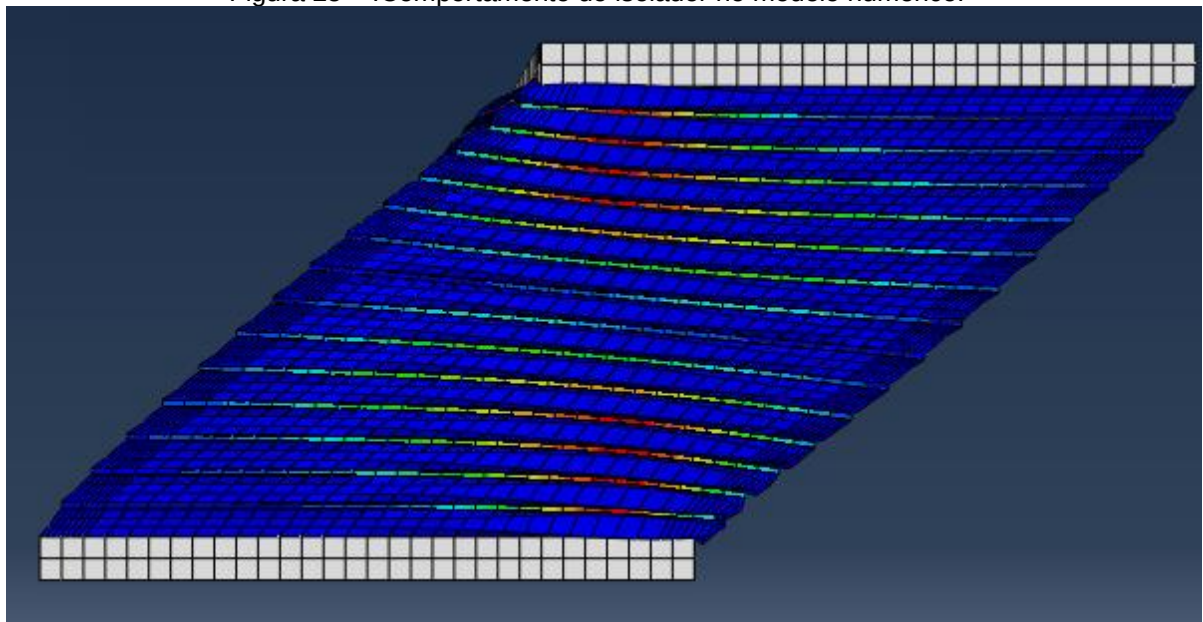
numérico, respectivamente. Dessas figuras observa-se o comportamento semelhante de ambos.

Figura 24 – .Comportamento do isolador durante ensaio experimental.



Fonte: Gauron *et al* (2018).

Figura 25 – .Comportamento do isolador no modelo numérico.

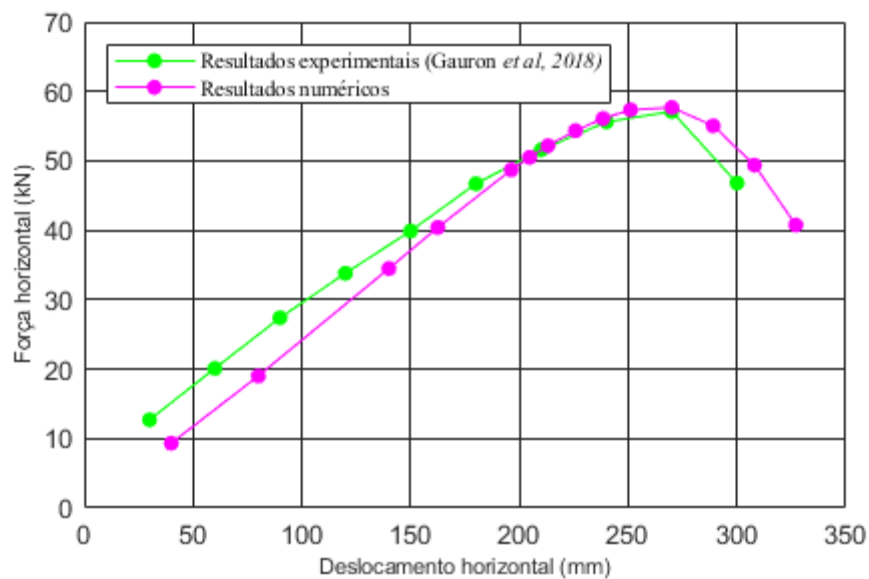


Fonte: Dados do autor.

Após análise dos aspectos qualitativos do modelo, relacionados ao seu comportamento mecânico foram realizadas as verificações quantitativas, realizando-se comparações com os resultados experimentais obtidos por Gauron *et al* (2018).

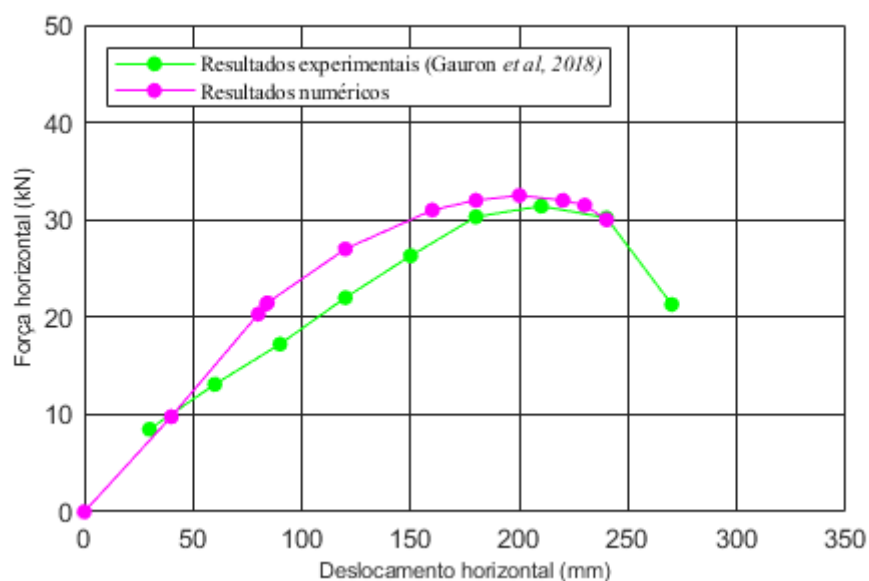
Na Figura 26 e na Figura 27 são apresentados os resultados das curvas de comportamento ao cisalhamento do isolador analisado para tensões de compressão de 5,0 MPa e 7,5 MPa, respectivamente. O deslocamento horizontal é medido a partir do ponto de referência no centro da chapa superior.

Figura 26 – .Comportamento ao cisalhamento para compressão de 5,0 MPa.



Fonte: Dados do autor e de Gauron *et al* (2018).

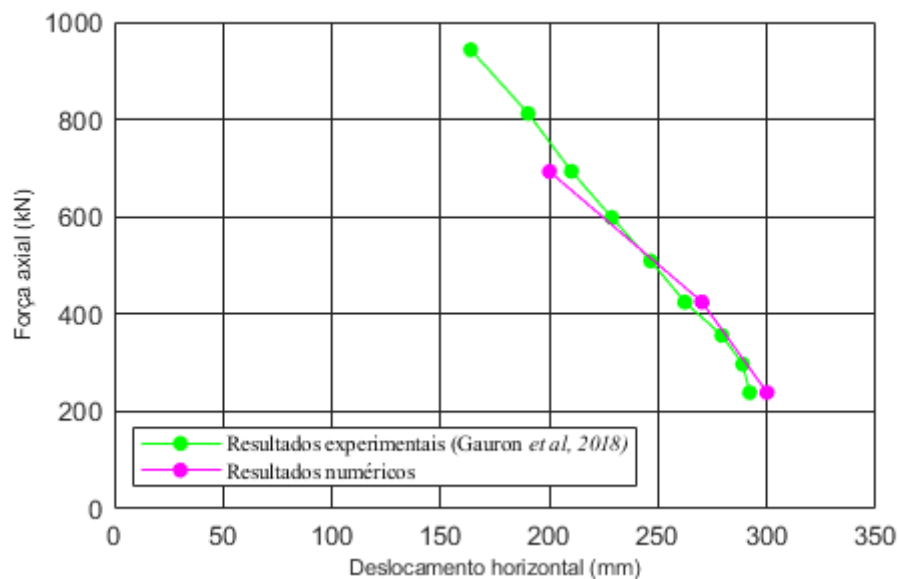
Figura 27 – . Comportamento ao cisalhamento para compressão de 7,5 MPa.



Fonte: Dados do autor e de Gauron *et al* (2018).

A partir dos dados da Figura 26 e da Figura 27 e acrescentando dados dos resultados numéricos obtidos para tensões de compressão de 2,5 MPa e de 10,0 MPa, foi elaborada a curva de estabilidade do modelo numérico para o isolador analisado. A curva de estabilidade obtida numericamente é apresentada na Figura 28 em conjunto com a determinada experimentalmente por Gauron *et al* (2018).

Figura 28 – . Curvas de estabilidade do isolador.



Fonte: Dados do autor e de Gauron *et al* (2018)

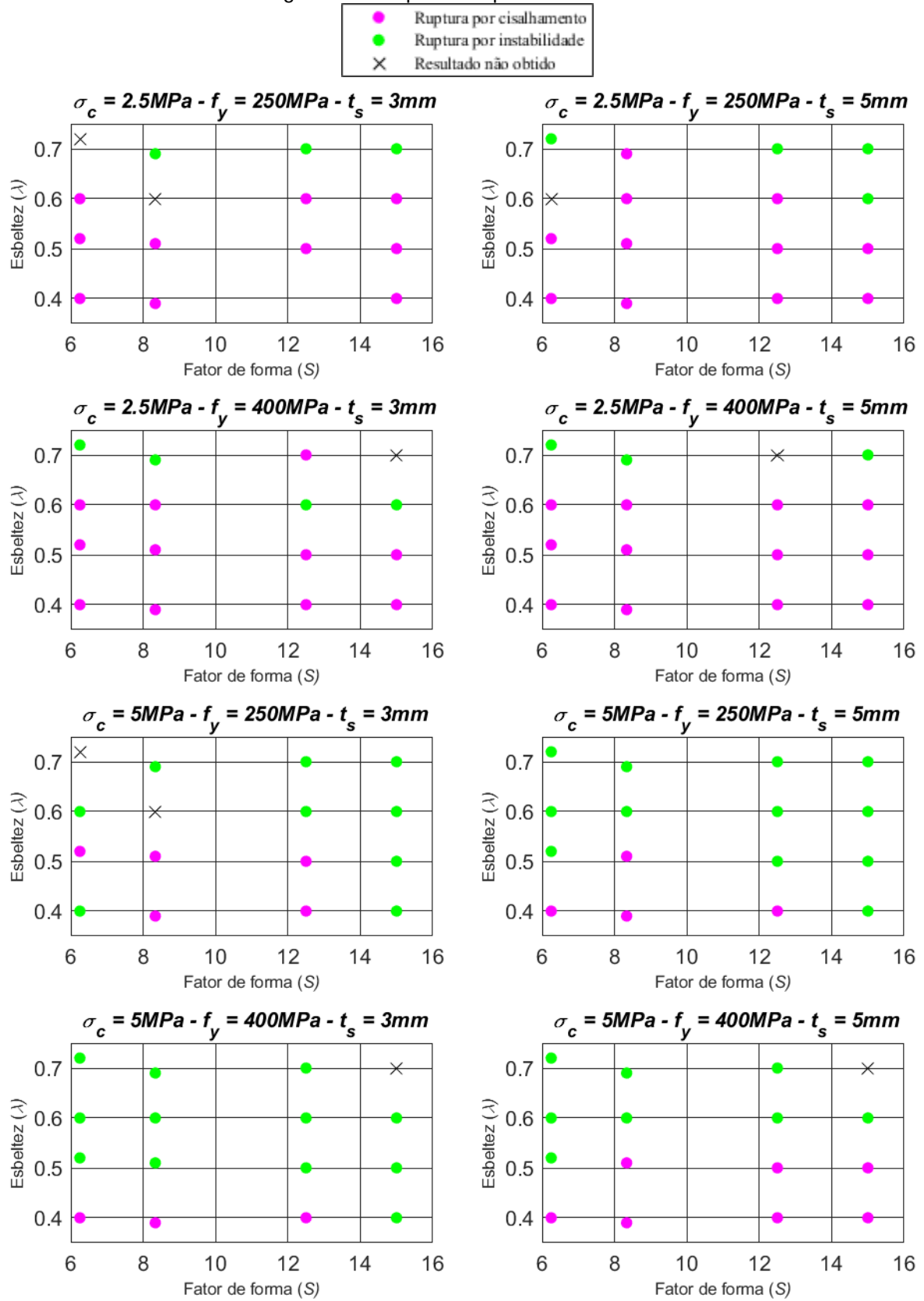
A partir da Figura 28 é possível observar que os resultados obtidos numericamente são muito próximos aos obtidos experimentalmente.

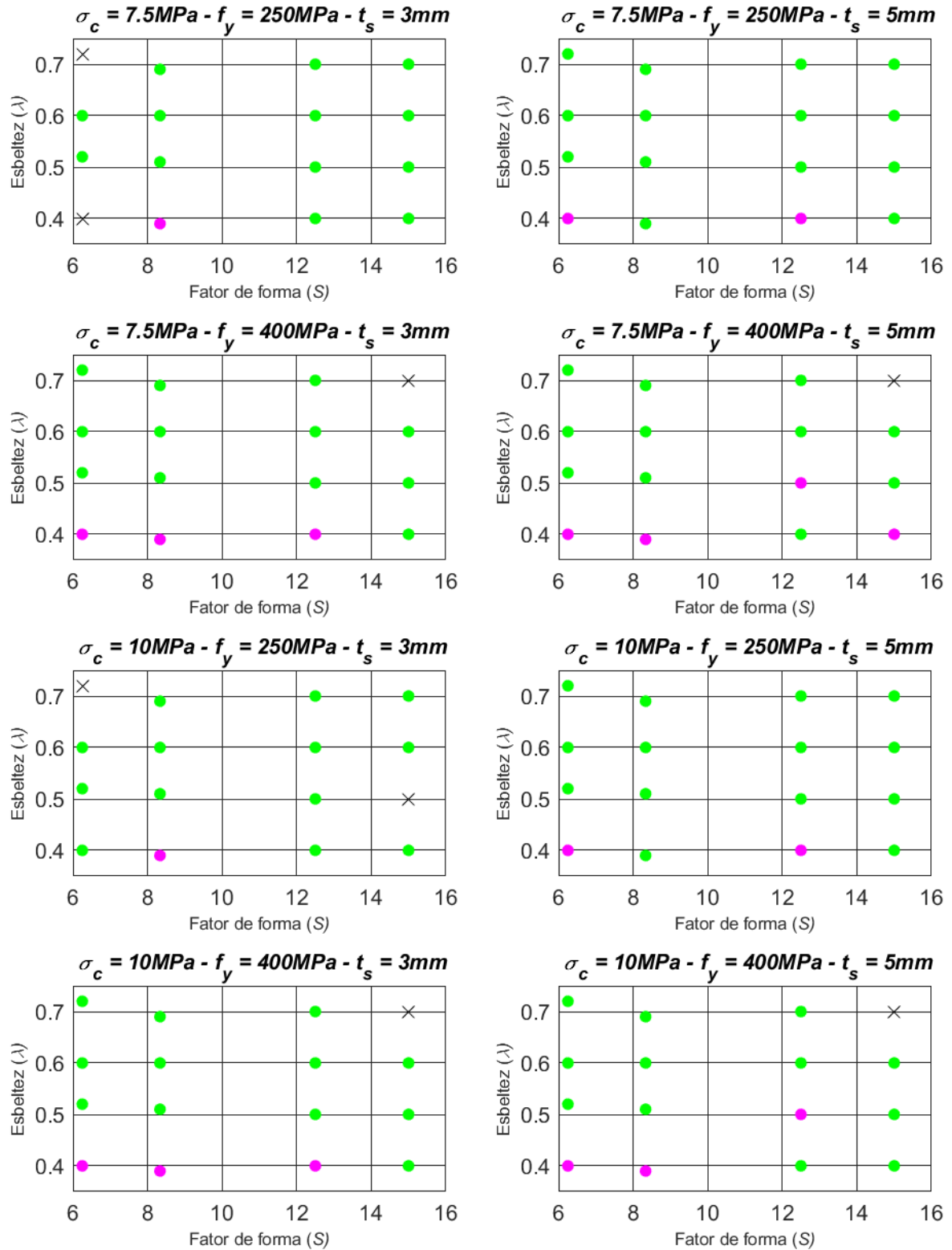
Dessa forma, considera-se que o comportamento do modelo numérico do isolador está calibrado e pode ser utilizado para determinação das propriedades e comportamento dos isoladores do espaço amostral apresentado na Tabela 5.

4.2. AVALIAÇÃO DOS TIPOS DE RUPTURA PARA O ESTADO LIMITE COMPLETO

Como citado anteriormente, para o Estado Limite Completo, há dois tipos de ruptura, por cisalhamento e por instabilidade. A seguir são apresentados gráficos mostrando os tipos de ruptura observados para cada um dos modelos, com base nos parâmetros estudados e os patamares de tensão. Observa-se que devido à problemas de convergência não foi possível obter os resultados de alguns pontos específicos.

Figura 29 – . Tipos de ruptura dos modelos.





Observa-se da Figura 29 que para baixas tensões de compressão a ruptura é predominantemente por cisalhamento, com exceção dos isoladores com valores de esbeltez altos. À medida que a tensão de compressão vai aumentando, o tipo de

ruptura passa a ser predominantemente por instabilidade, com exceção dos isoladores de valores de esbeltez baixos.

O comportamento observado está dentro do esperado de isoladores sísmicos, visto que para baixas tensões de compressão a carga atuante no isolador é reduzida, de forma que para a sua instabilidade ser atingida este deve ser mais esbelto, parâmetro que resulta em cargas axiais críticas inferiores.

O oposto também é válido, de forma que para isoladores menos esbeltos, as tensões atuantes devem ser maiores, visto que a carga crítica resultante de uma esbeltes alta é inferior para valores reduzidos de esbeltez.

Observa-se também que, embora os parâmetros de tensão de compressão e esbeltez sejam os mais influentes, os demais parâmetros ainda têm certa influência. Dentre estes, destaca-se o fator de forma, sendo possível observar que quanto maior o seu valor, maior a suscetibilidade do isolador de atingir o estado limite de instabilidade.

Em relação aos parâmetros referentes às chapas de aço, é possível observar que embora estes sejam menos impactantes, alguns pontos ainda sofrem alteração de estado limite devida às variações destes.

Dessa forma, dos resultados apresentados é possível verificar que para determinação do tipo de estado limite a ser atingido pelo isolador, a tensão de compressão e a esbeltes são os mais relevantes, embora, os demais parâmetros estudados ainda sejam impactantes em alguns casos.

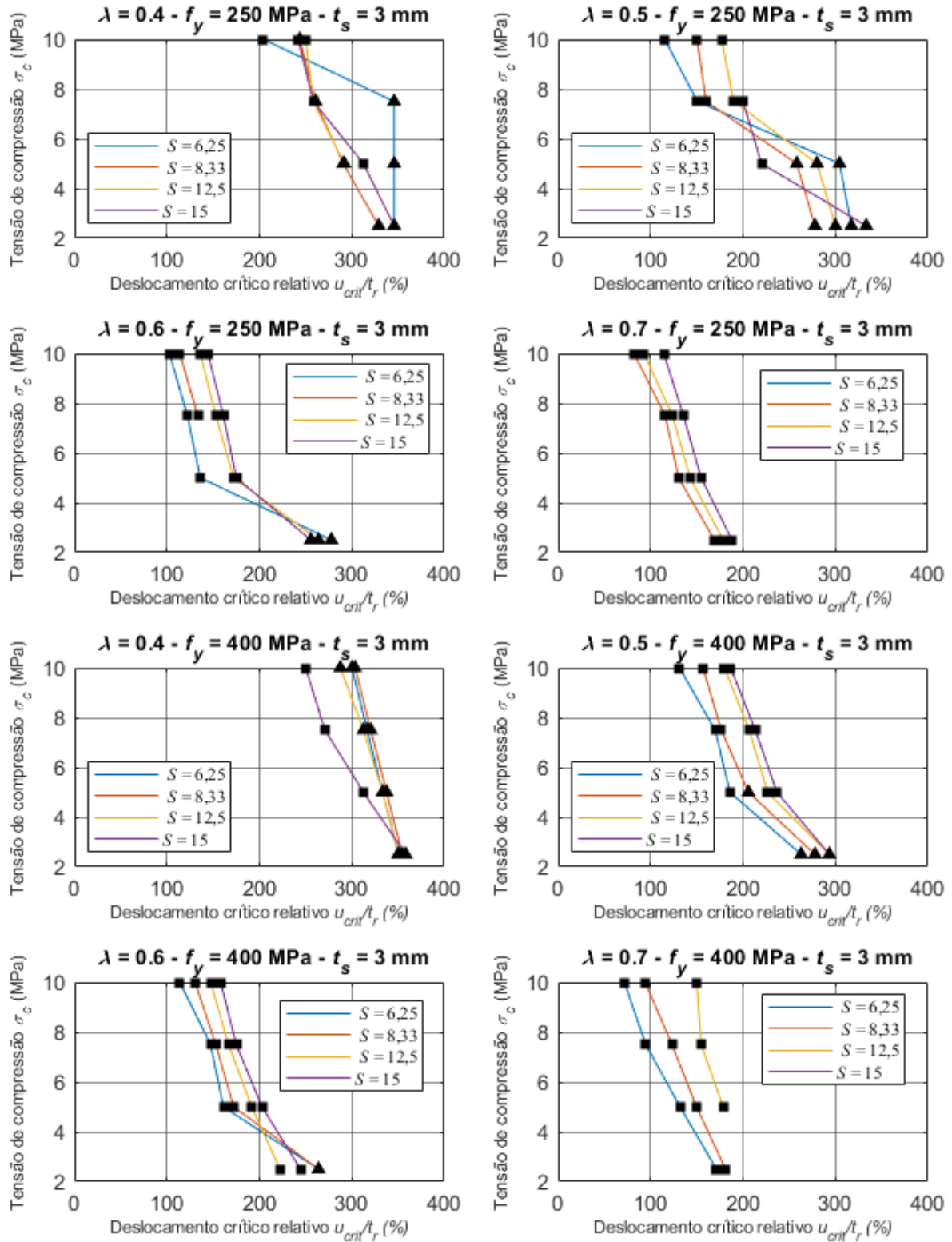
4.3. ANÁLISE PARAMÉTRICA: ESTADO LIMITE COMPLETO

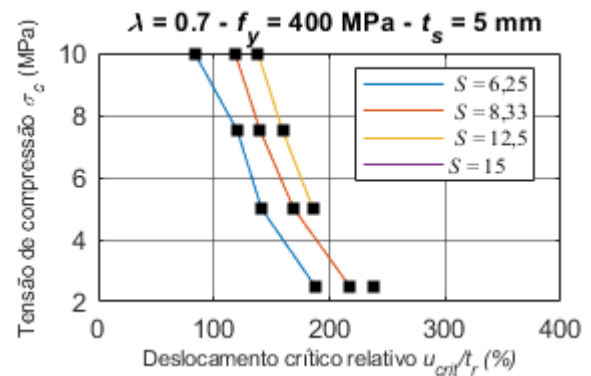
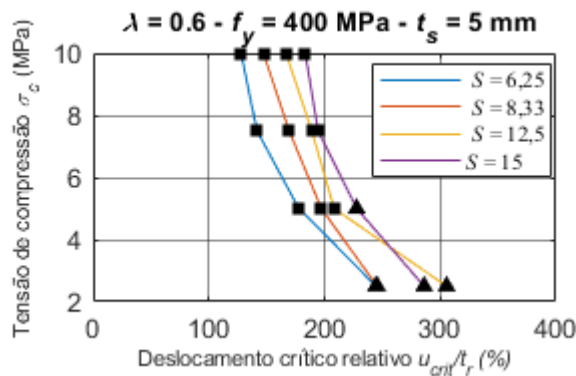
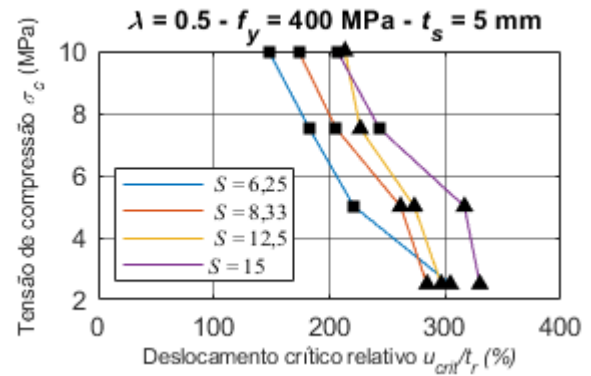
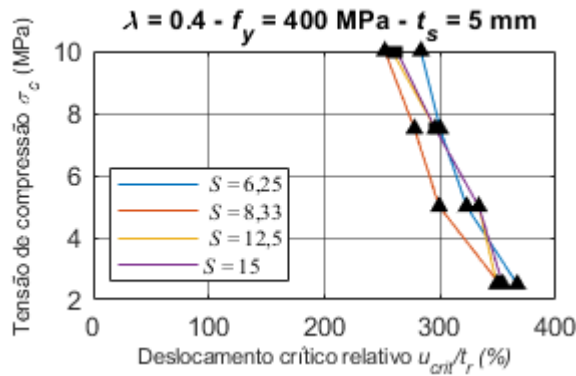
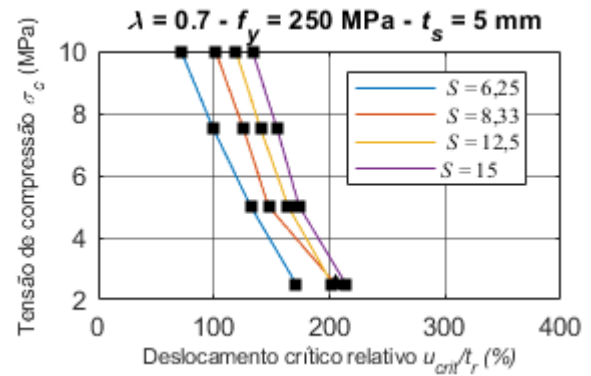
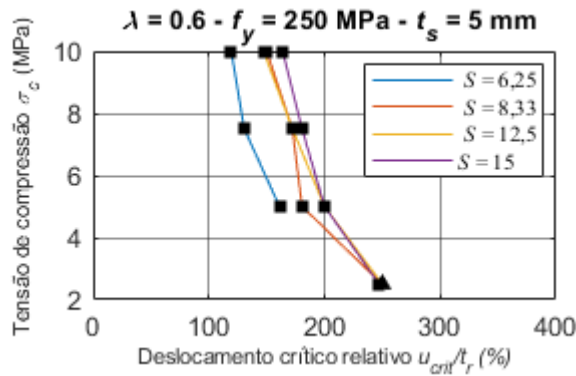
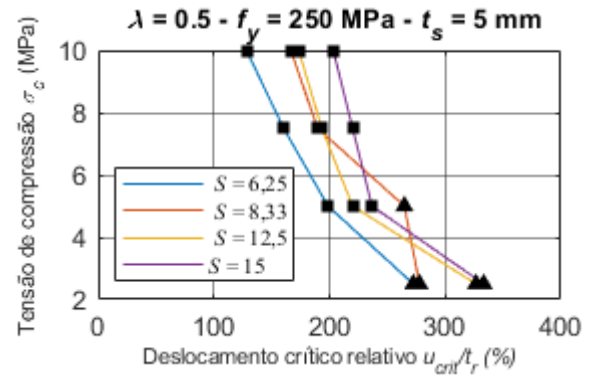
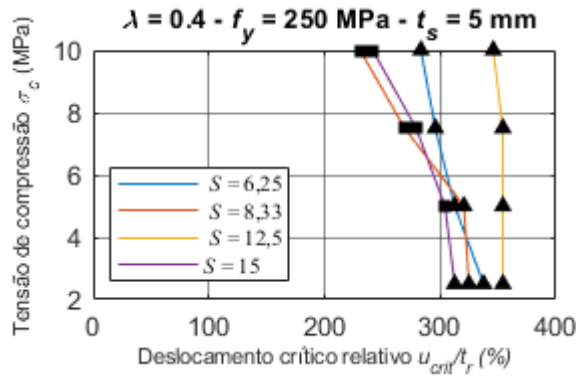
A seguir, são apresentadas as análises paramétricas dos isoladores para cada um dos parâmetros estudados. Ao fim da apresentação dos gráficos é realizada a discussão a respeito desses parâmetros.

Observa-se que, nos gráficos, os quadrados representam ruptura por instabilidade e os triângulos ruptura por cisalhamento.

4.3.1. INFLUÊNCIA DO FATOR DE FORMA

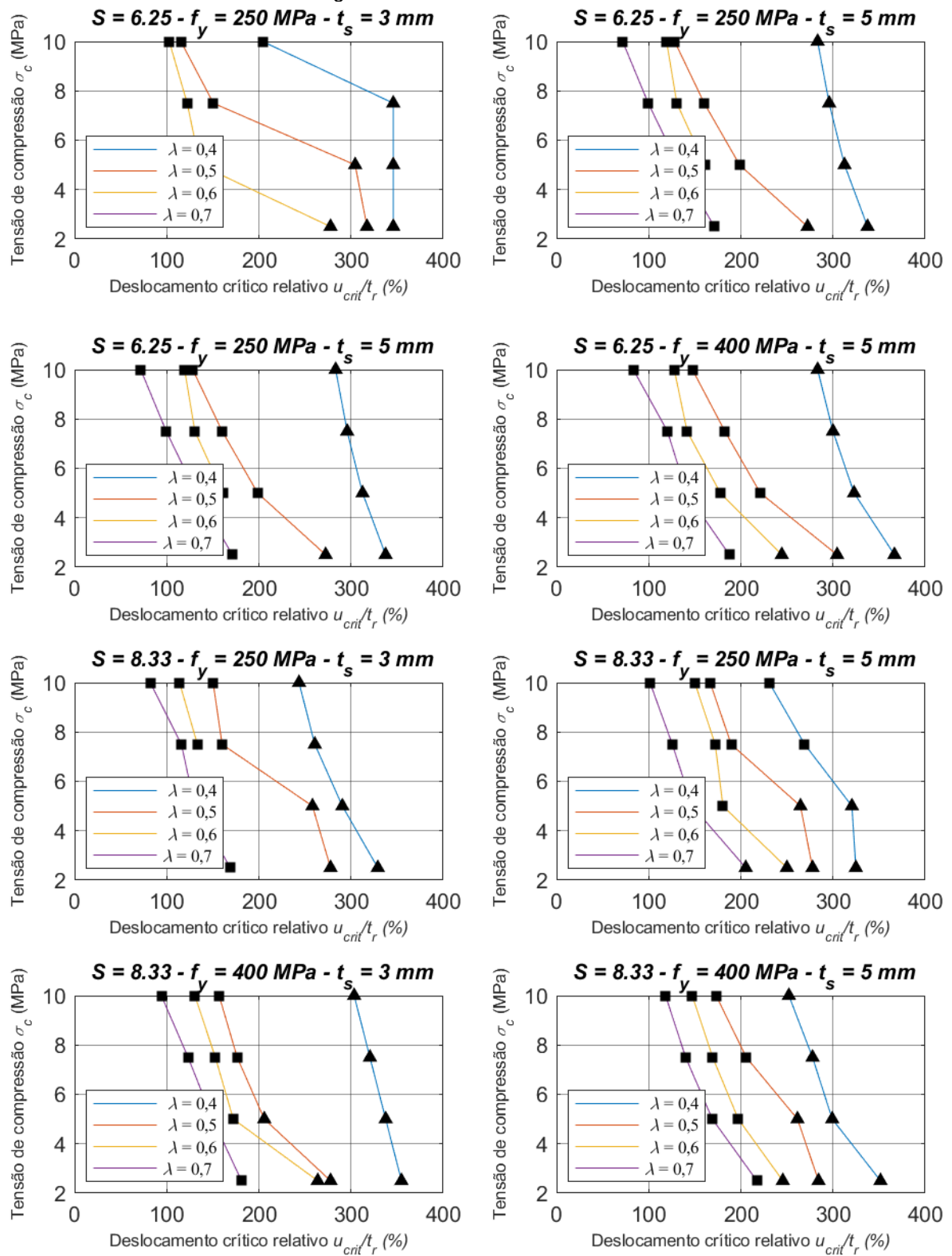
Figura 30 – Influência do fator de forma.

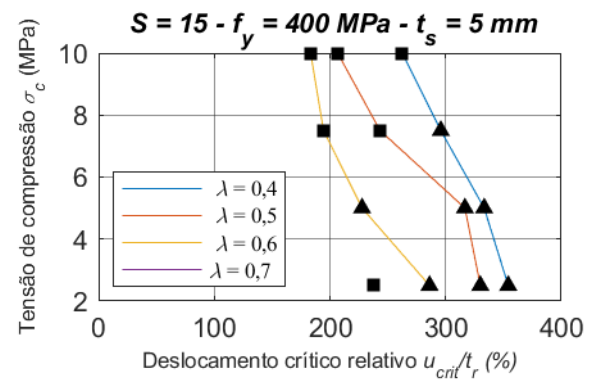
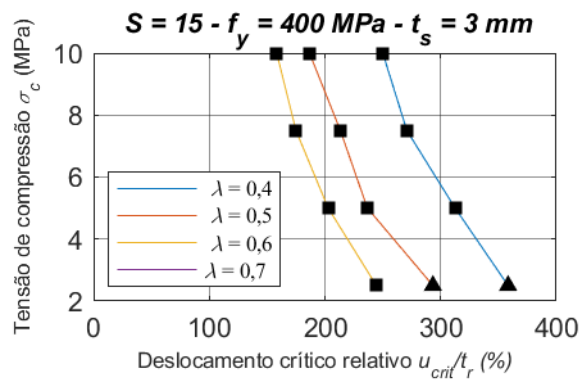
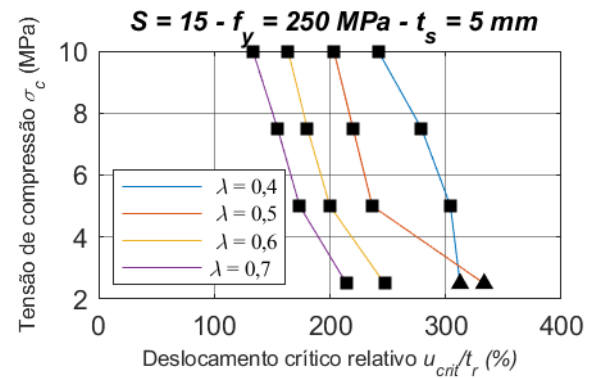
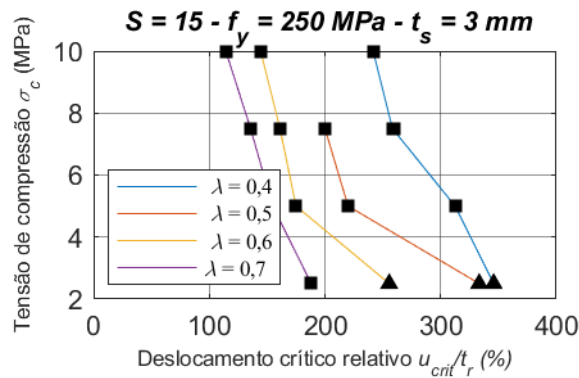
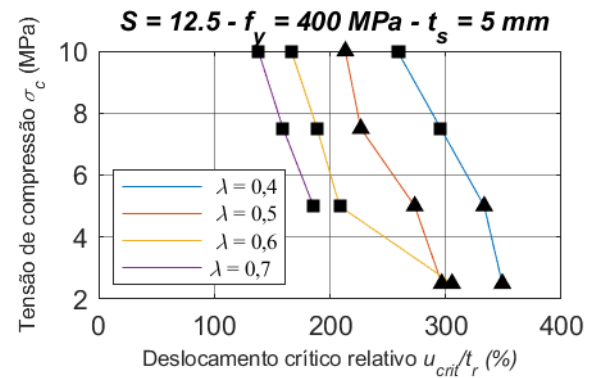
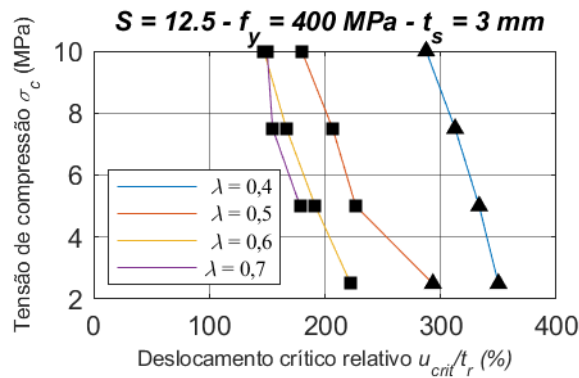
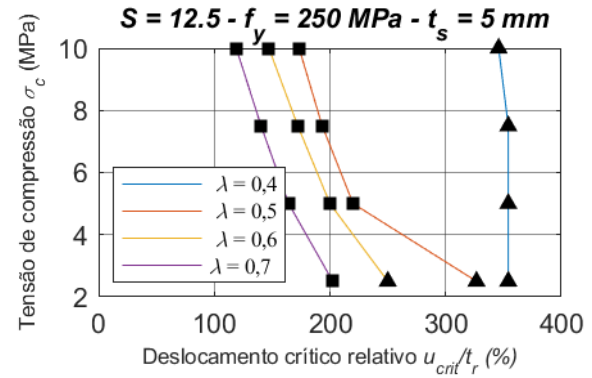
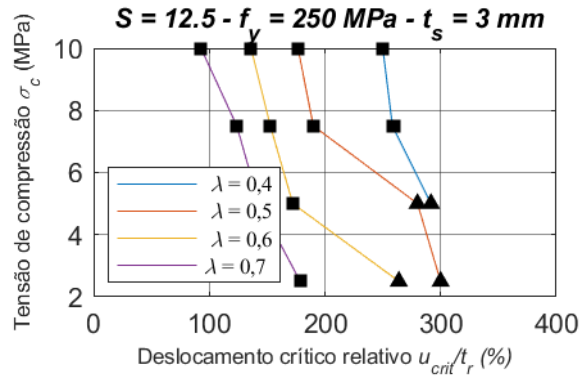




4.3.2. Influência da esbeltez

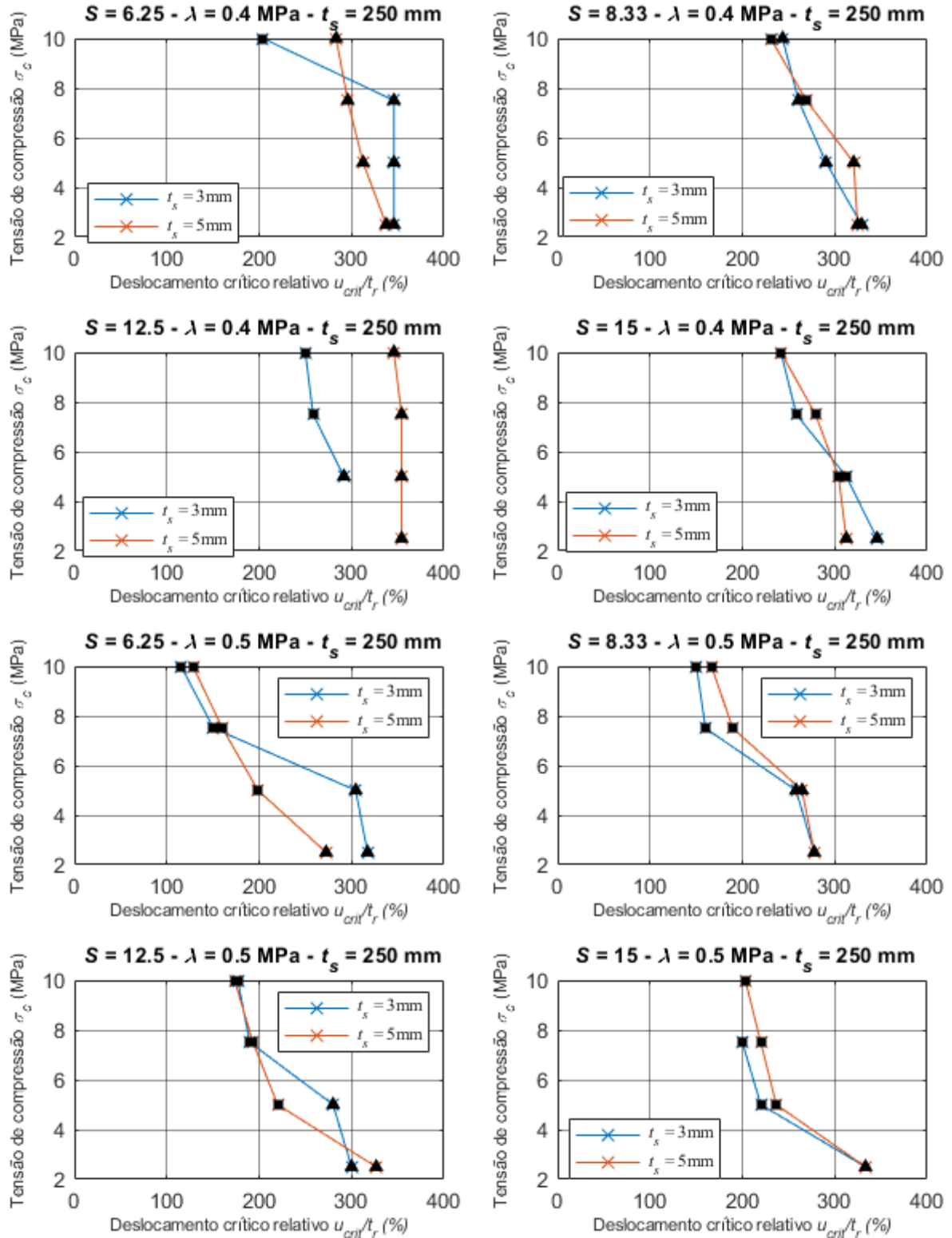
Figura 31 – Influência da esbeltez.

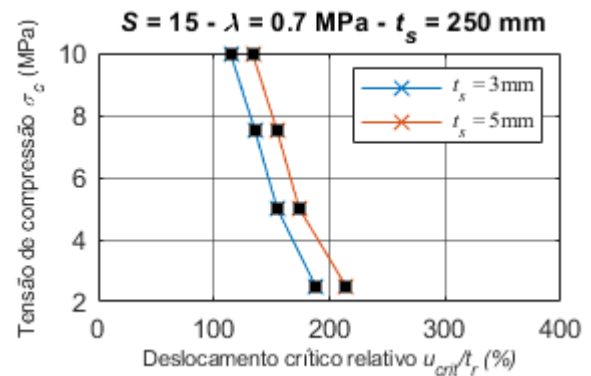
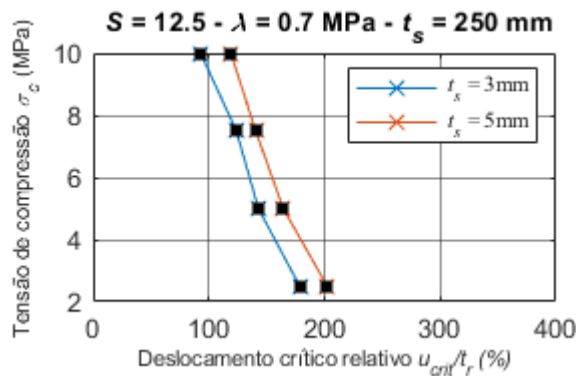
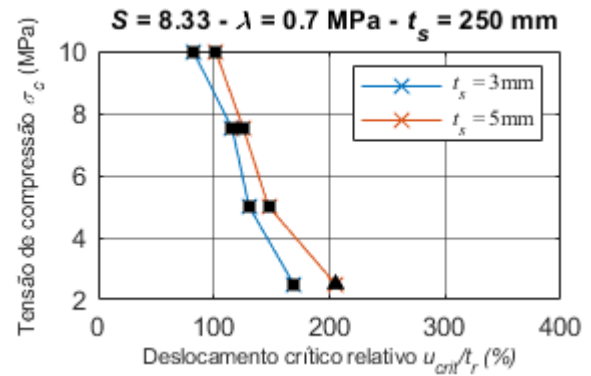
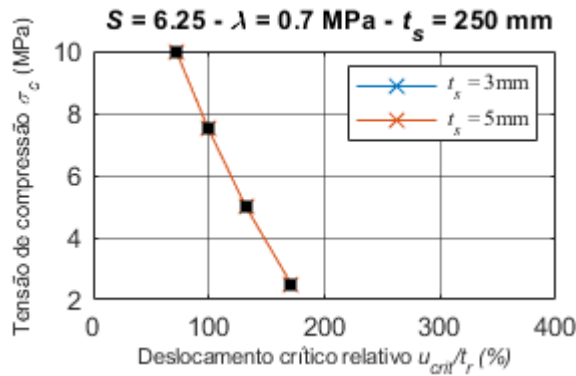
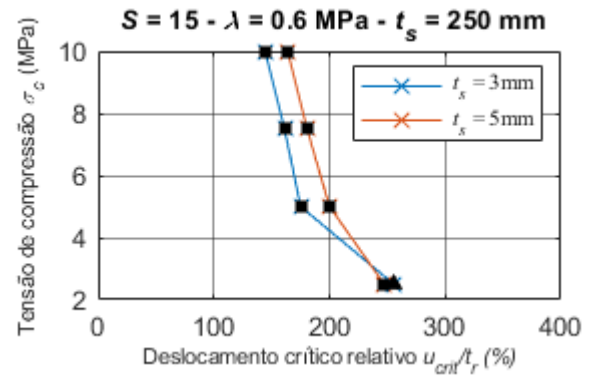
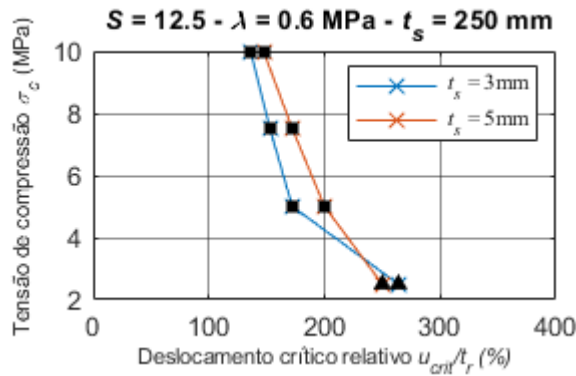
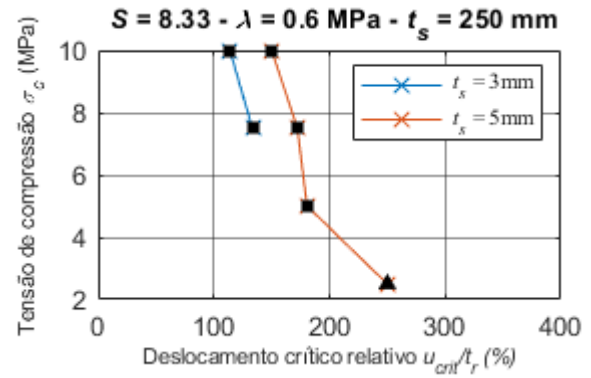
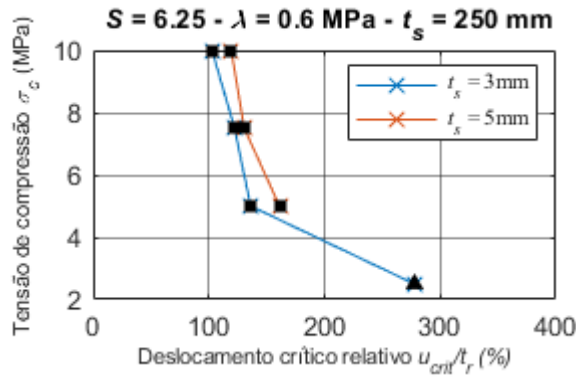


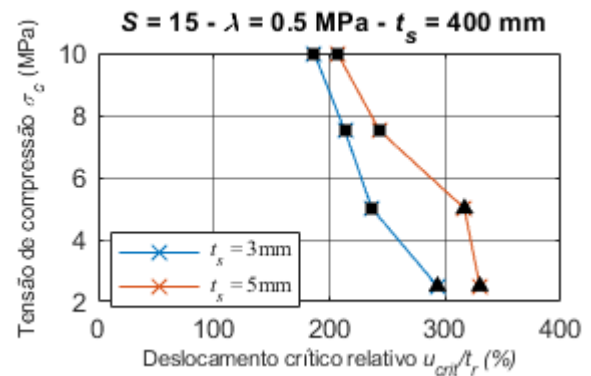
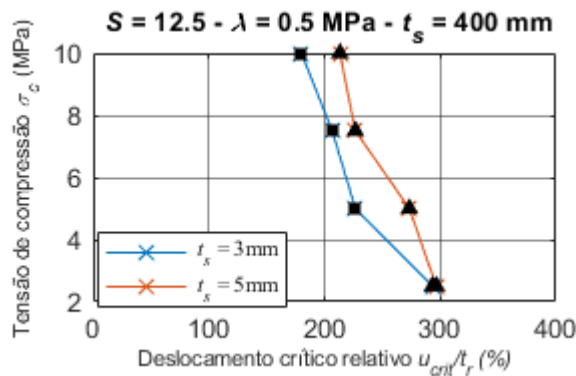
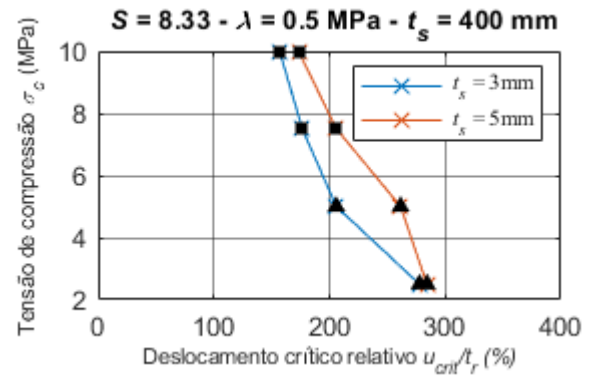
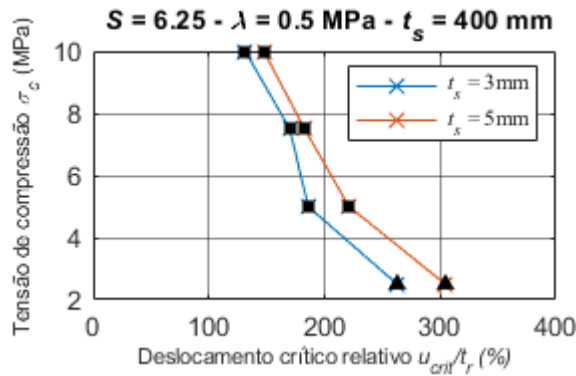
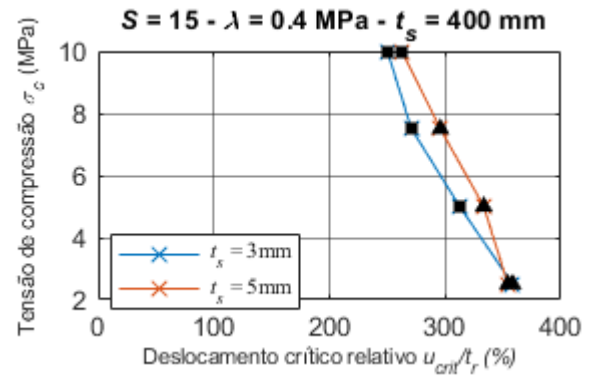
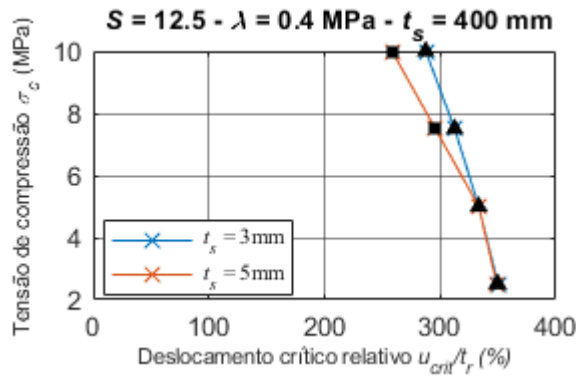
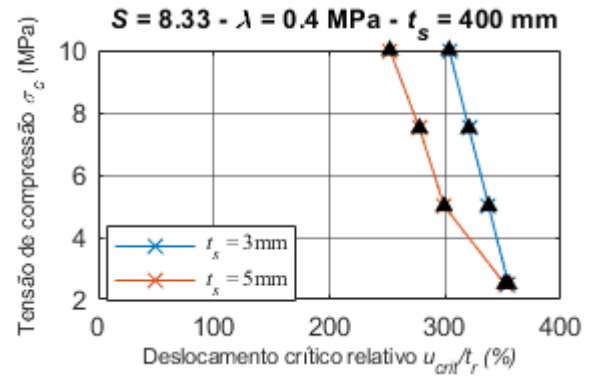
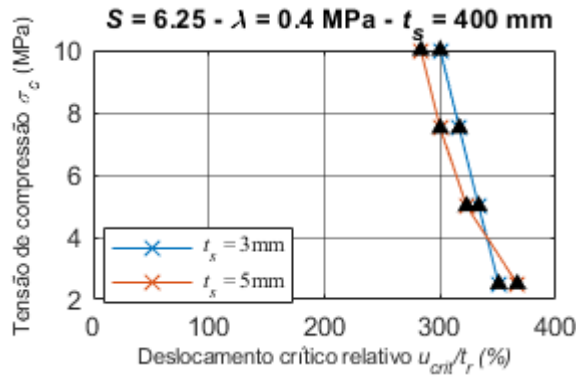


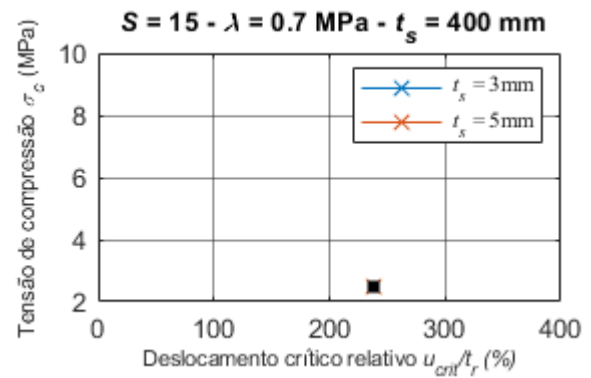
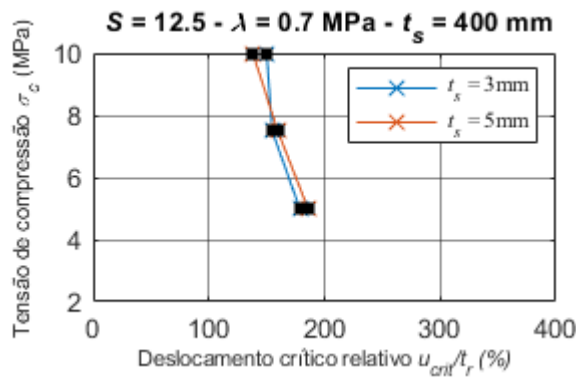
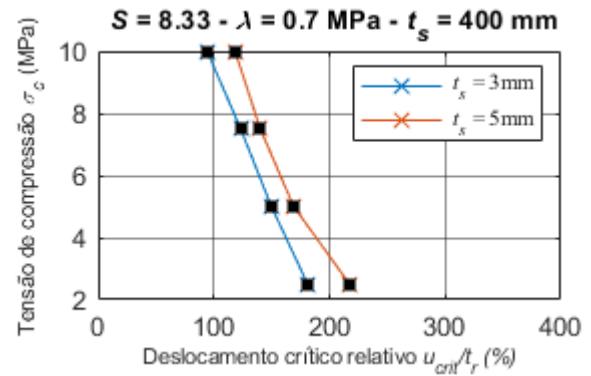
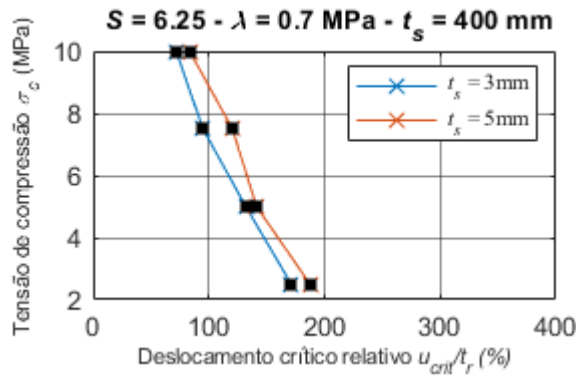
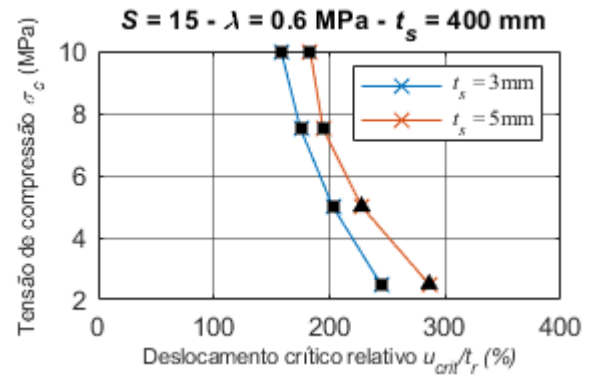
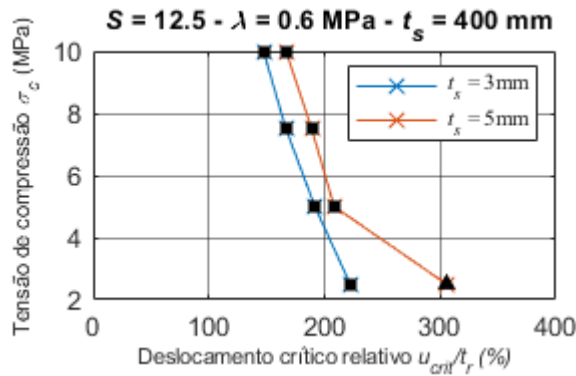
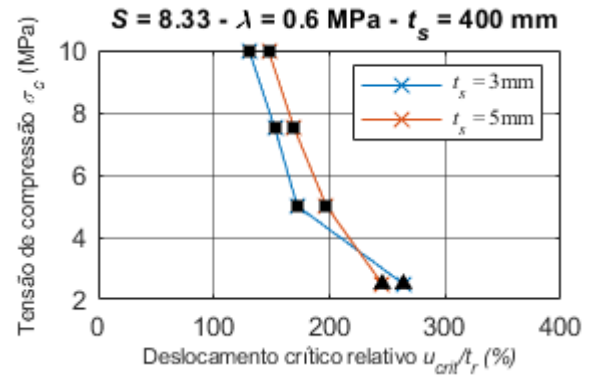
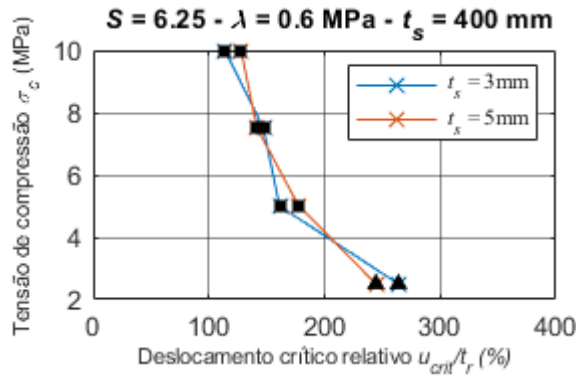
4.3.3. INFLUÊNCIA DA ESPESSURA DAS CHAPAS DE AÇO

Figura 32 – Influência da espessura das chapas de aço



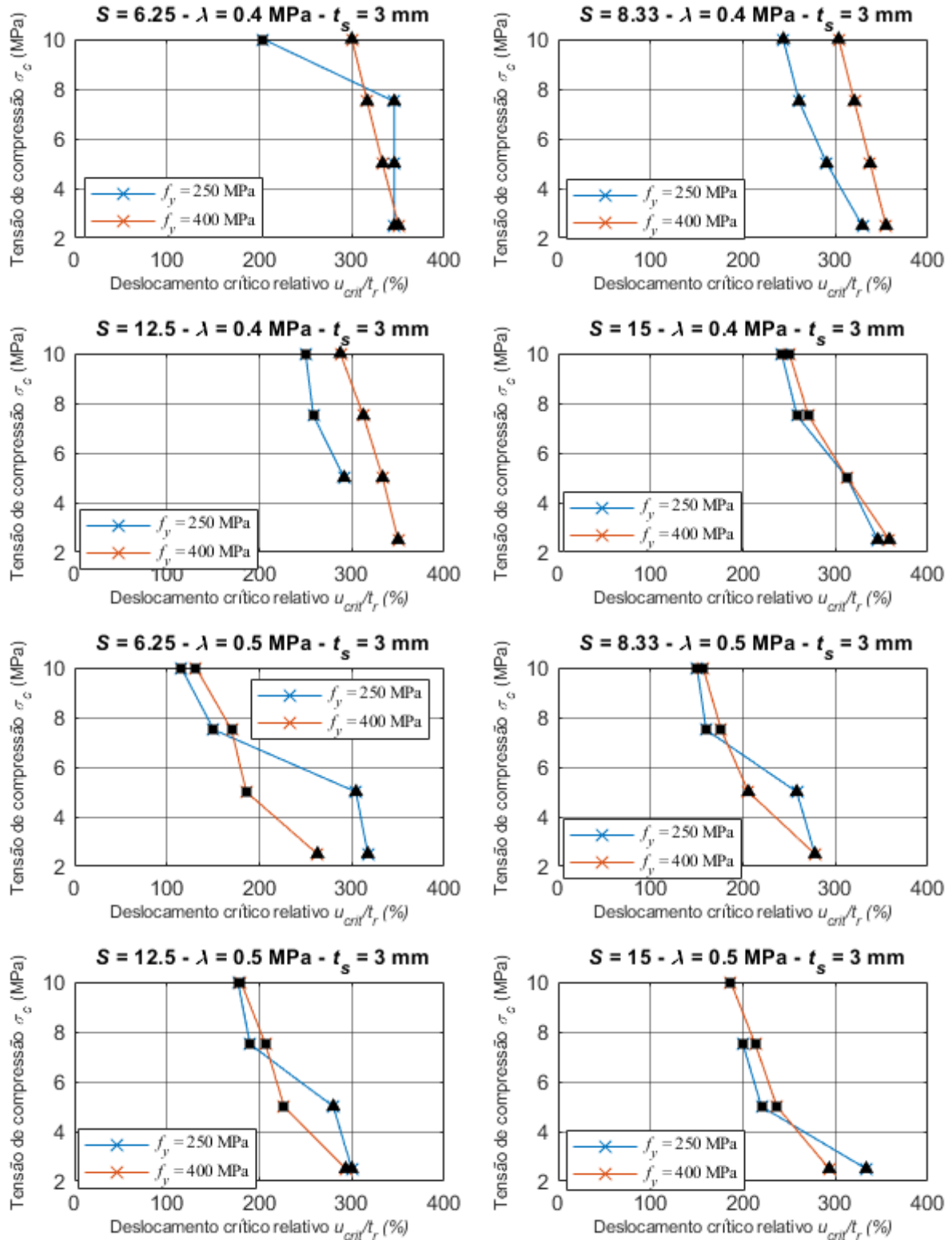


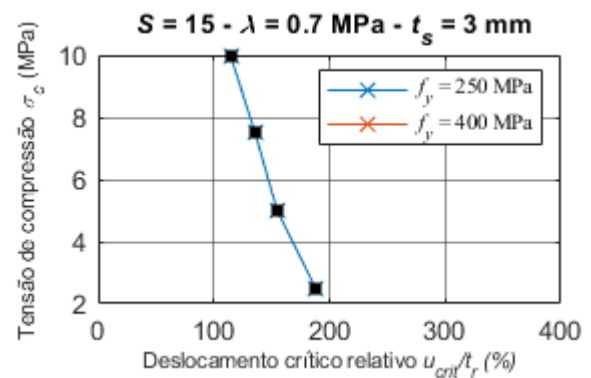
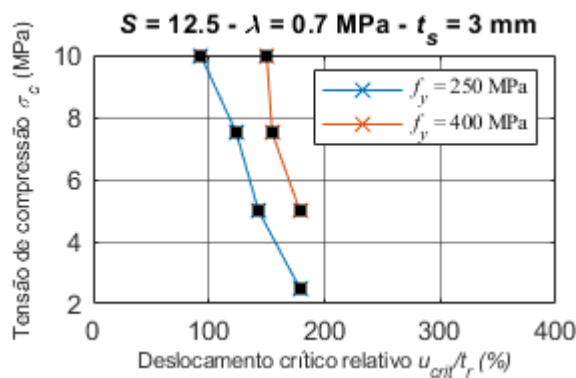
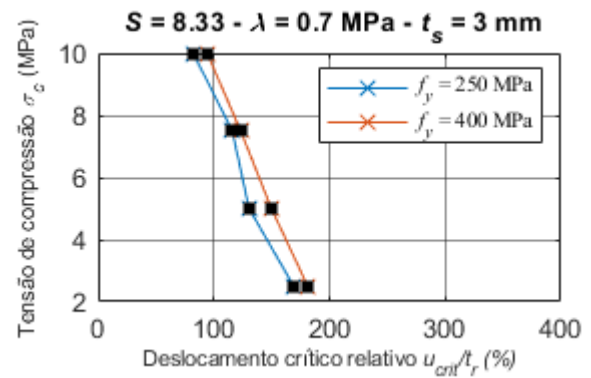
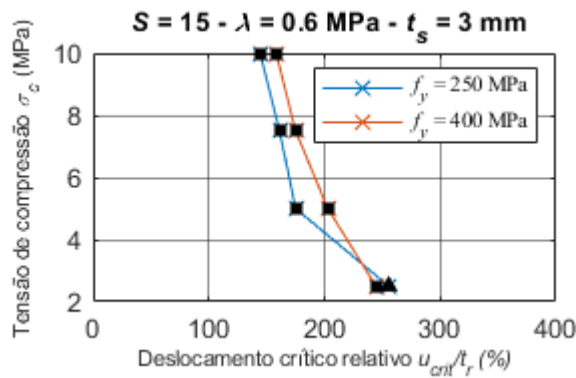
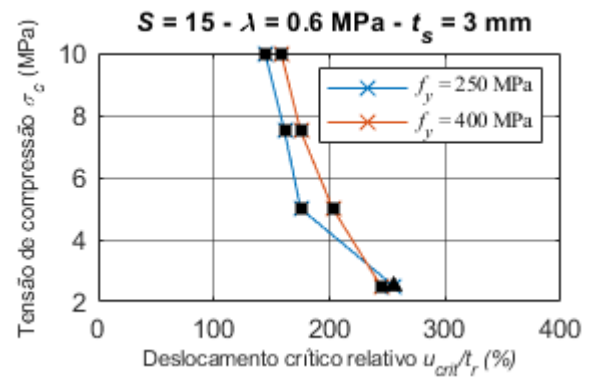
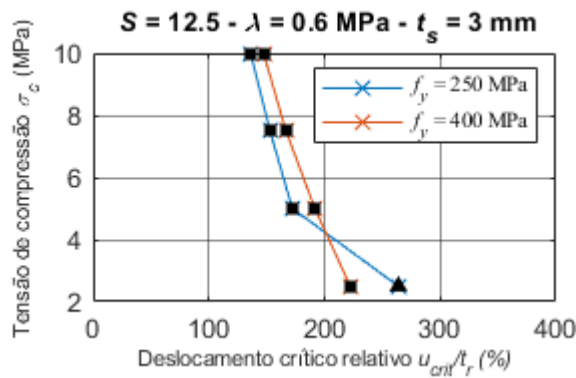
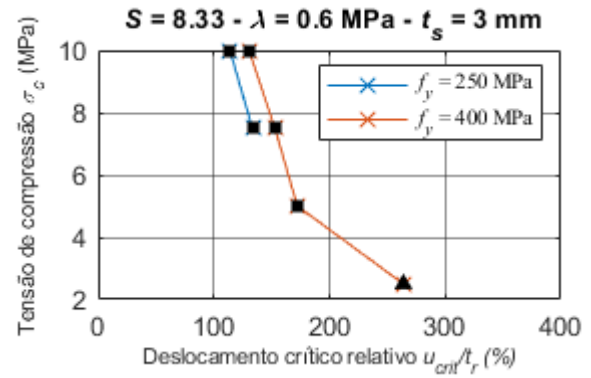
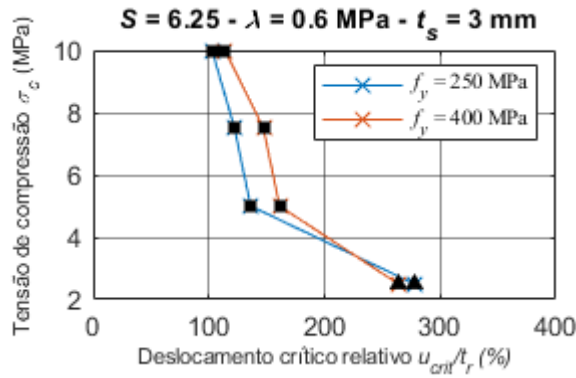


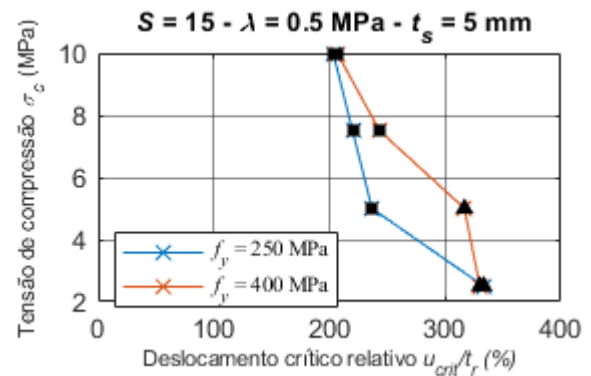
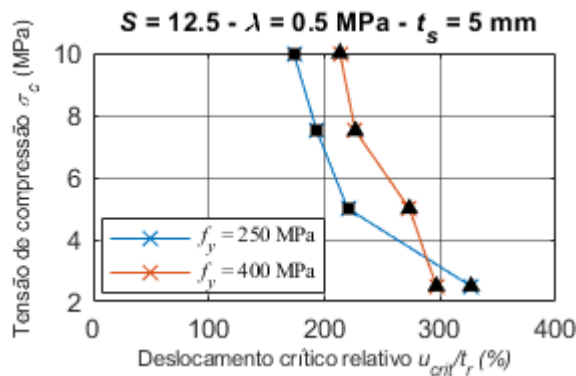
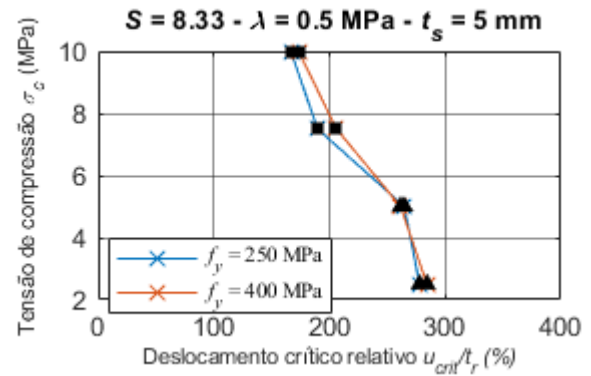
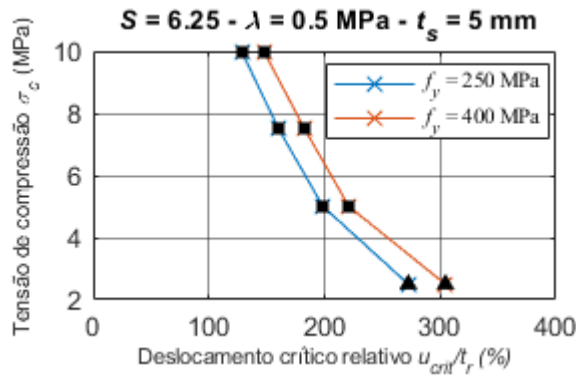
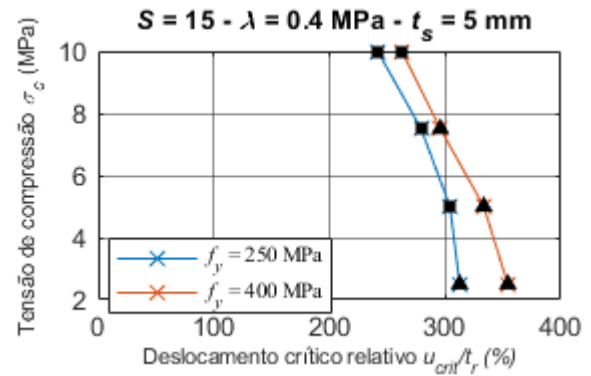
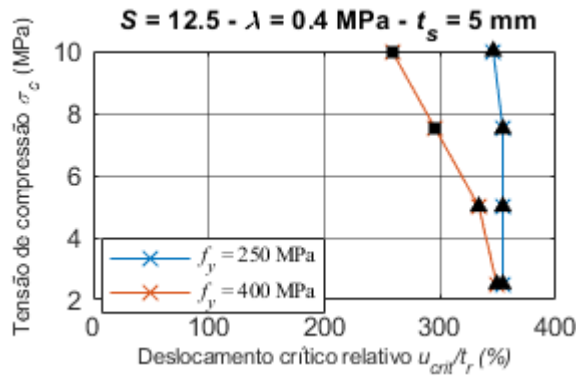
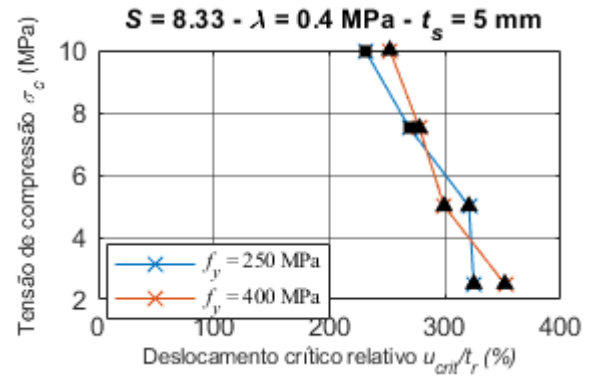
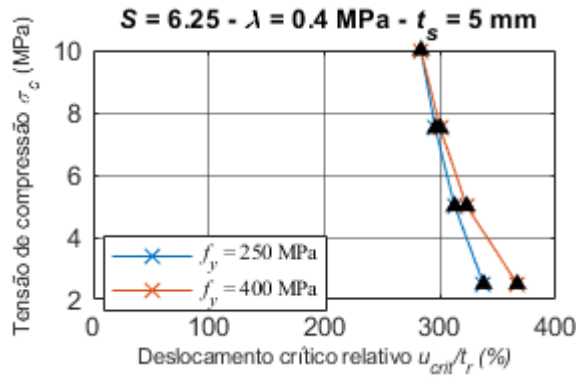


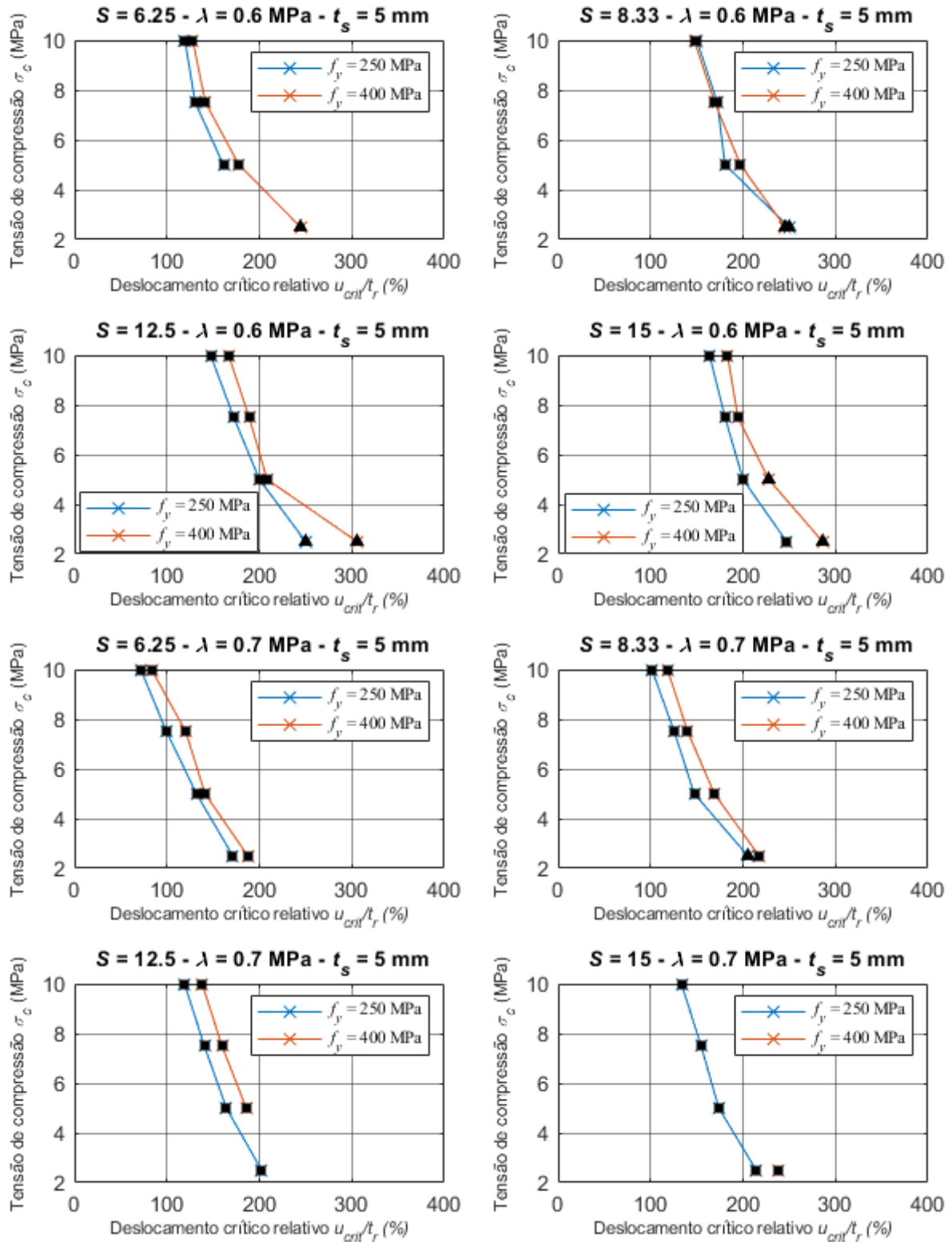
4.3.4. INFLUÊNCIA DA TENSÃO DE ESCOAMENTO DAS CHAPAS DE AÇO

Figura 33 – Influência da tensão de escoamento das chapas de aço.









4.3.5. AVALIAÇÃO DA ANÁLISE PARAMÉTRICA

Para auxiliar a avaliação da análise paramétrica, foram elaboradas as Tabelas 6 a 9, essas tabelas contemplam a média e o desvio padrão da diferença

entre os valores máximos e mínimos de cada um dos gráficos para os diferentes patamares.

Tabela 6 – Médias e desvios padrões das diferenças entre fatores de forma.

Patamar	Média (%)	Desv. Pad. (%)
2,5 MPa	33	19
5,0 MPa	49	19
7,5 MPa	50	19
10,0 MPa	57	20

Fonte: Dados do autor.

Tabela 7 – Médias e desvios padrões das diferenças entre esbeltez.

Patamar	Média (%)	Desv. Pad. (%)
2,5 MPa	134	37
5,0 MPa	161	31
7,5 MPa	158	42
10,0 MPa	152	49

Fonte: Dados do autor.

Tabela 8 – Médias e desvios padrões das diferenças entre espessura das chapas de aço.

Patamar	Média (%)	Desv. Pad. (%)
2,5 MPa	18	19
5,0 MPa	28	24
7,5 MPa	22	18
10,0 MPa	22	21

Fonte: Dados do autor.

Tabela 9 – Médias e desvios padrões das diferenças entre tensão de escoamento das chapas de aço.

Patamar	Média (%)	Desv. Pad. (%)
2,5 MPa	17	17
5,0 MPa	26	25
7,5 MPa	19	15
10,0 MPa	20	24

Fonte: Dados do autor.

Das tabelas apresentadas, é possível observar o comportamento do isolador para diversas condições dos parâmetros estudados. Como o estudo do tipo de estado limite atingido foi realizado anteriormente, a avaliação desta será feita observando-se o impacto quantitativo da variação desses parâmetros no deslocamento crítico dos isoladores.

Como as Tabelas 6 a 9 apresentam as médias das diferenças entre os valores máximos e mínimos dos deslocamentos críticos, tem-se que quanto maior esse valor para determinado parâmetro, maior a influência deste no comportamento do isolador.

Partindo dessa consideração, é possível observar que, para o estado limite completo, o parâmetro mais influente é a esbeltez, a qual apresenta valores de variação de deslocamento crítico de 134% a 161%, dependendo da carga axial aplicada. Após a esbeltez, o parâmetro mais relevante é o fator de forma, o qual apresenta resultados variando de 33% a 57%. Desses valores observa-se uma grande diferença entre o impacto dos dois fatores, salientando mais uma vez a alta influência da esbeltez no comportamento dos isoladores, fato este que já havia sido levantado por Gauron *et al.* (2018).

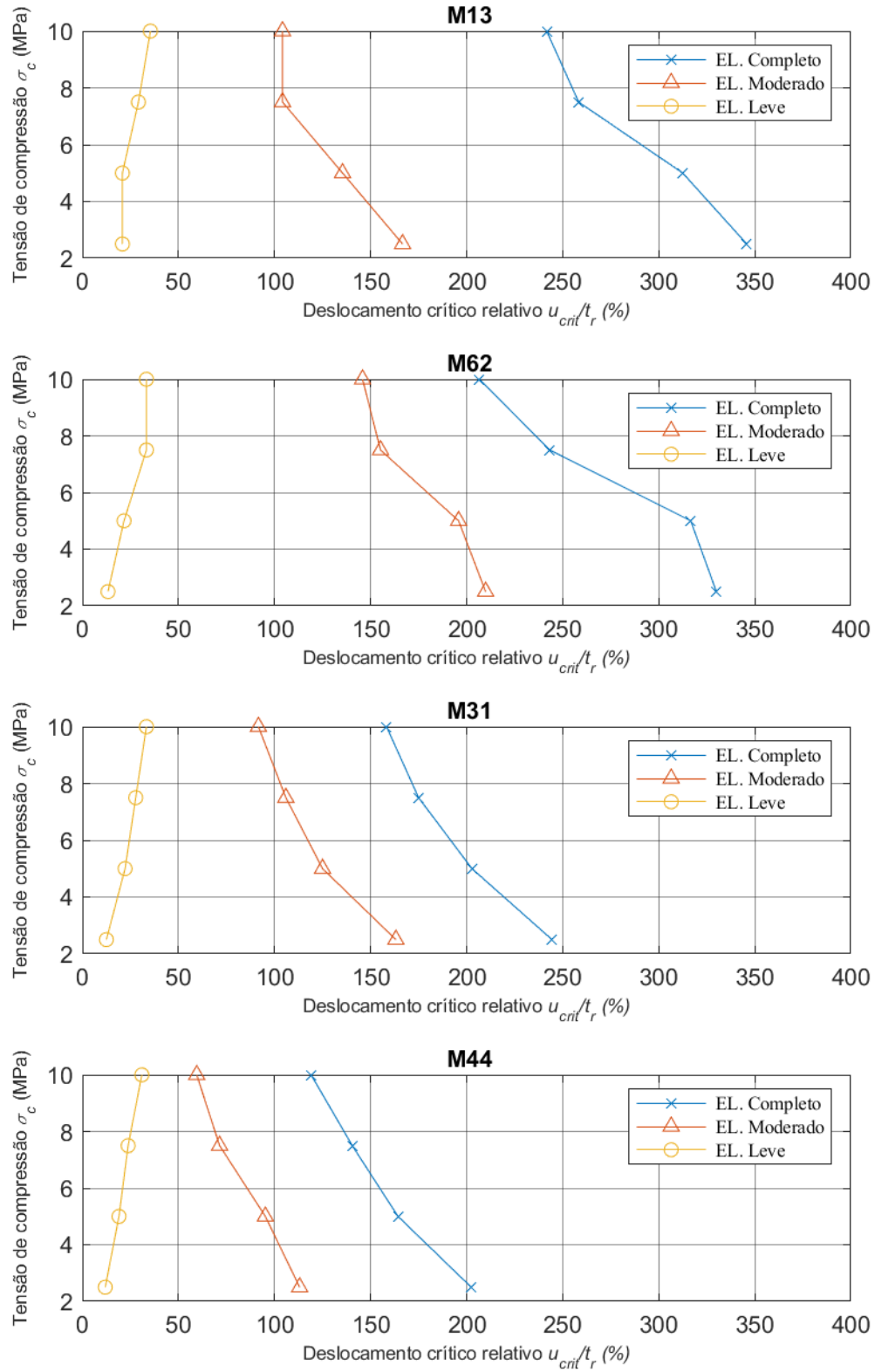
Em relação aos resultados provenientes da variação dos parâmetros relativos às chapas de aço, é possível observar que estes são bem menos impactantes, apresentando variações nos resultados de deslocamento crítico de 17% a 28%. Vale ressaltar que, embora a variação observada seja baixa quando comparada aos demais parâmetros, foram realizadas poucas variações de tensão de escoamento e espessura das chapas de aço, de forma que para valores mais extremos, pode ser que sejam observados resultados diferentes.

4.4. ESTADOS LIMITES INTERMEDIÁRIOS

Para facilitar a visualização e a compreensão da diferença entre os Estados Limites propostos, são apresentados na Figura 34, quatro resultados de modelos contendo todos esses estados limites para diferentes valores de esbeltez.

Após essa apresentação é realizada em seguida a análise paramétrica para os Estados Limites Leve e Moderado, sendo em seguida realizada a avaliação dessa parametrização.

Figura 34 – Apresentação dos estados limites para diferentes modelos.



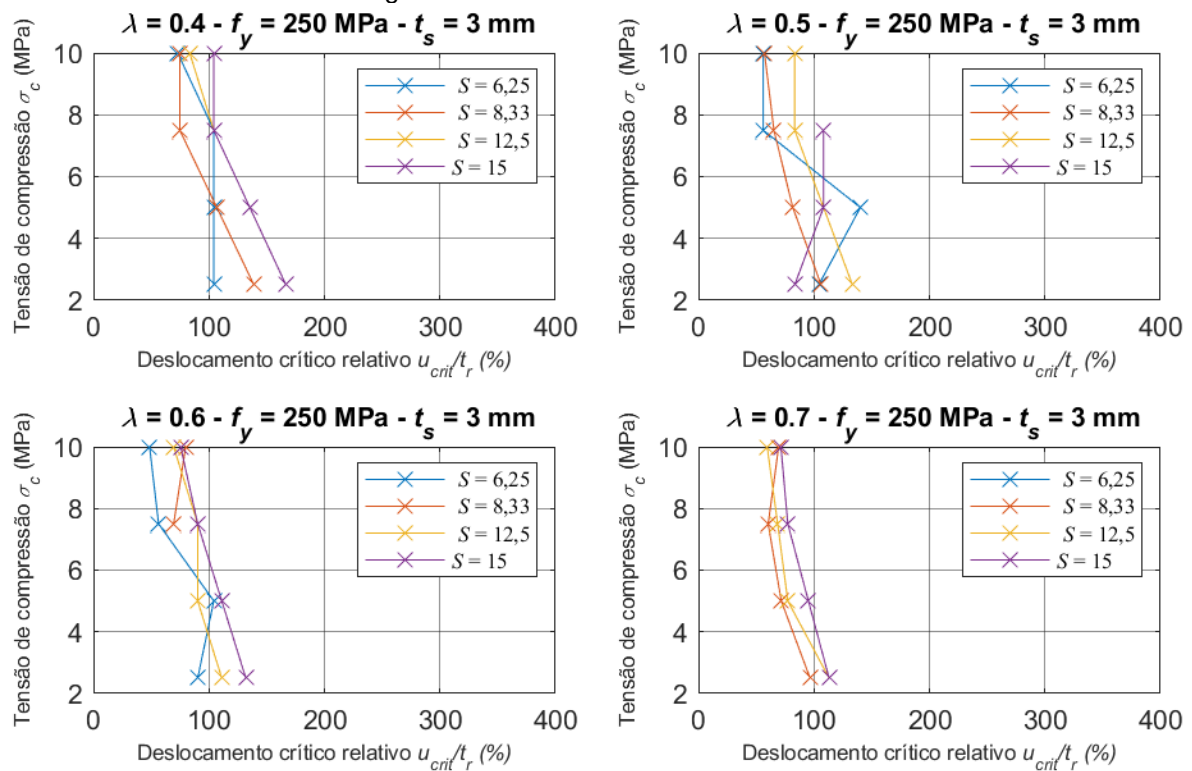
Fonte: Dados do autor.

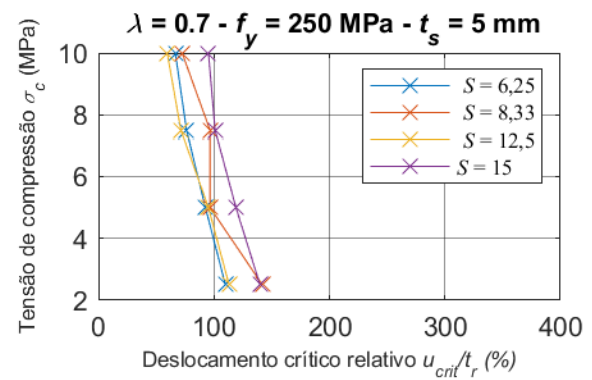
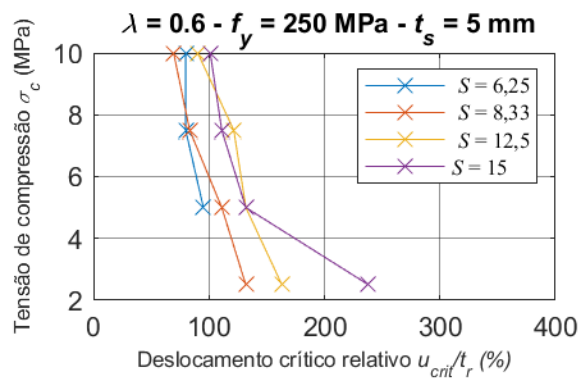
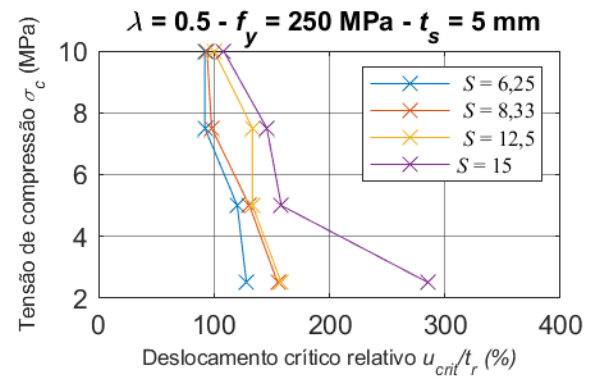
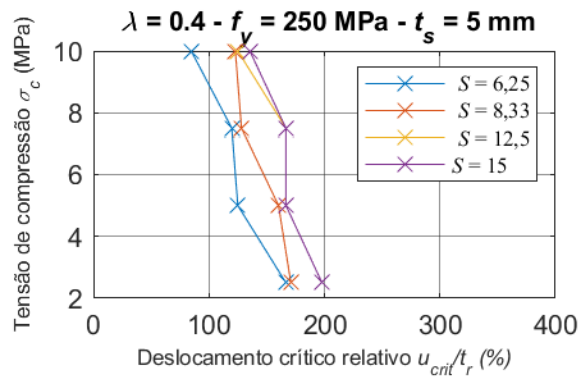
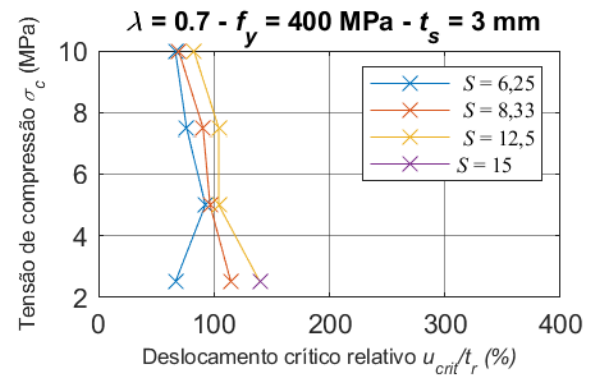
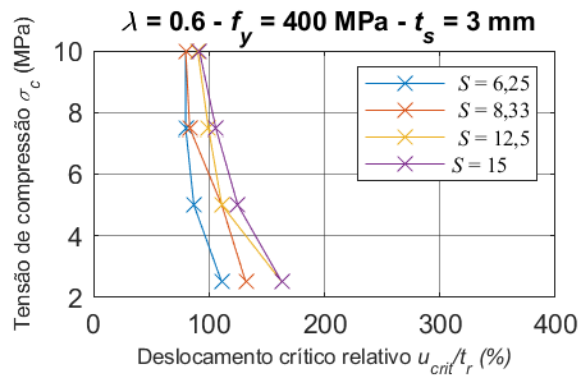
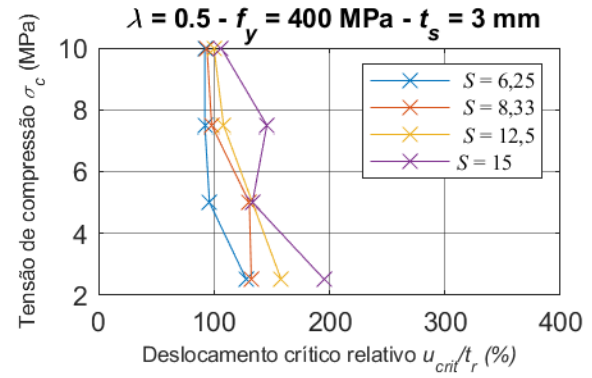
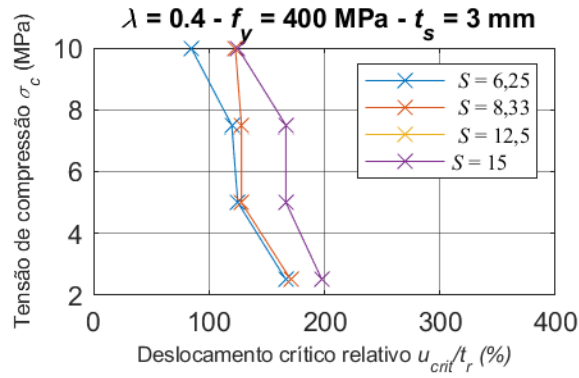
Embora os resultados apresentados na Figura 34 sejam para uma análise preliminar do comportamento dos estados limites avaliados, é possível observar que este está dentro do esperado, de forma que o estado limite completo apresenta os maiores valores de deslocamento crítico, sendo seguido do moderado e então do leve.

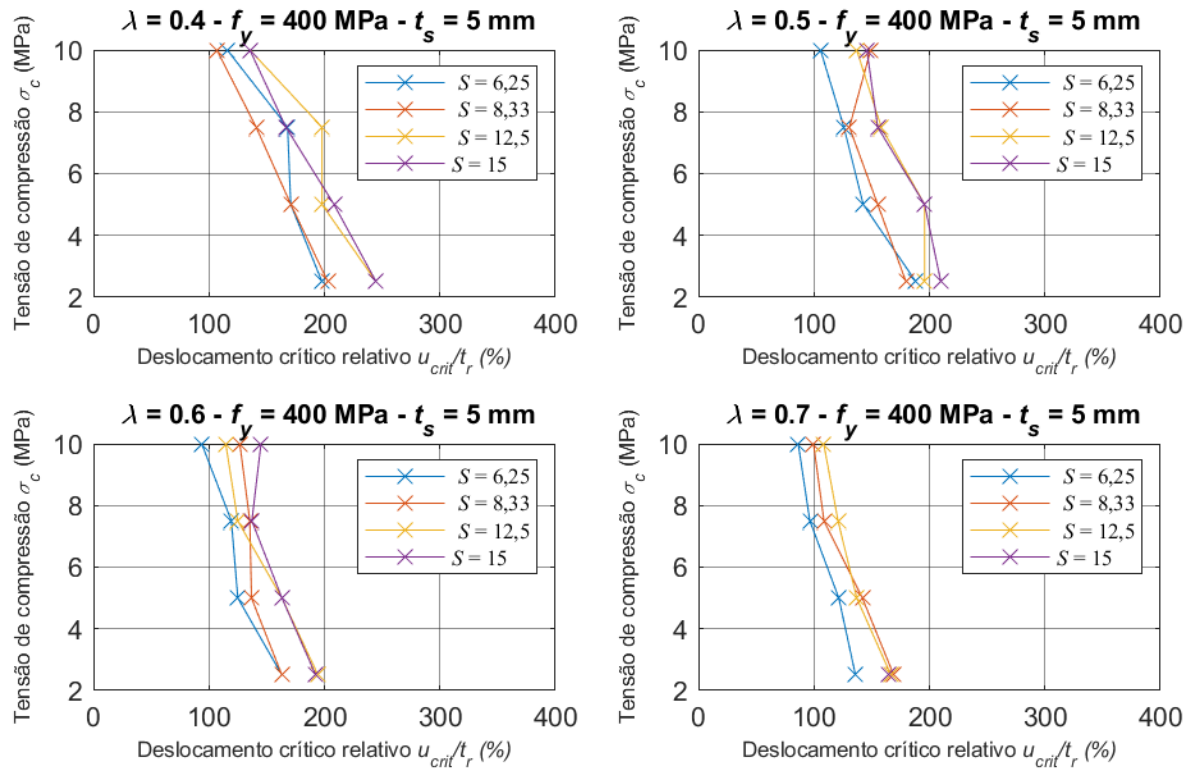
Além disso, é observado que para os estados limites completo e moderado, os valores de deslocamento crítico são reduzidos à medida que a tensão de compressão aumenta, enquanto ocorre o oposto para o estado limite leve. Isso se deve, pois o estado limite leve se refere à inversão de tensões na borracha, de forma que quanto menor a compressão atuante maior suscetibilidade dessa inversão.

4.4.1. Influência do fator de forma – EL Moderado

Figura 35 – Influência do fator de forma.

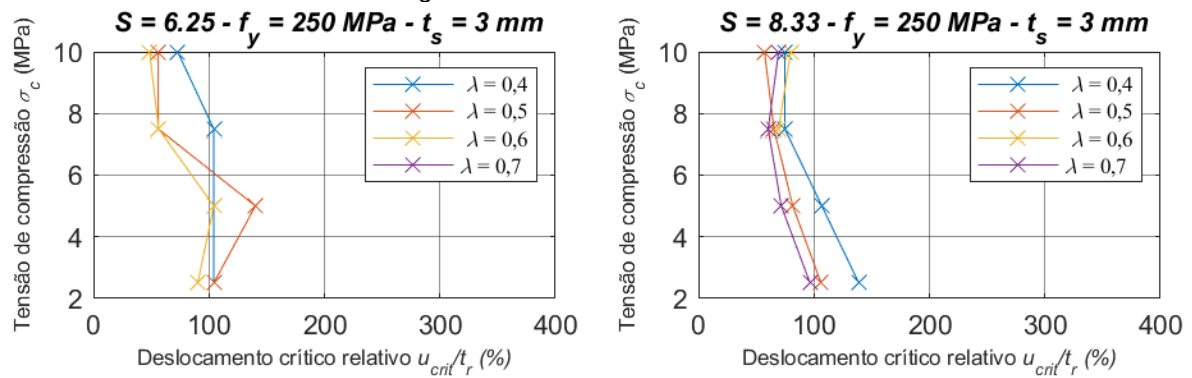


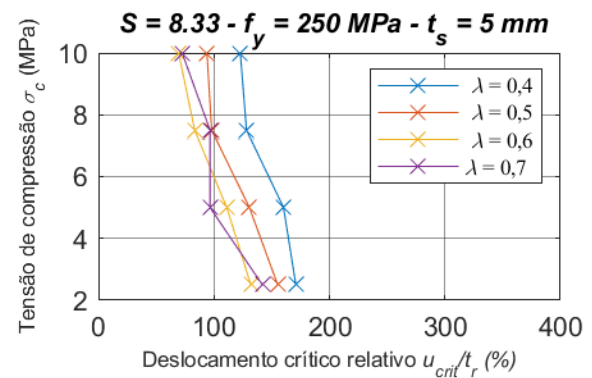
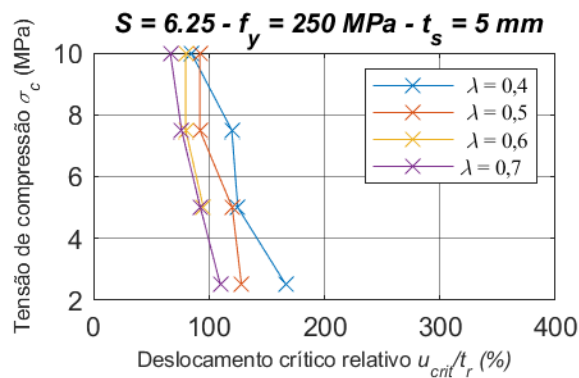
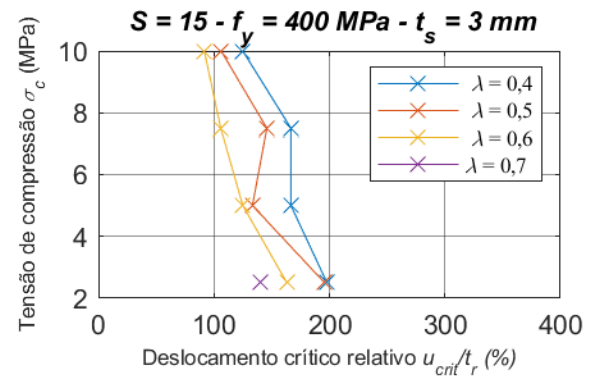
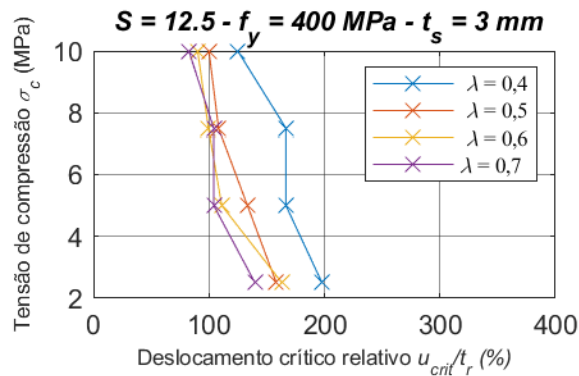
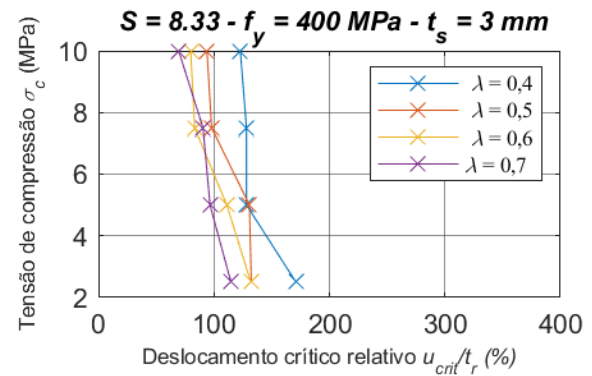
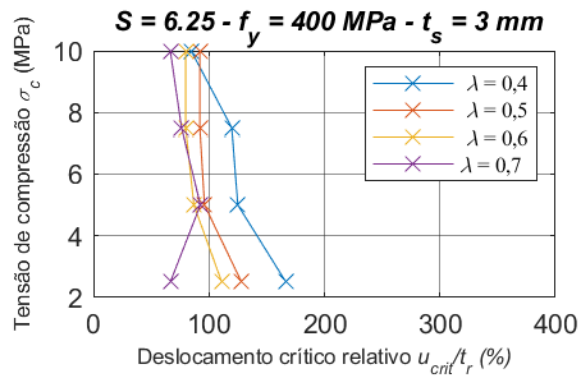
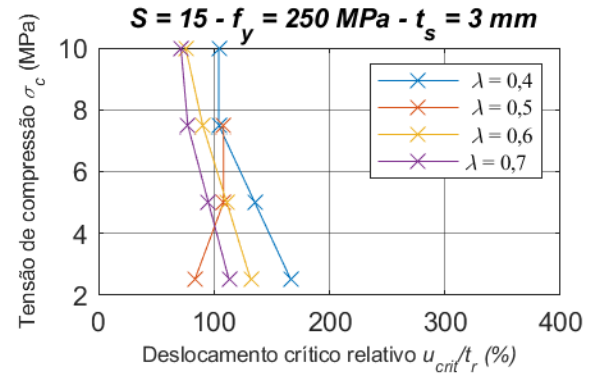
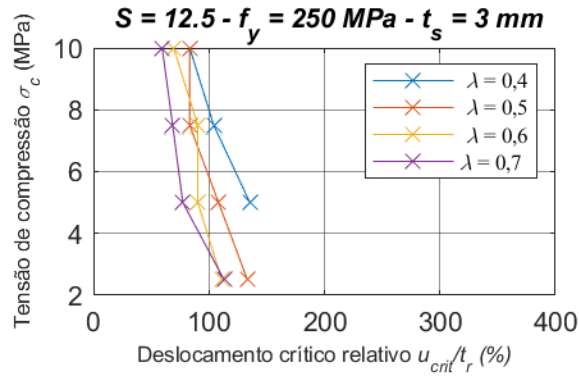


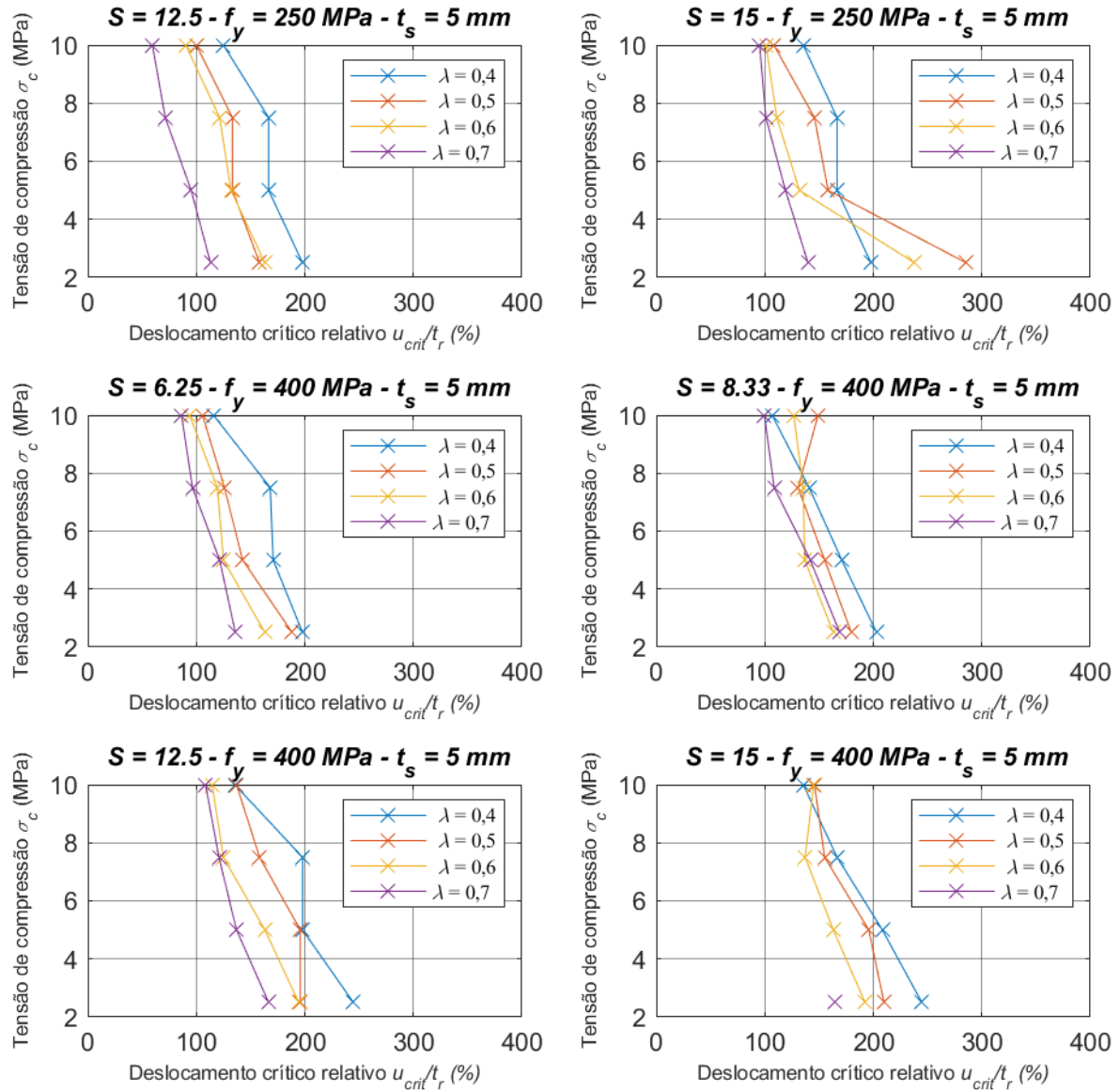


4.4.2. INFLUÊNCIA DA ESBELTEZ - EL MODERADO

Figura 36 – Influência da esbeltez.

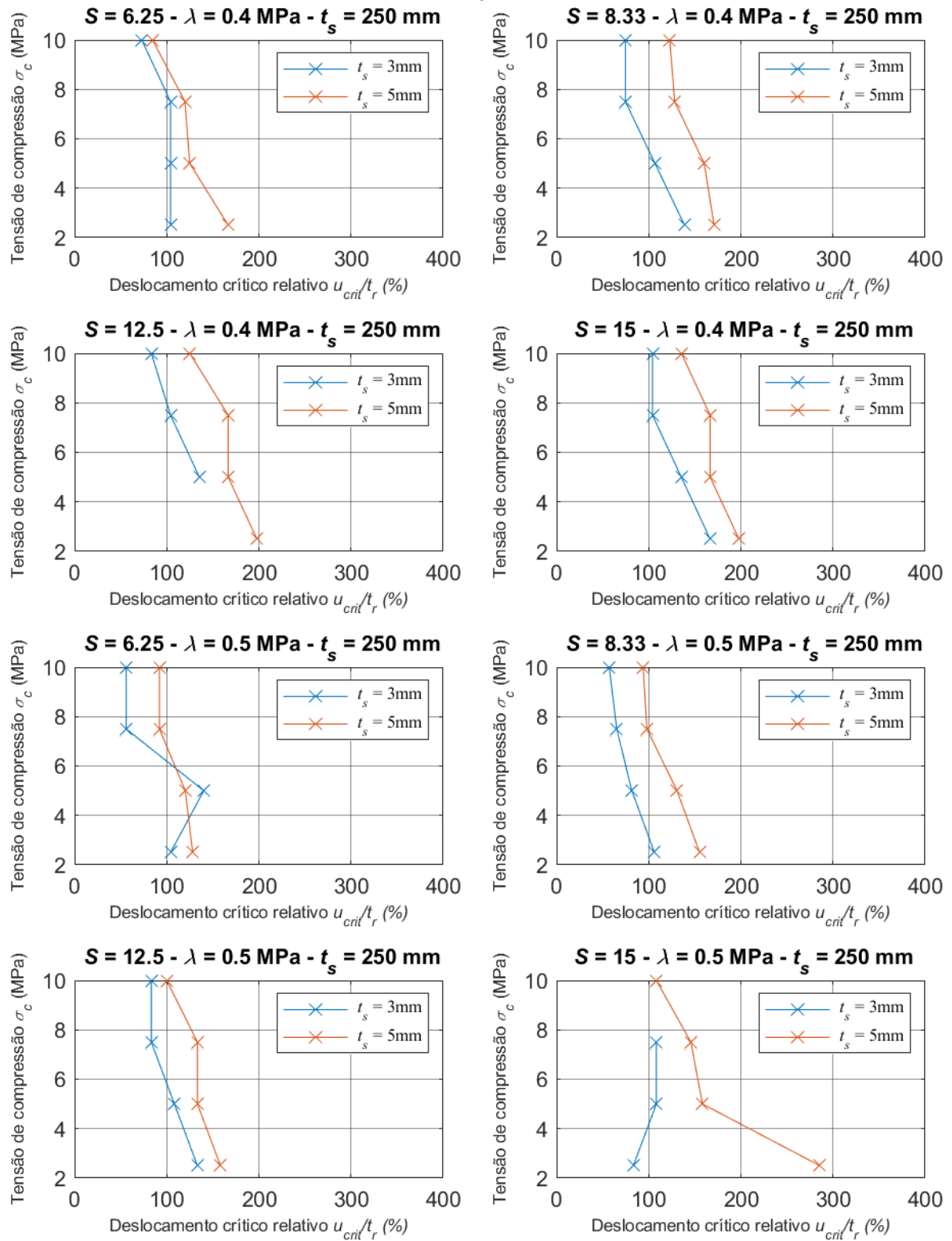


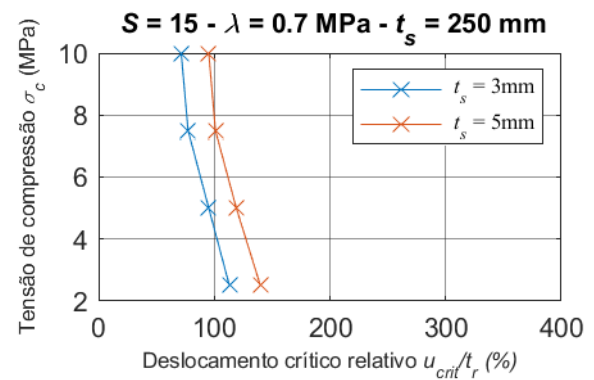
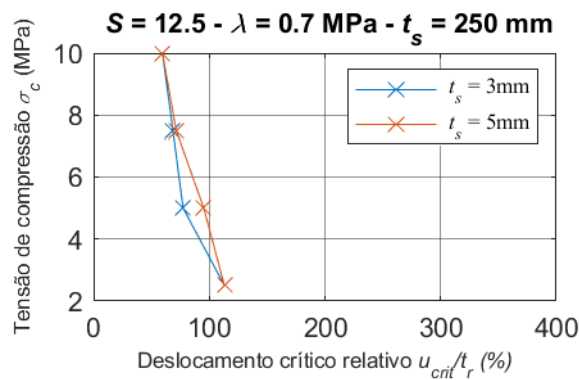
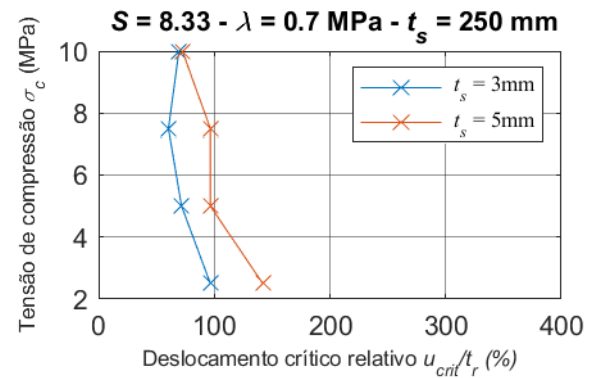
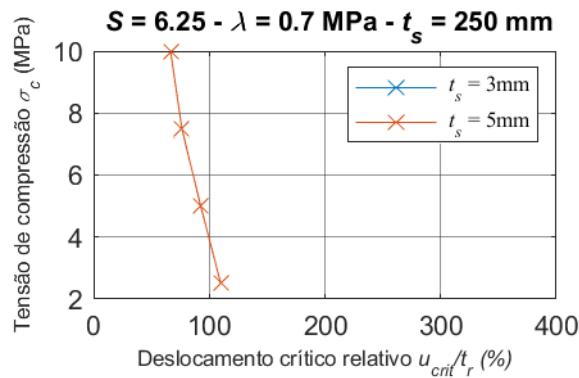
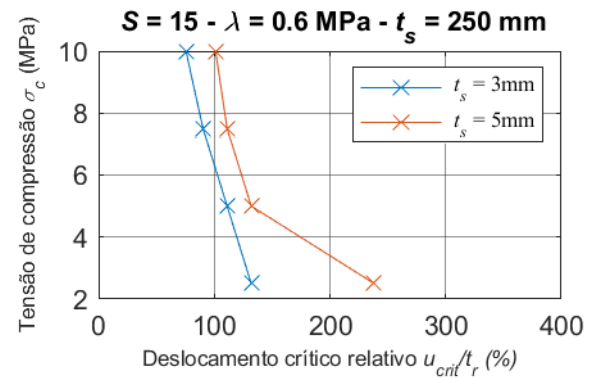
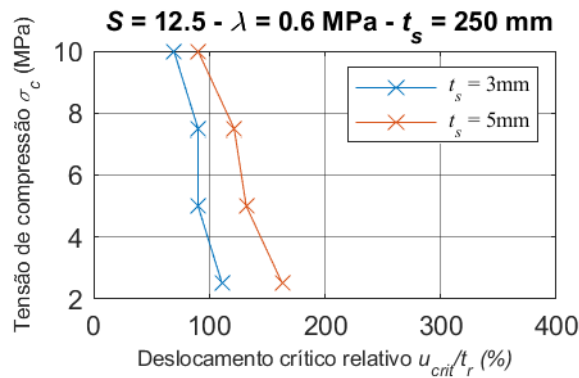
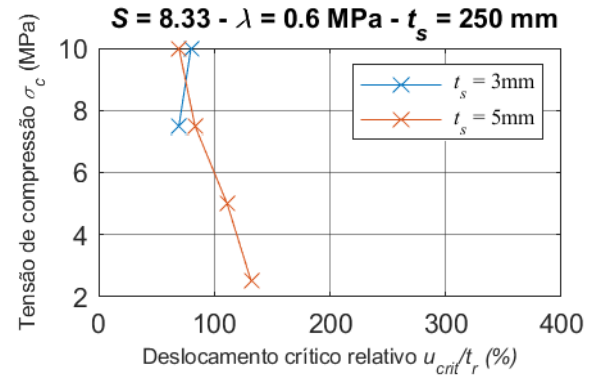
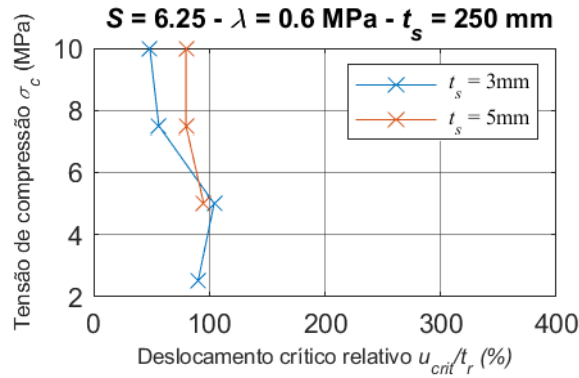


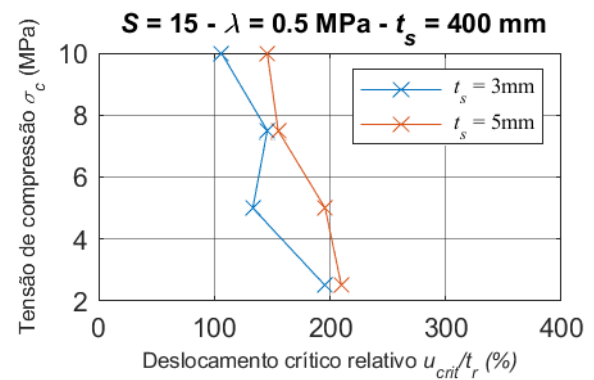
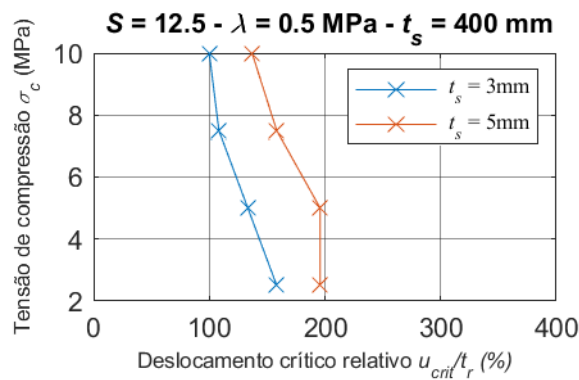
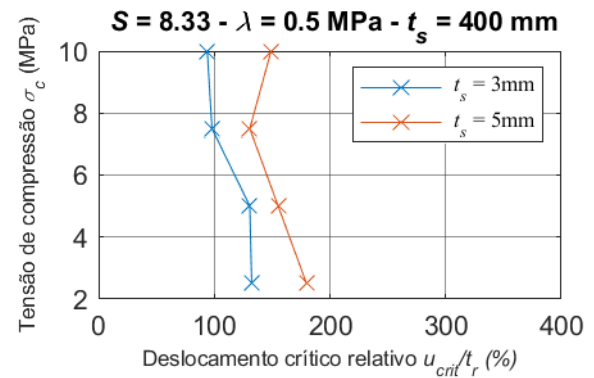
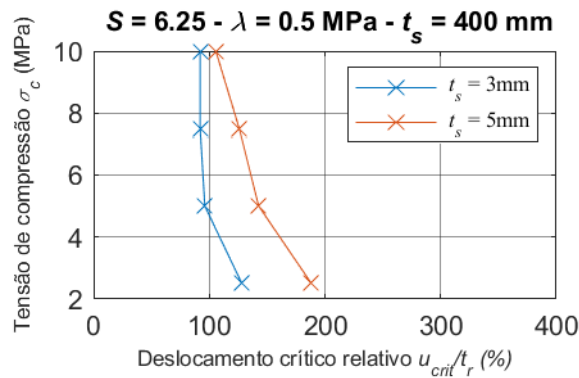
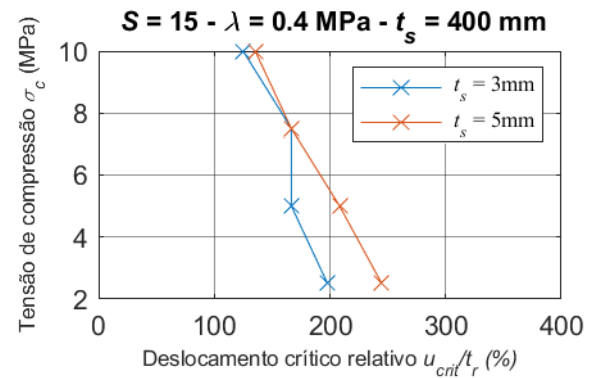
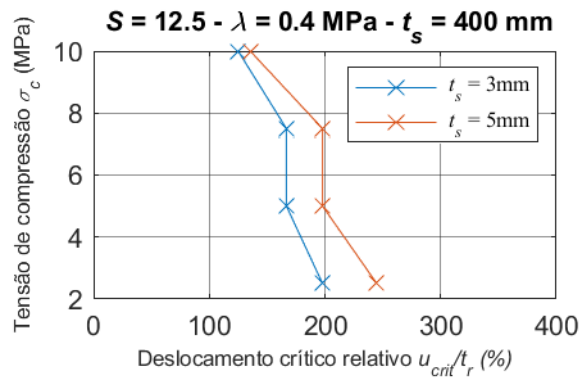
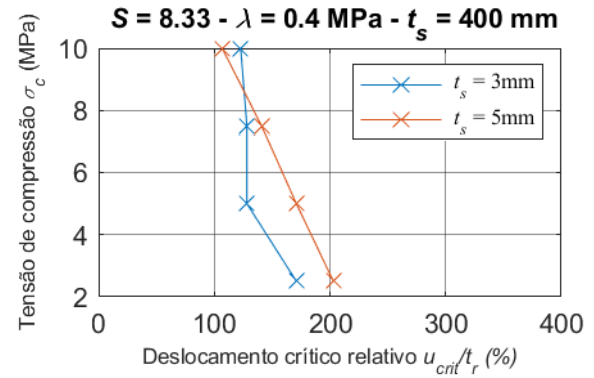
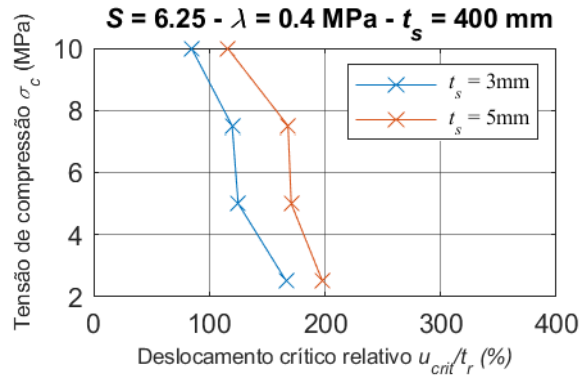


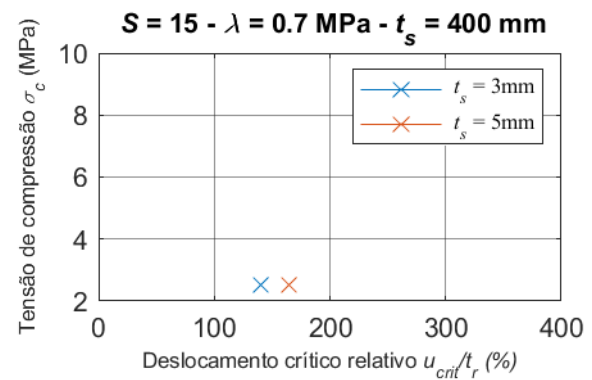
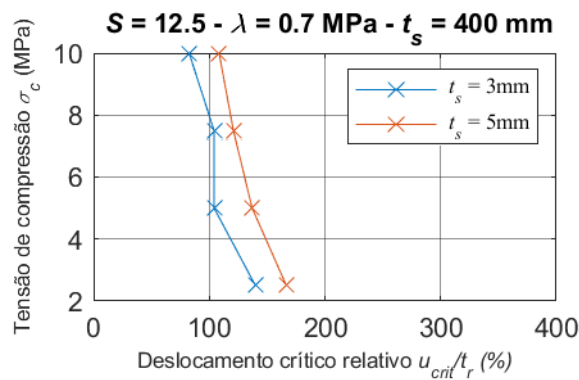
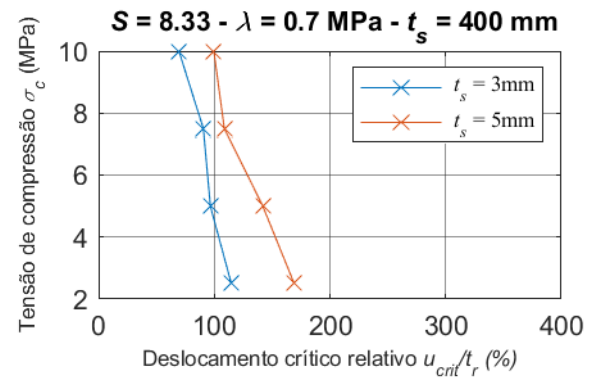
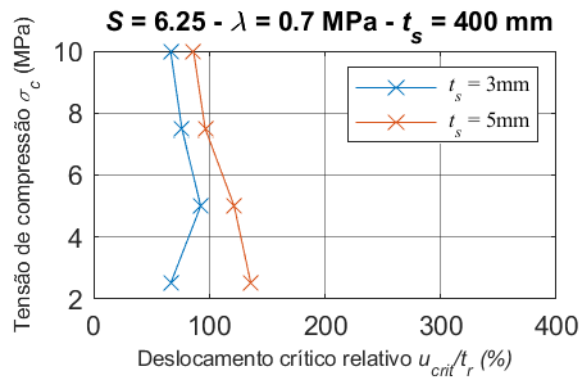
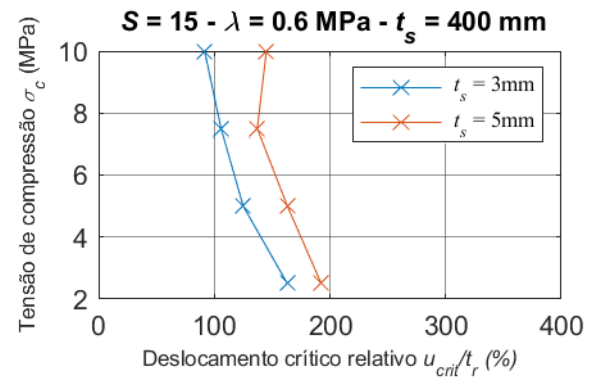
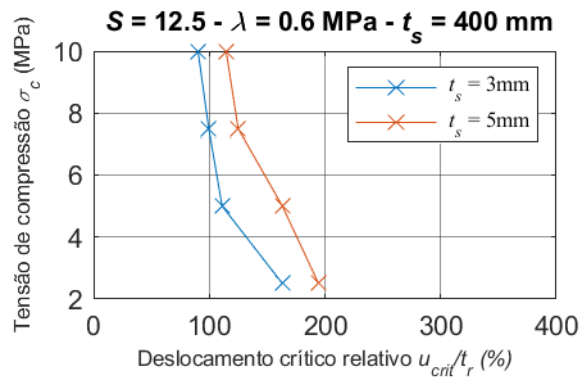
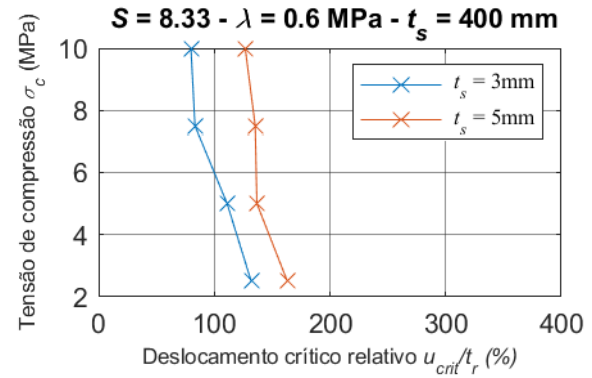
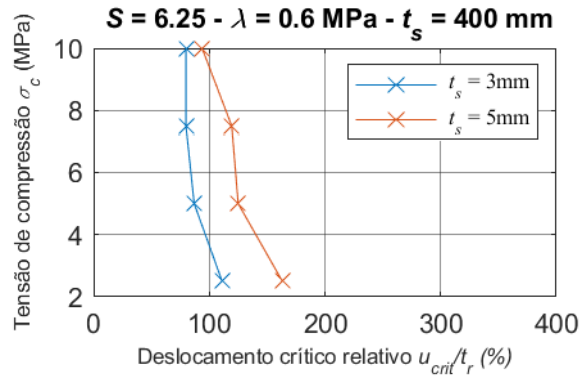
4.4.3. Influência da espessura das chapas de aço – EL Moderado

Figura 37 – Influência da espessura das chapas de aço



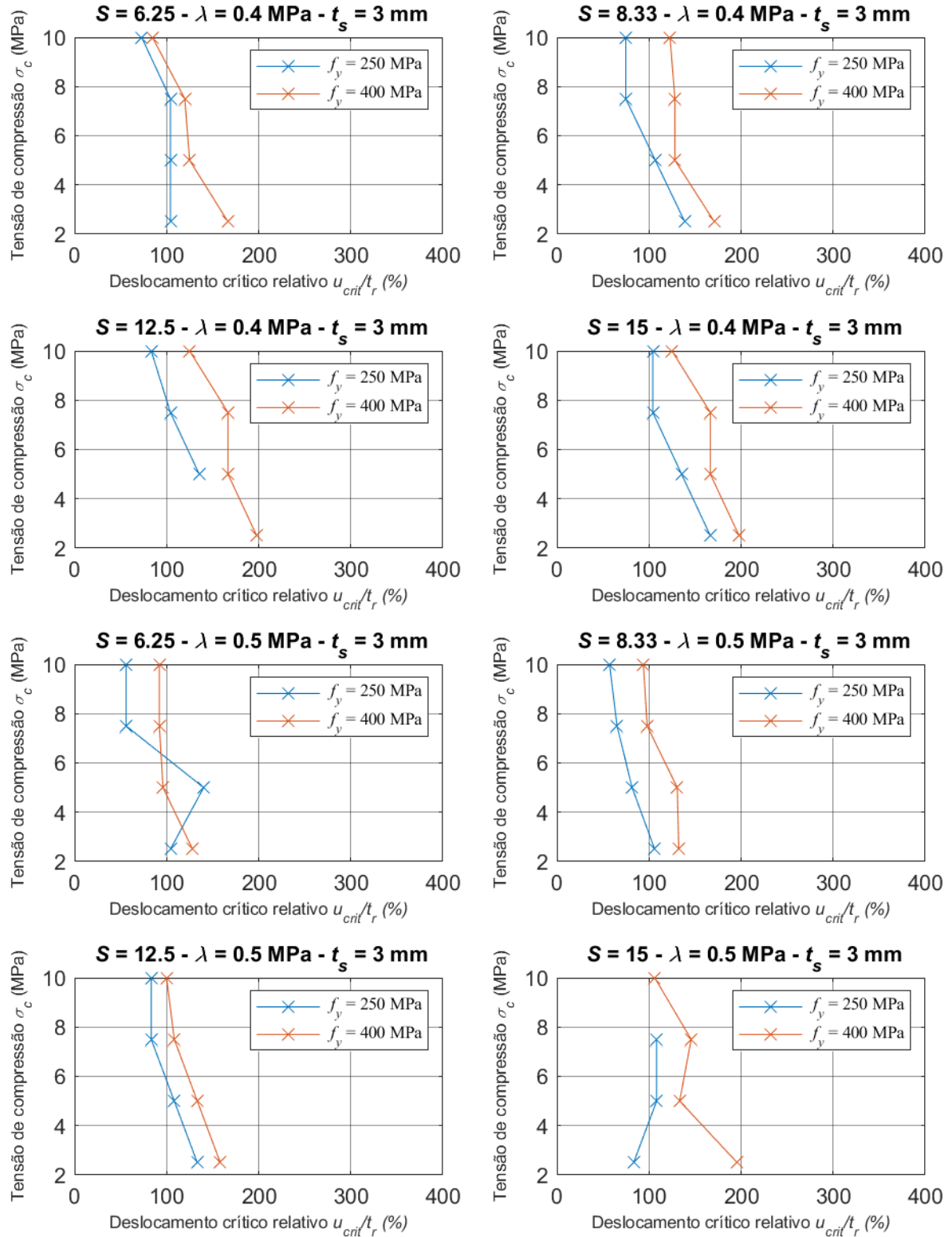


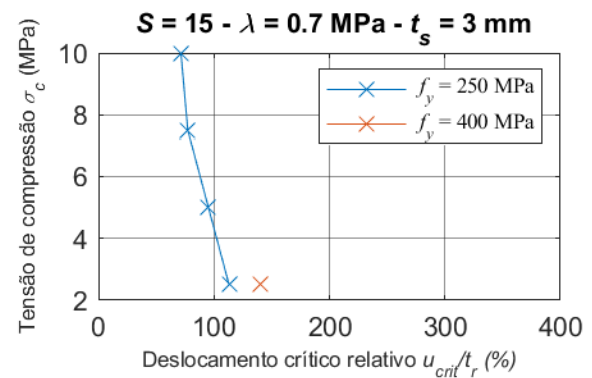
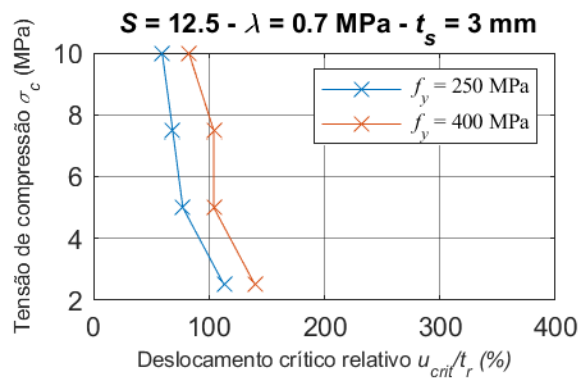
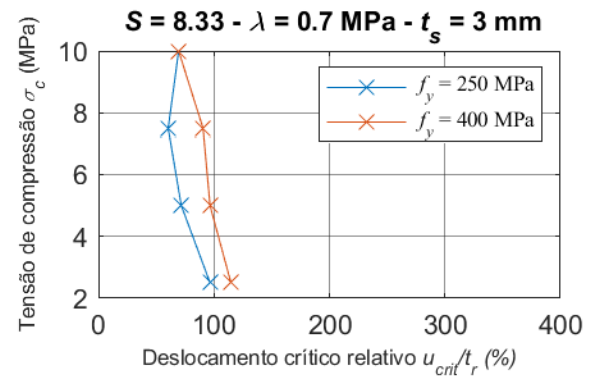
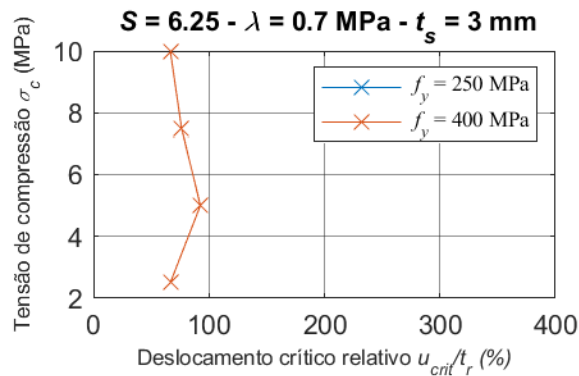
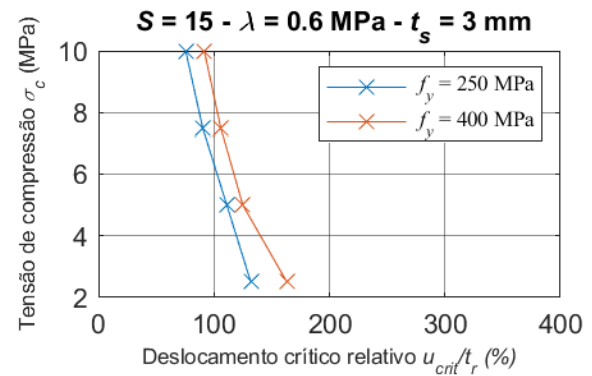
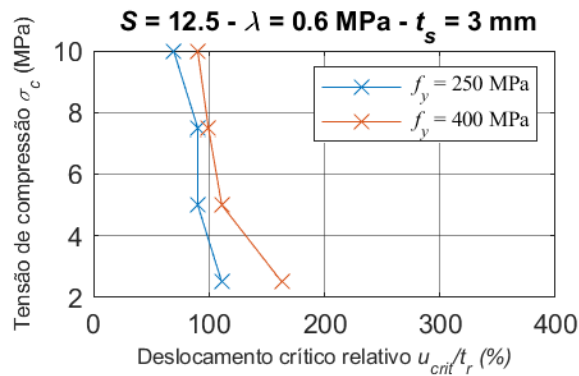
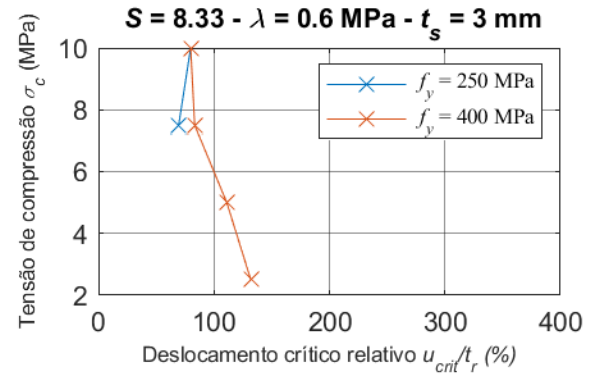
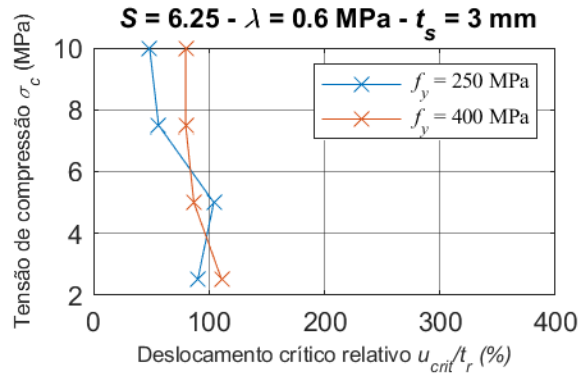


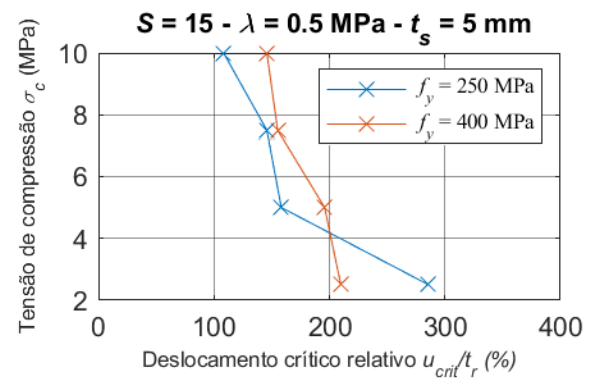
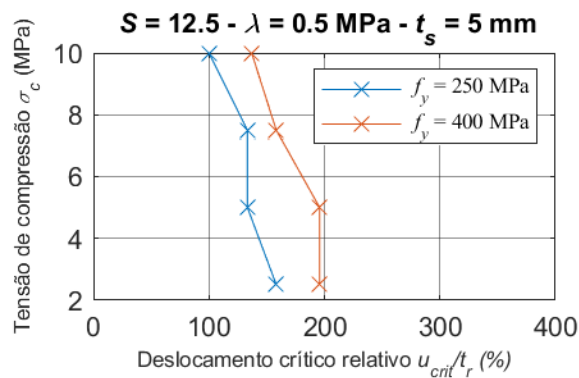
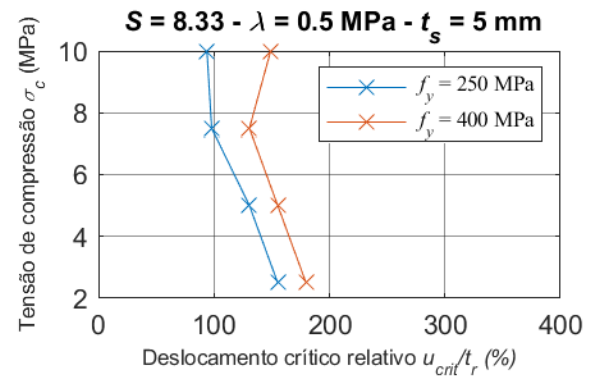
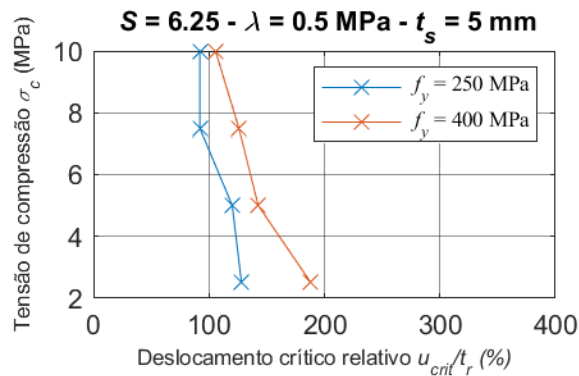
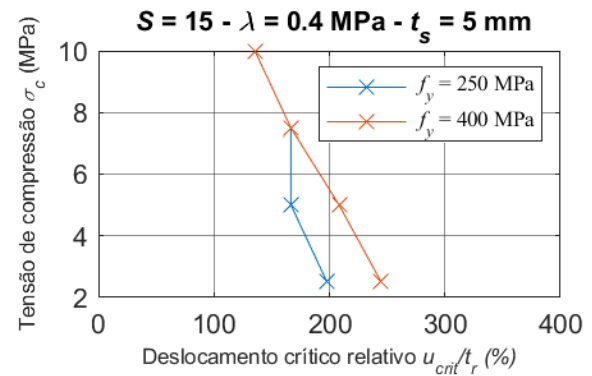
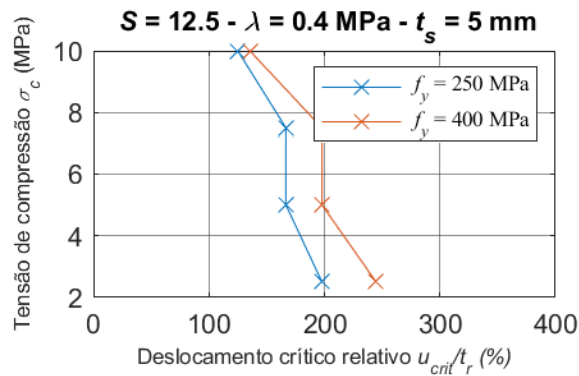
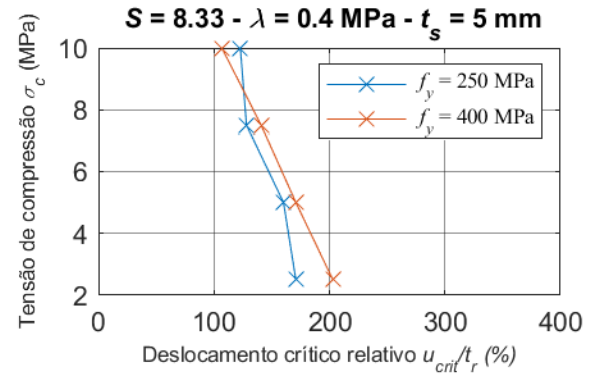
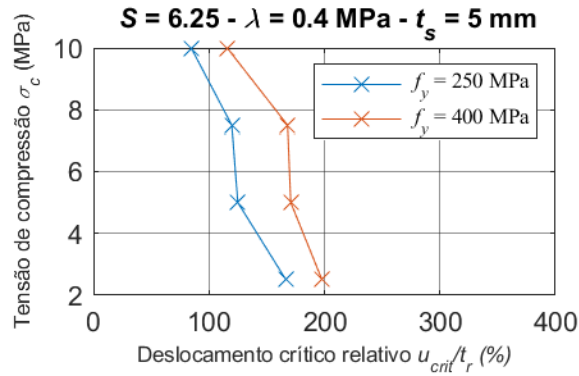


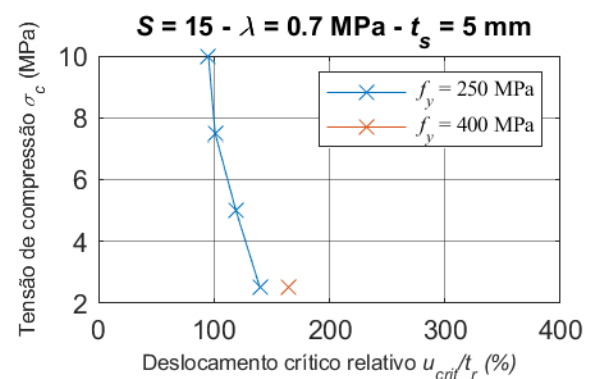
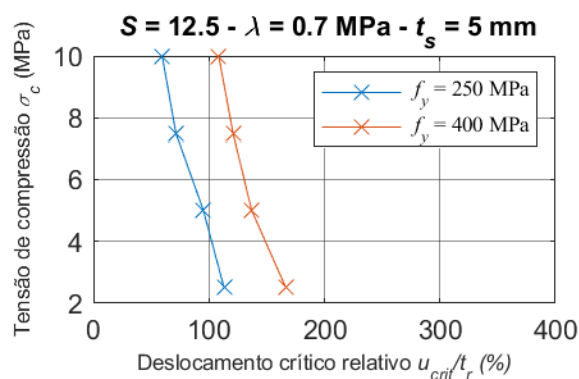
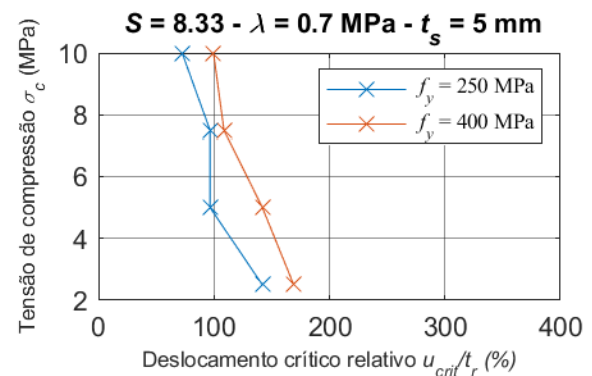
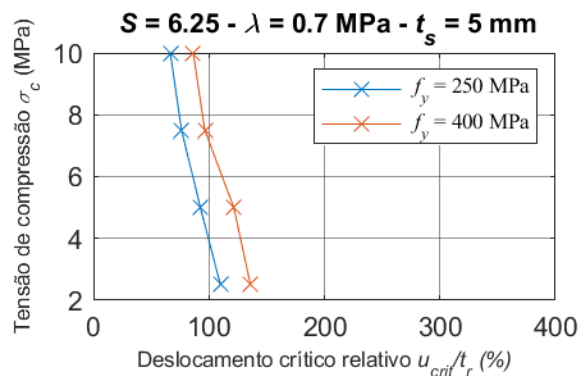
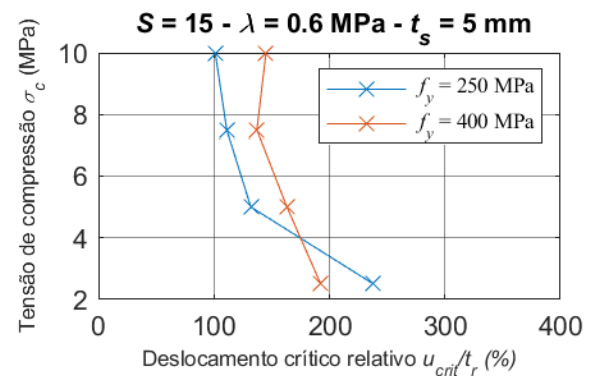
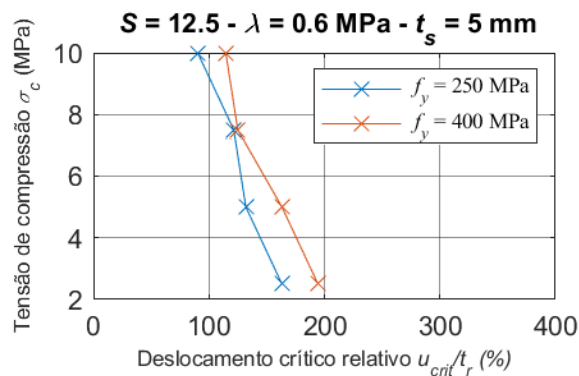
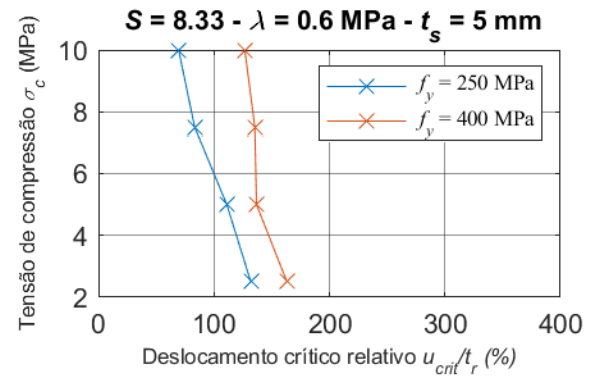
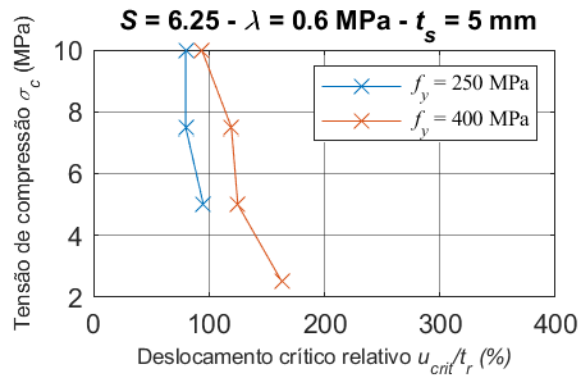
4.4.4. INFLUÊNCIA DA TENSÃO DE ESCOAMENTO DAS CHAPAS DE AÇO – EL MODERADO

Figura 38 – Influência da tensão de escoamento das chapas de aço.









4.4.5. AVALIAÇÃO DA ANÁLISE PARAMÉTRICA – EL MODERADO

Para avaliação da análise paramétrica foram elaboradas as Tabelas 10 a 13, que contemplam a média e o desvio padrão da diferença entre os valores máximos e mínimos de cada um dos gráficos para os diferentes patamares de pressão axial.

Tabela 10 – Médias e desvios padrões das diferenças entre fator de forma.

Patamar	Média (%)	Desv. Pad. (%)
2,5 MPa	54	35
5,0 MPa	35	12
7,5 MPa	37	13
10,0 MPa	29	13

Fonte: Dados do autor.

Tabela 11 – Médias e desvios padrões das diferenças entre esbeltez.

Patamar	Média (%)	Desv. Pad. (%)
2,5 MPa	64	32
5,0 MPa	47	13
7,5 MPa	50	21
10,0 MPa	35	15

Fonte: Dados do autor.

Tabela 12 – Médias e desvios padrões das diferenças entre espessura do aço.

Patamar	Média (%)	Desv. Pad. (%)
2,5 MPa	40	38
5,0 MPa	33	16
7,5 MPa	30	17
10,0 MPa	25	16

Fonte: Dados do autor.

Tabela 13 – Médias e desvios padrões das diferenças entre escoamento do aço.

Patamar	Média (%)	Desv. Pad. (%)
2,5 MPa	34	23
5,0 MPa	27	15
7,5 MPa	27	18
10,0 MPa	23	18

Fonte: Dados do autor.

Das tabelas apresentadas, é possível observar o comportamento do isolador para diversas condições dos parâmetros estudados. Como as Tabelas 10 a 13 apresentam as médias das diferenças entre os valores máximos e mínimos dos deslocamentos críticos, tem-se que, quanto maior esse valor para determinado parâmetro, maior a influência deste no comportamento do isolador.

Assim, é possível observar que, para o estado limite moderado, o parâmetro mais influente é a esbeltez, a qual apresenta valores de variação de deslocamento crítico de 35% a 64%, dependendo da carga axial aplicada. Após a esbeltez, o parâmetro mais relevante é o fator de forma, o qual apresenta resultados variando de 29% a 54%.

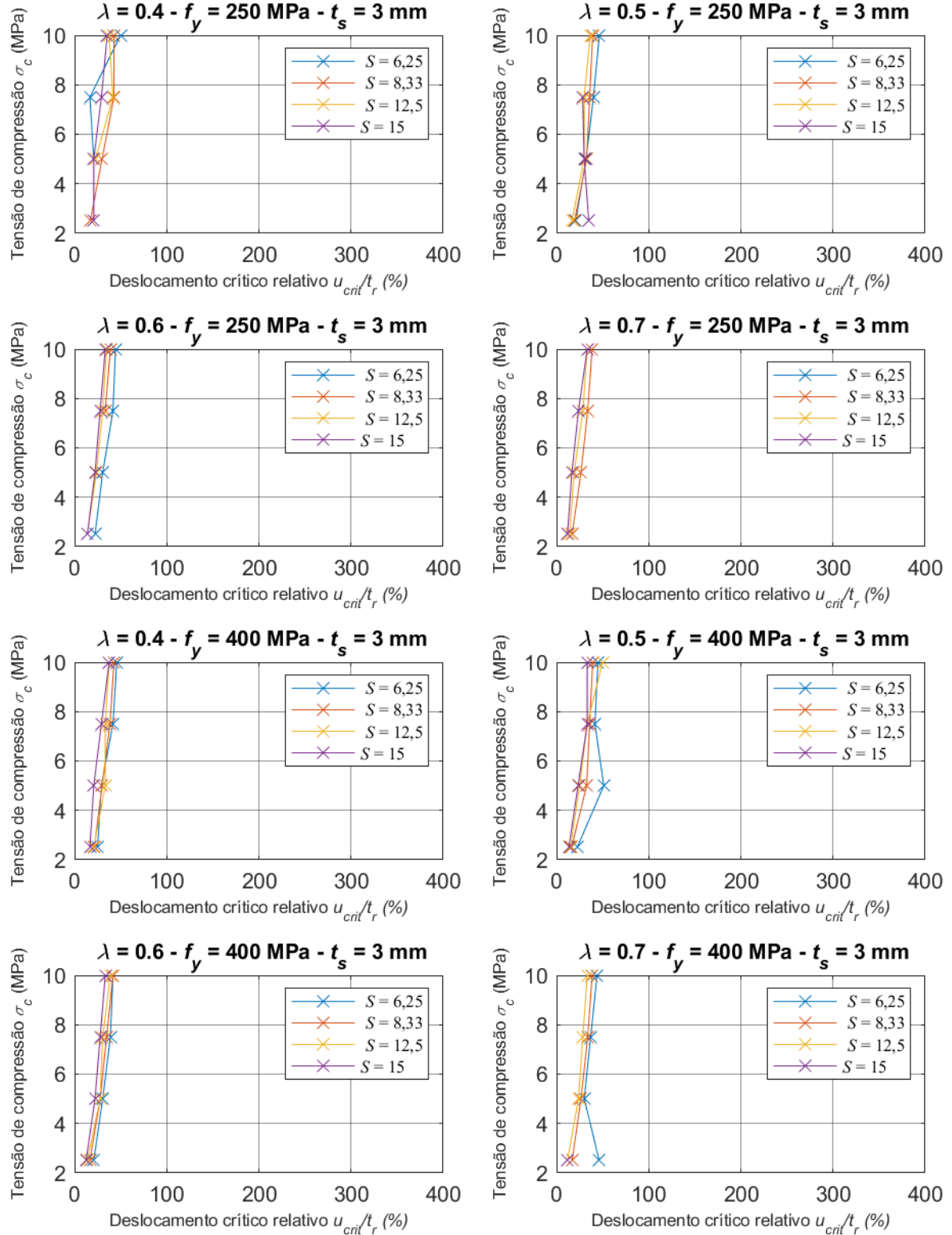
Desses valores, observa-se que para o estado limite moderado a influência da esbeltez é menor do que a mesma para o estado limite completo, embora ainda seja o parâmetro mais influente, porém, com valores mais próximos aos observados para o fator de forma.

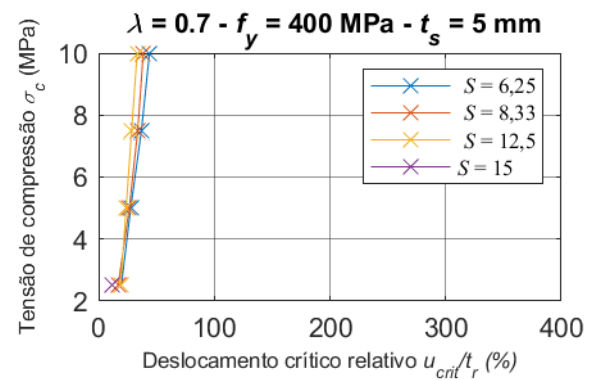
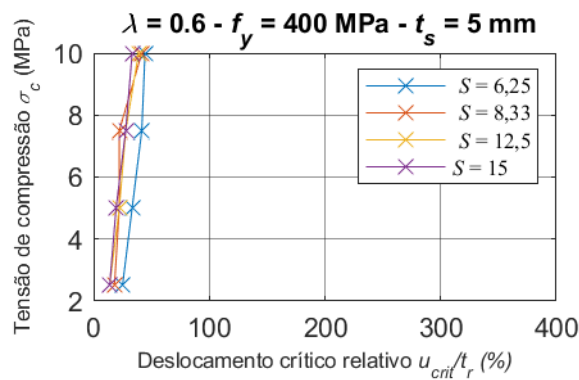
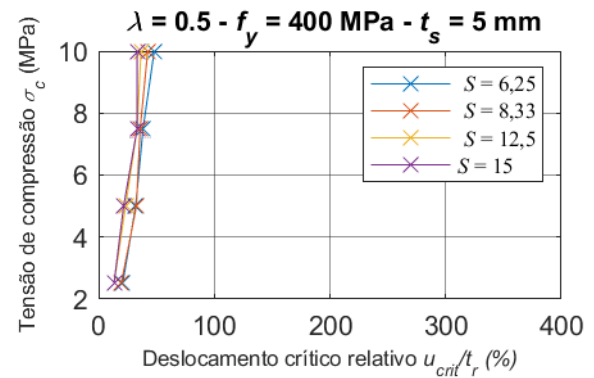
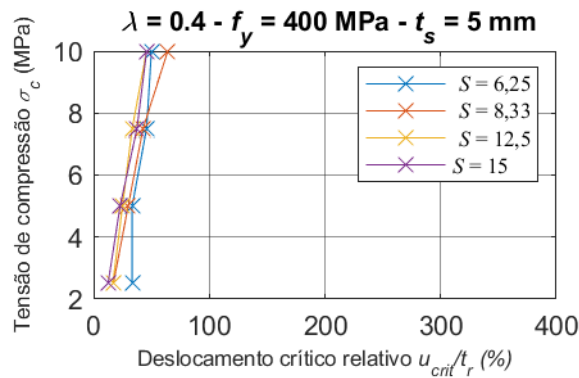
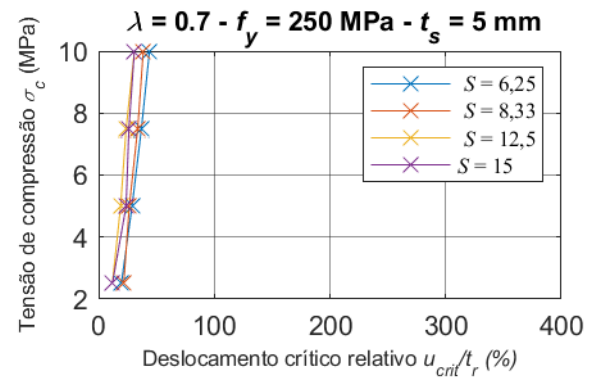
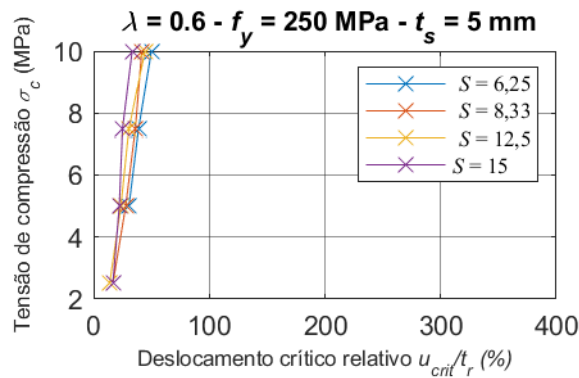
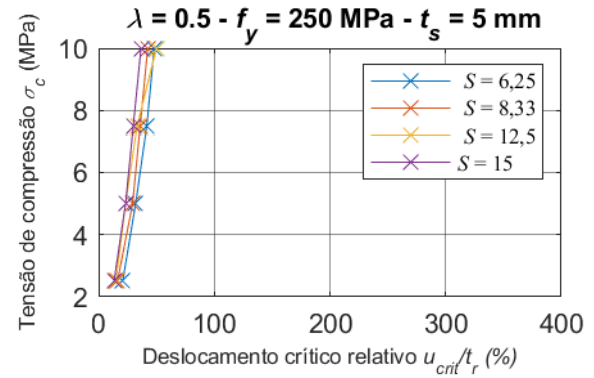
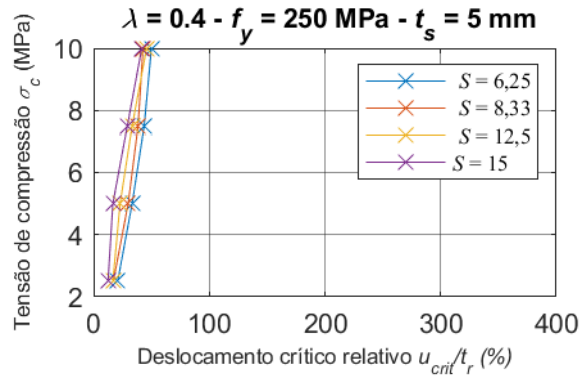
Em relação aos resultados provenientes da variação dos parâmetros relativos às chapas de aço, é possível observar que o impacto destes aumentou quando comparado ao estado limite completo, apresentando variações nos resultados de deslocamento crítico de 23% a 40%.

Dessa forma, para o estado limite moderado, tem-se que embora a esbeltez continue sendo o parâmetro predominante, os outros parâmetros passam a ter influência muito mais próxima.

4.4.6. Influência do fator de forma – EL Leve

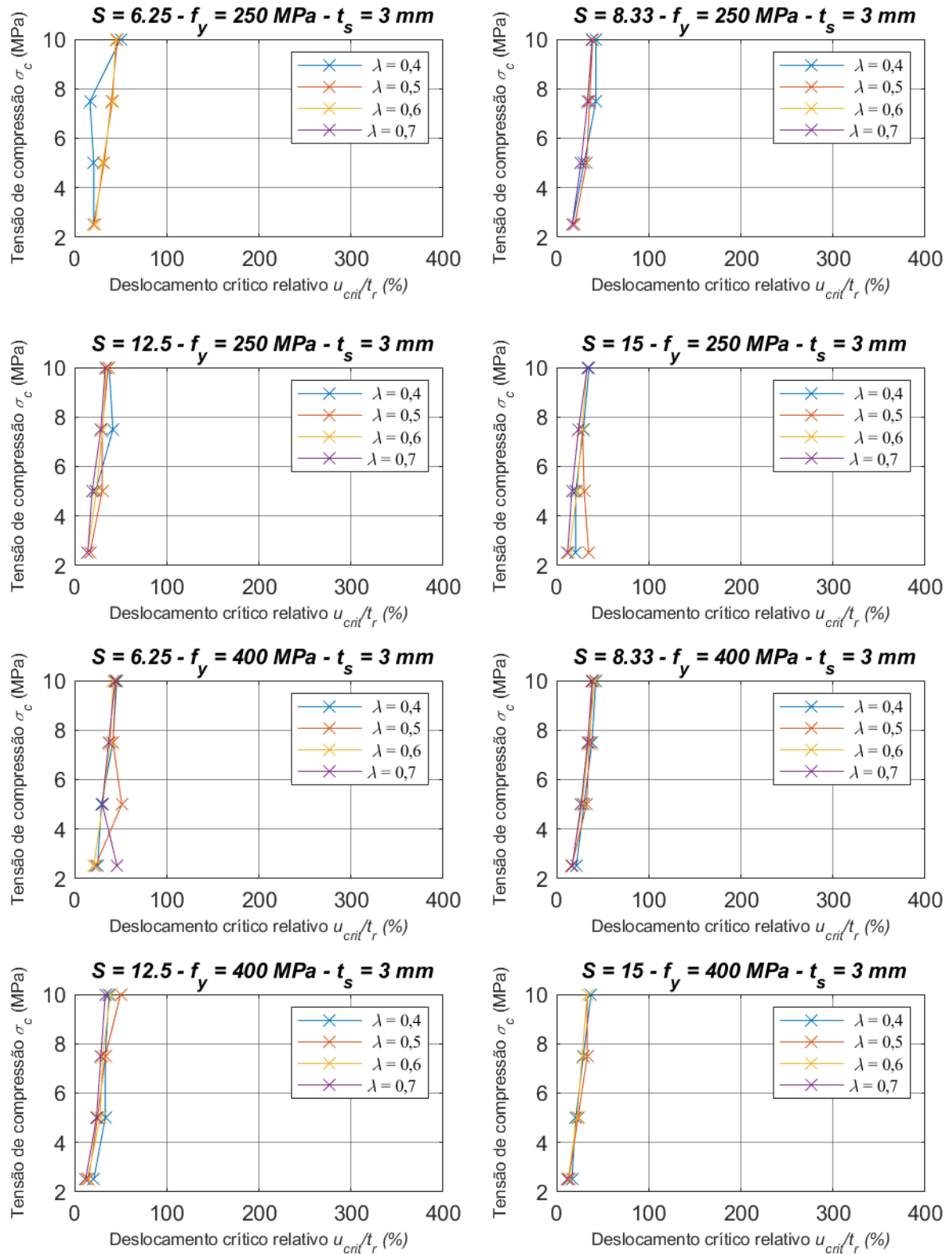
Figura 39 – Influência do fator de forma.

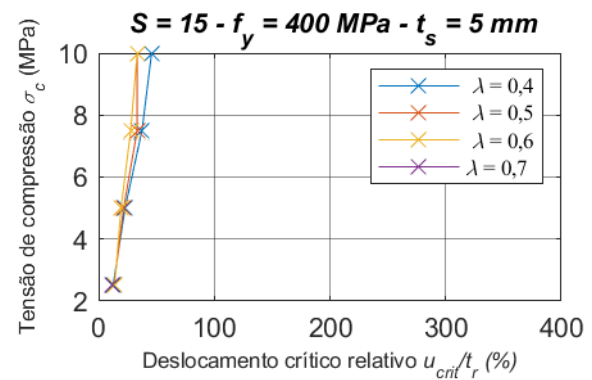
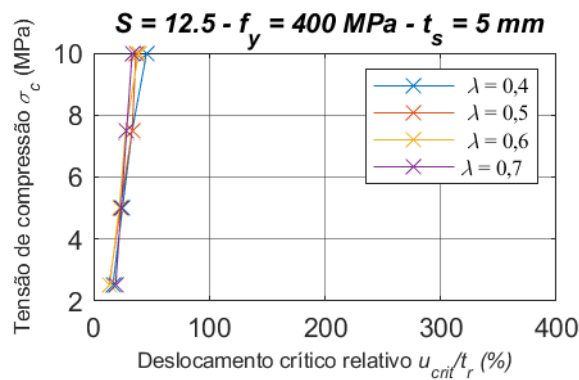
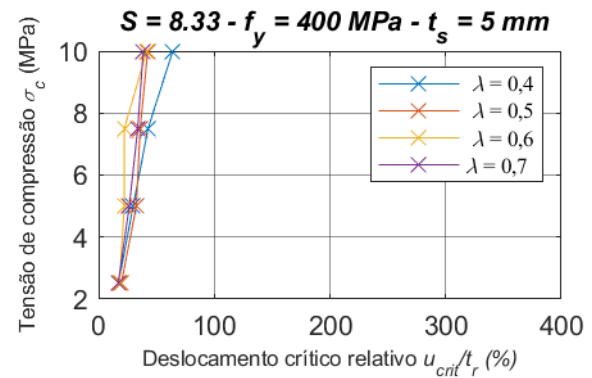
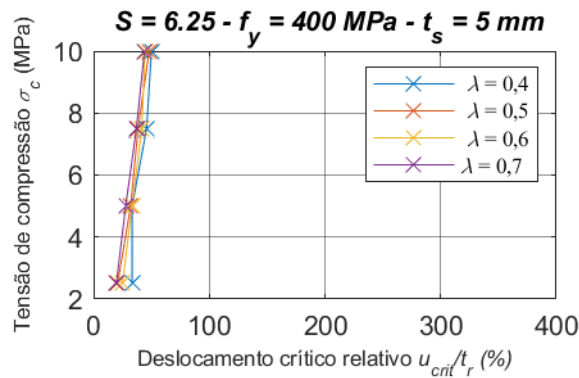
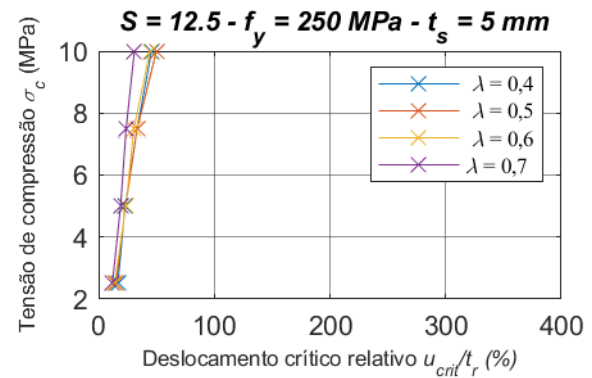
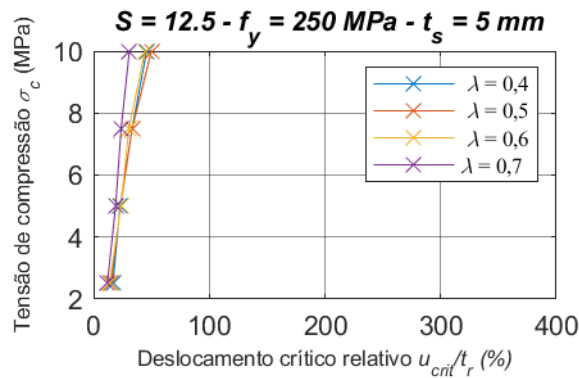
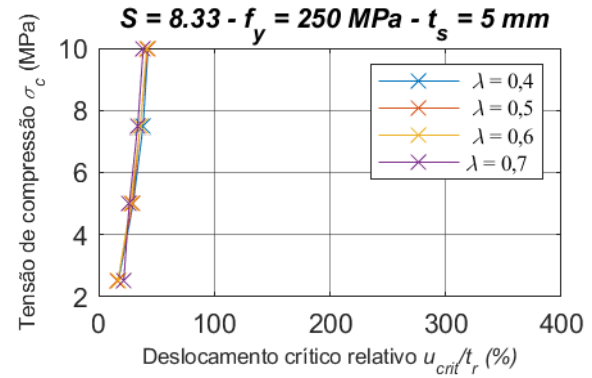
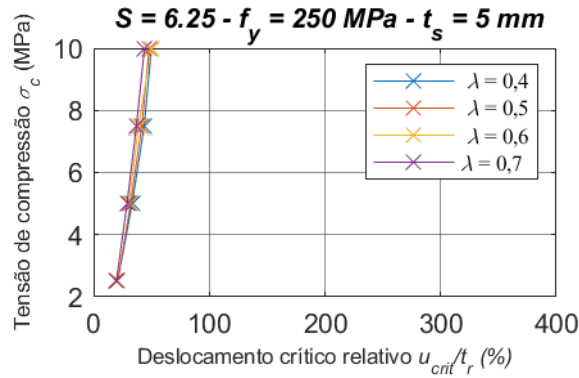




4.4.7. Influência da esbelteza – EL Leve

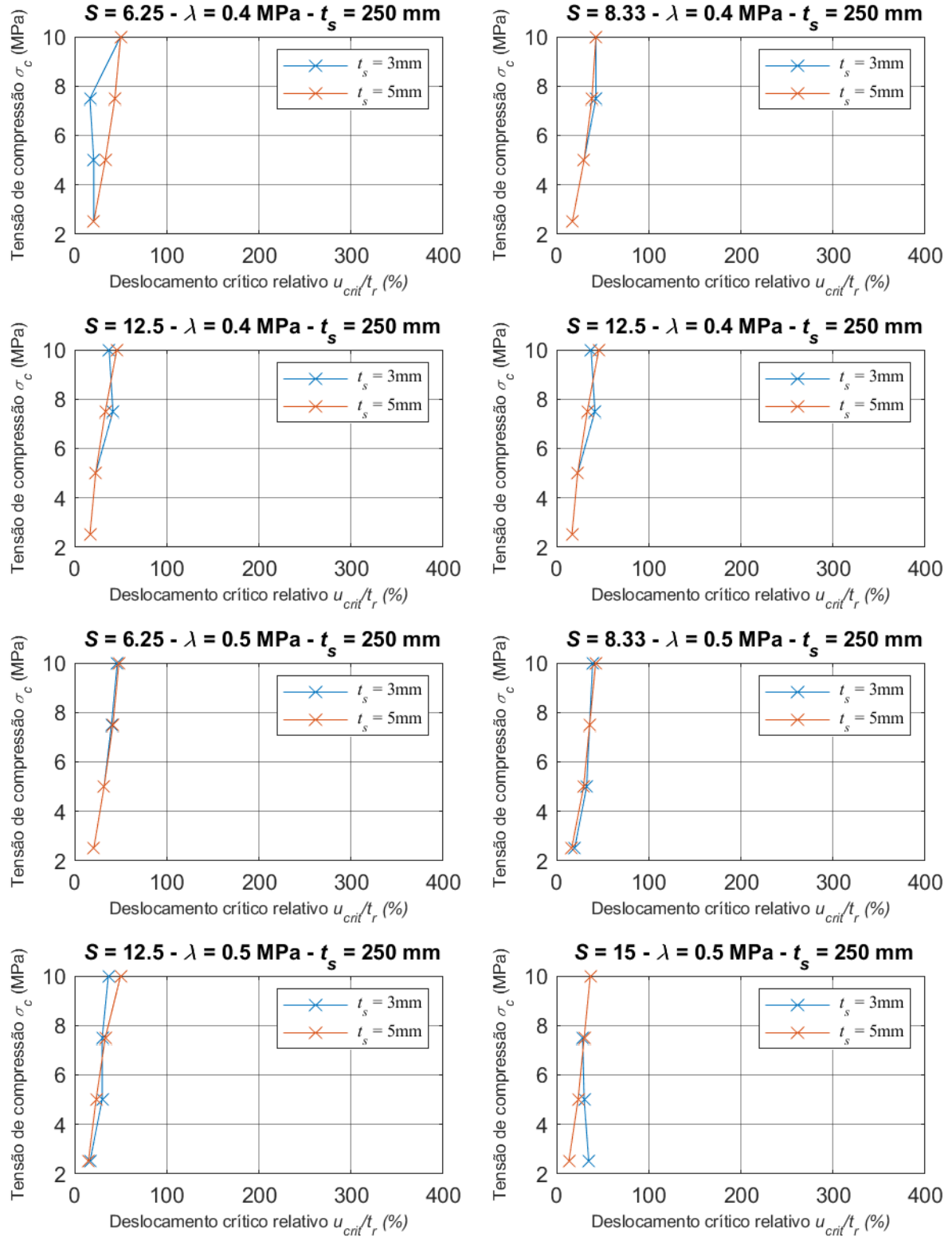
Figura 40 – Influência da esbelteza.

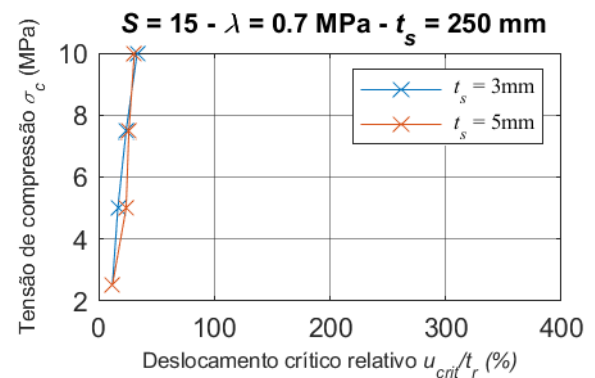
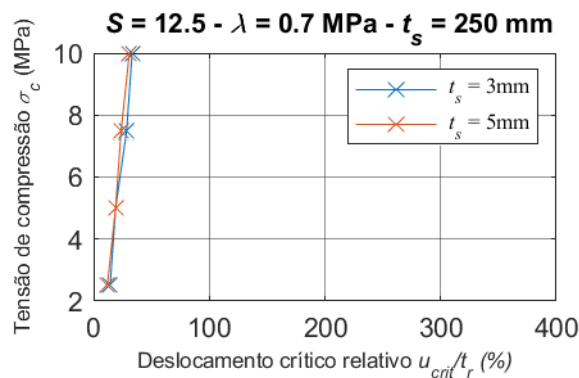
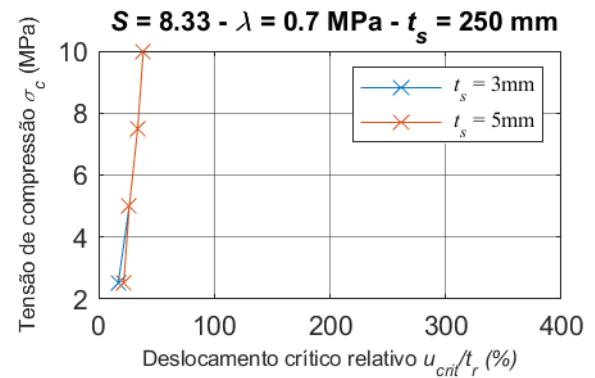
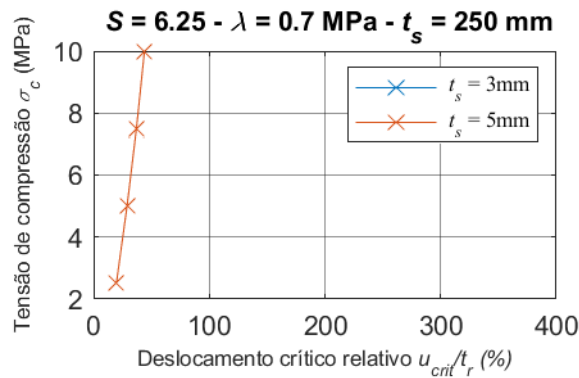
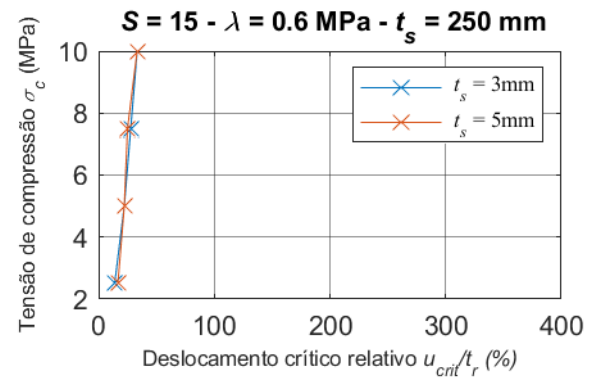
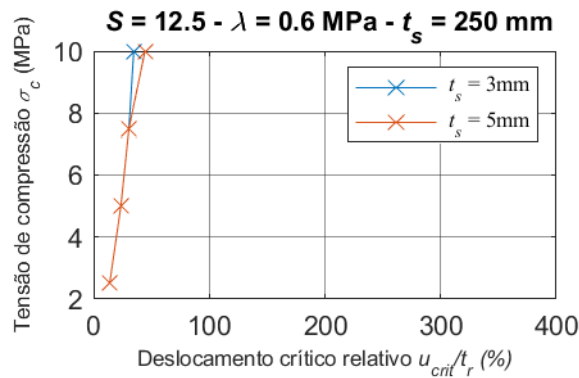
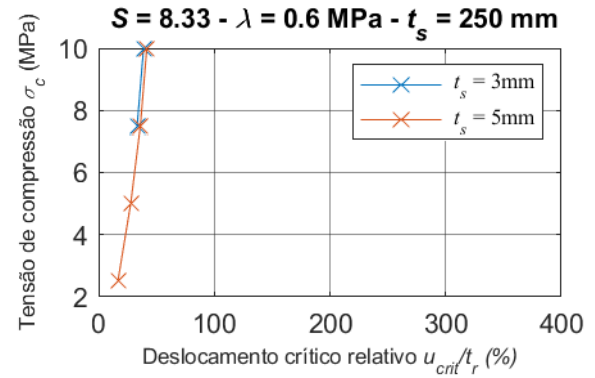
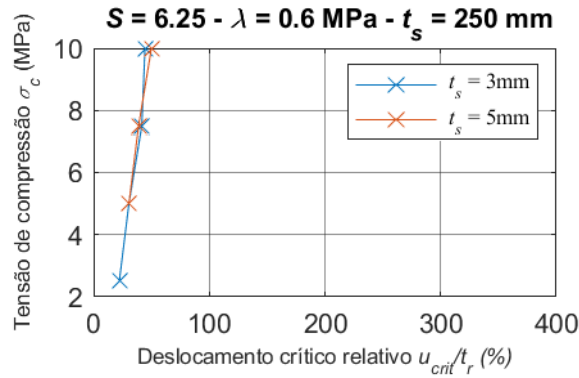


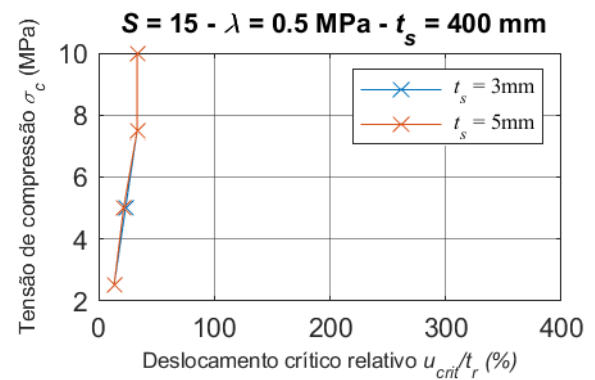
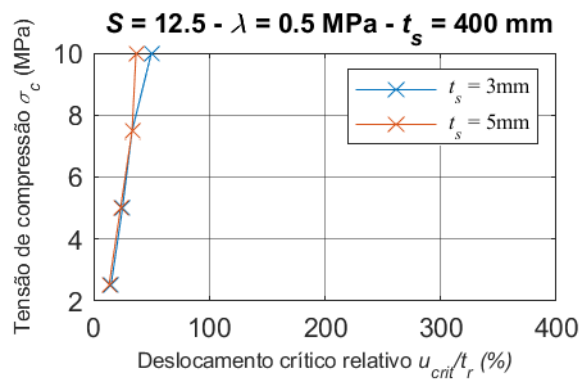
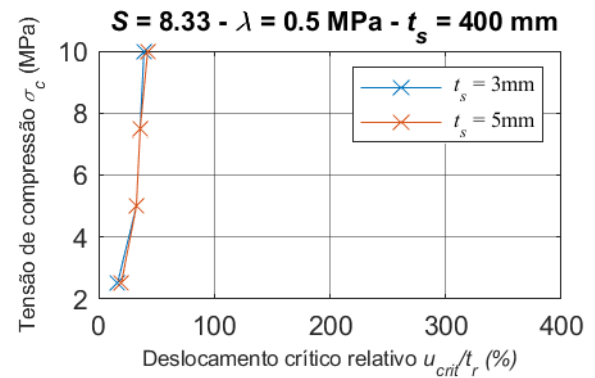
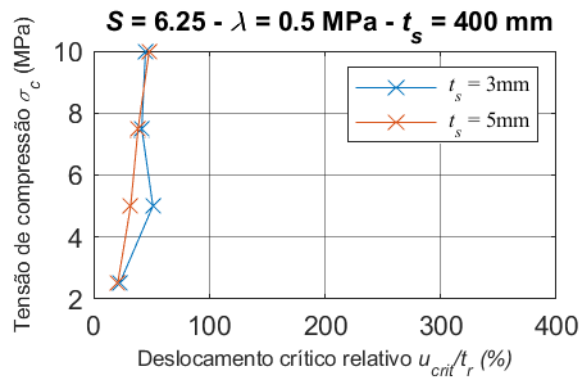
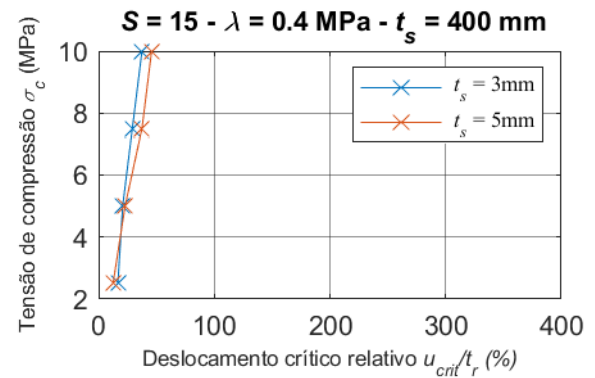
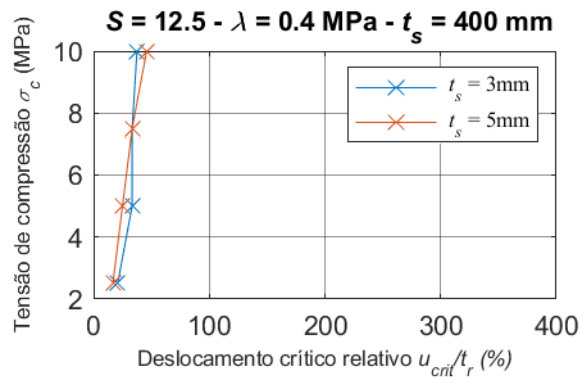
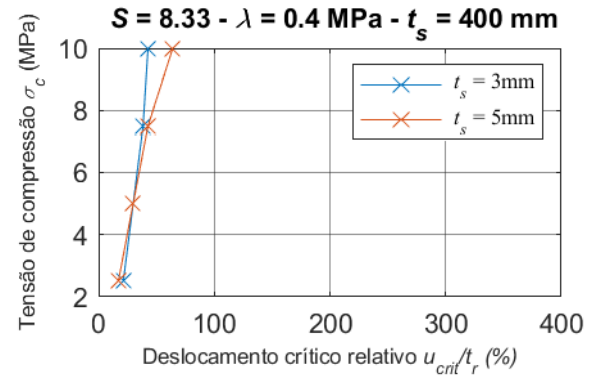
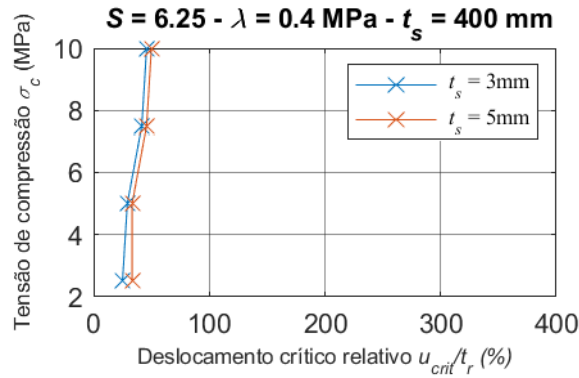


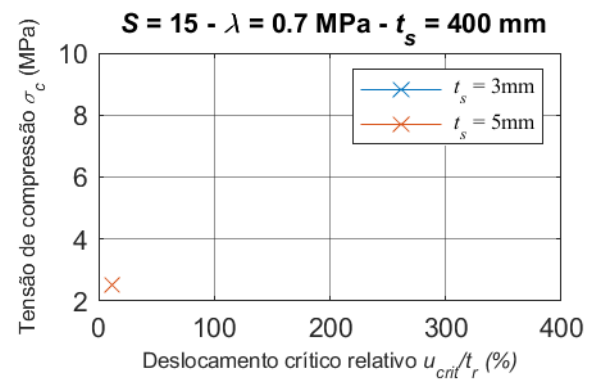
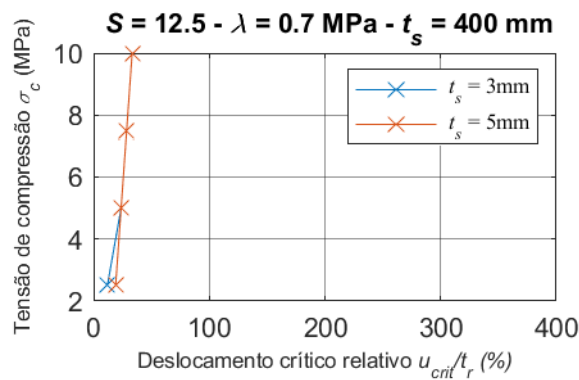
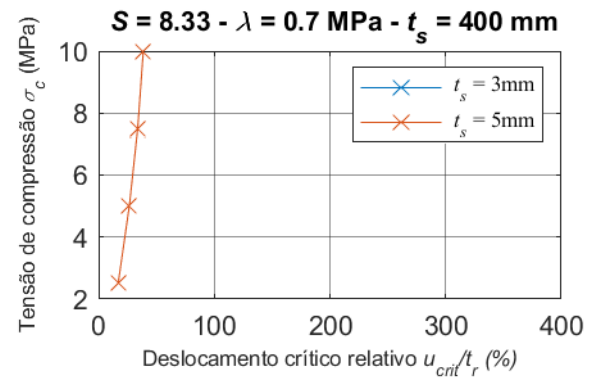
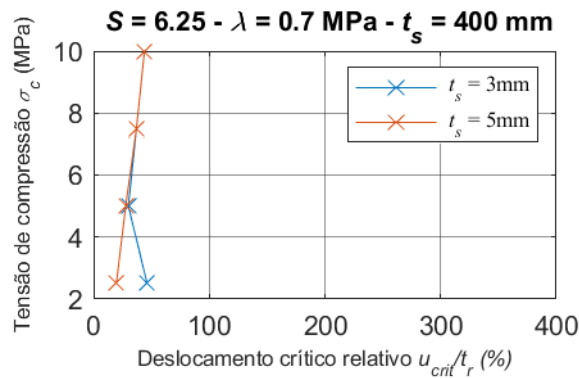
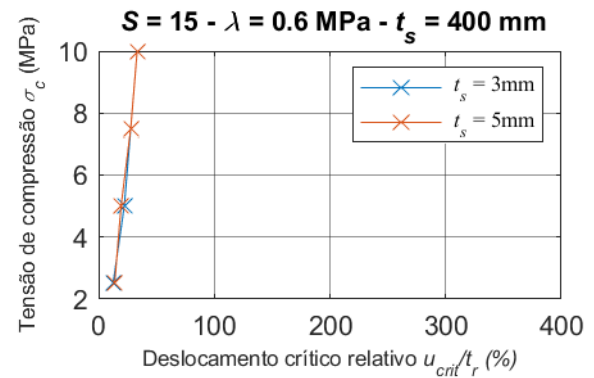
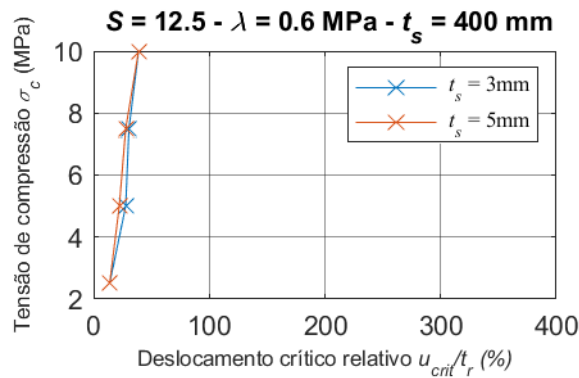
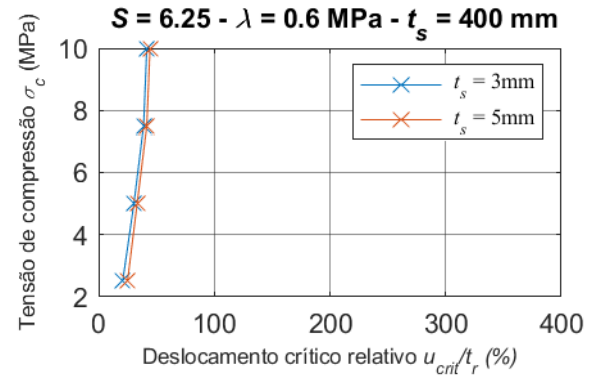
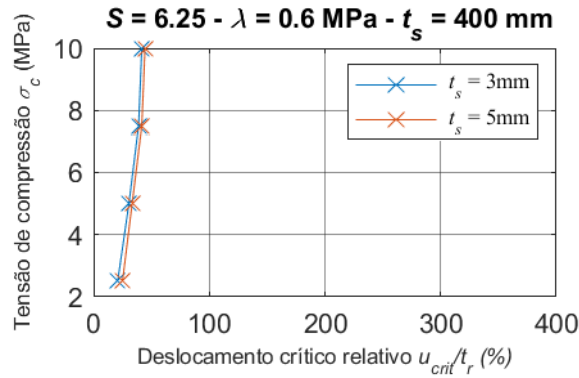
4.4.8. INFLUÊNCIA DA ESPESSURA DAS CHAPAS DE AÇO – EL LEVE

Figura 41 – Influência da espessura das chapas de aço



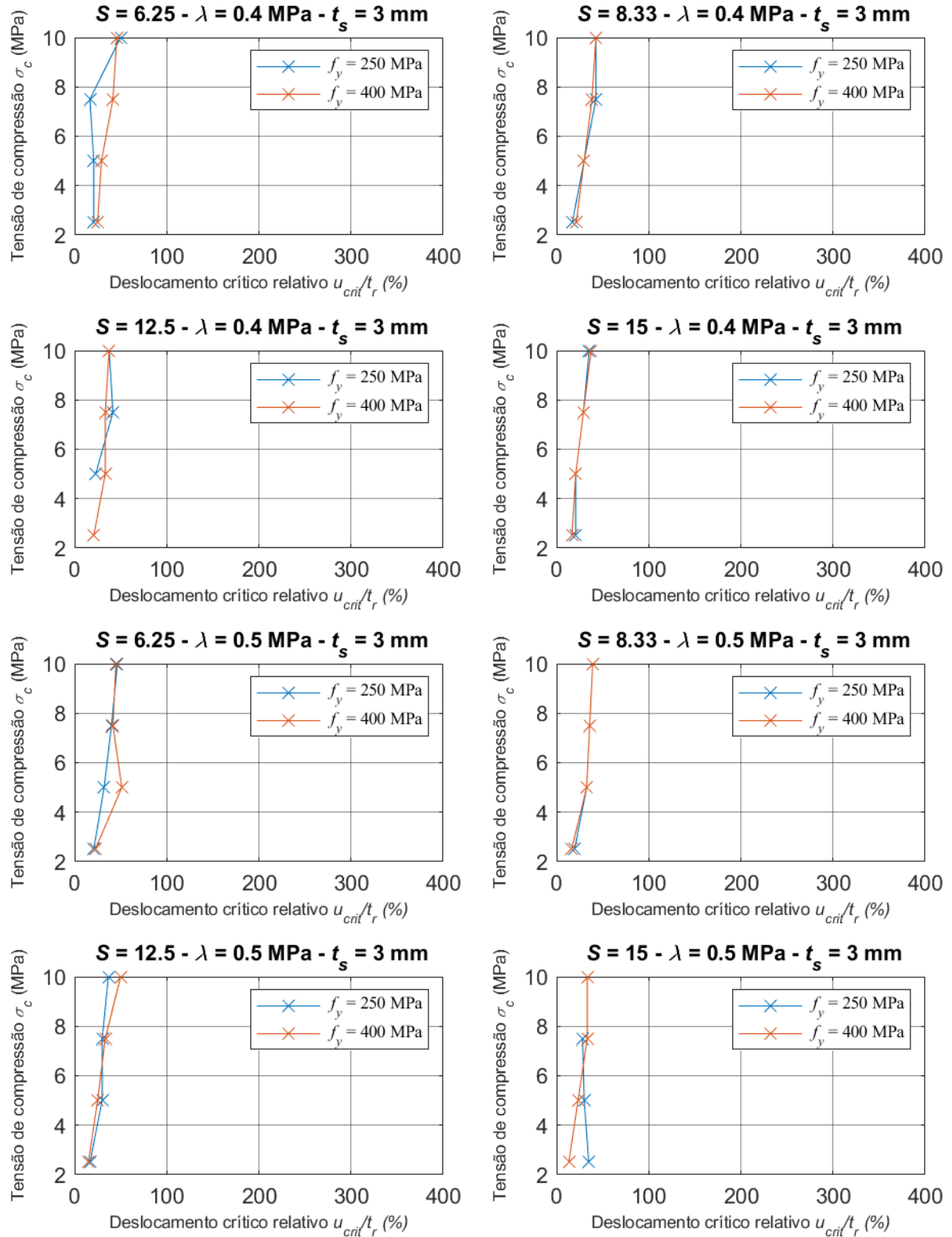


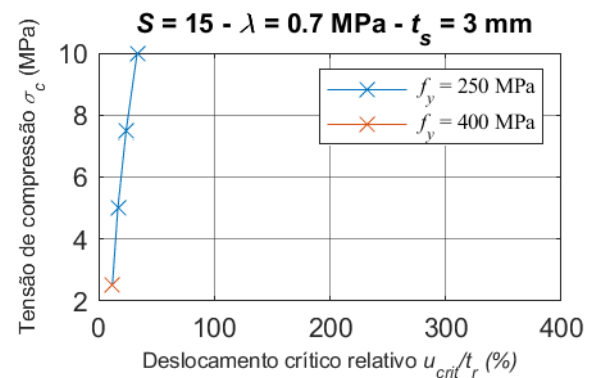
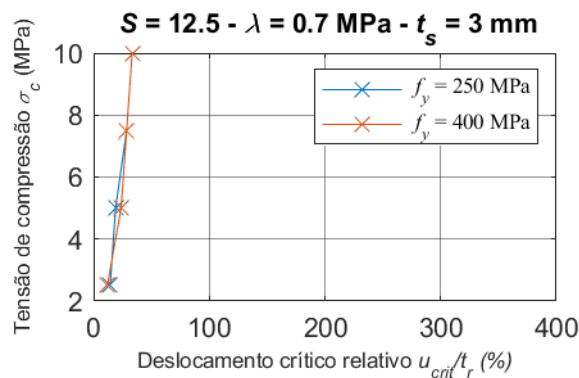
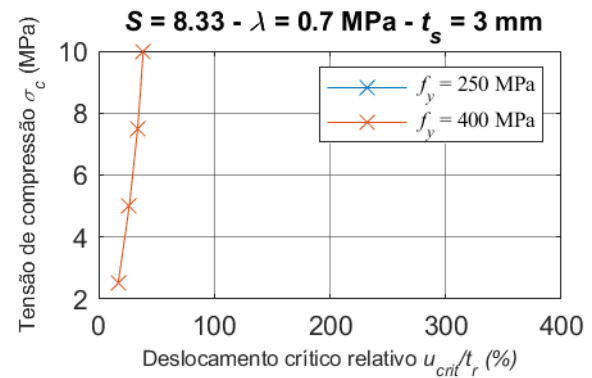
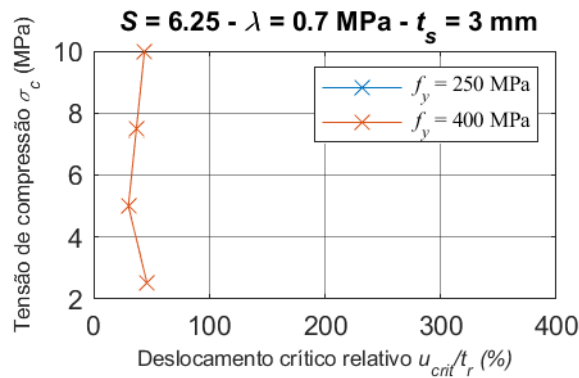
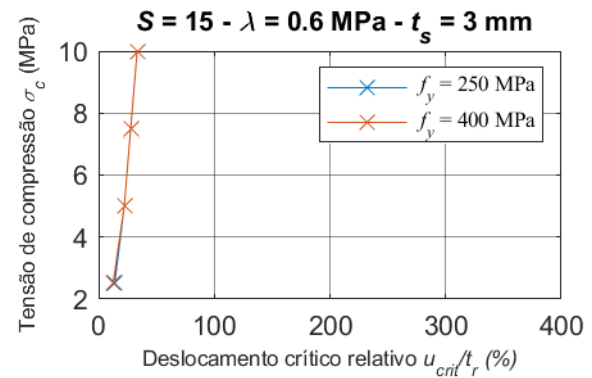
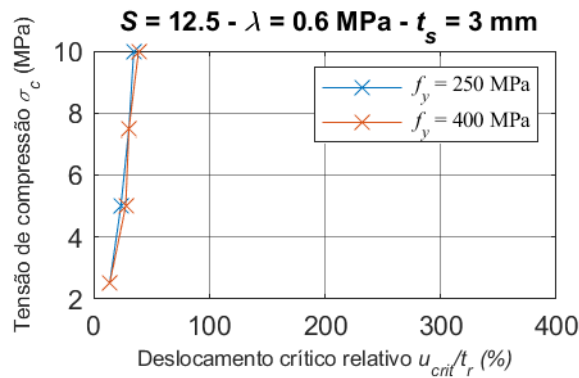
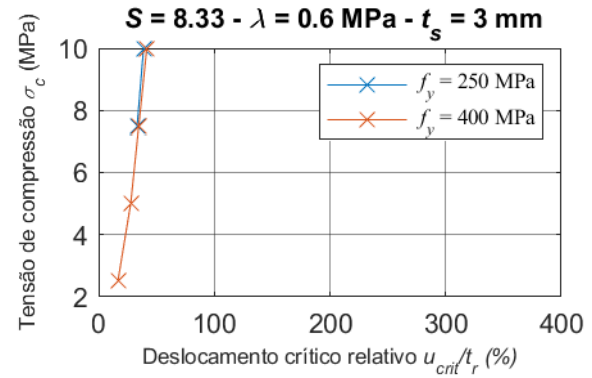
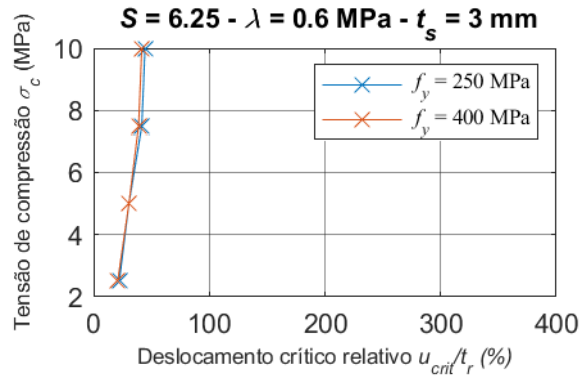


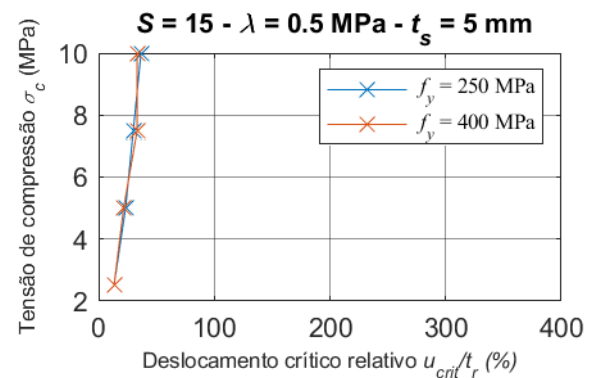
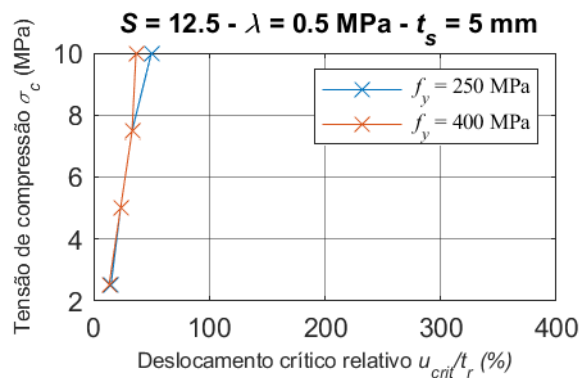
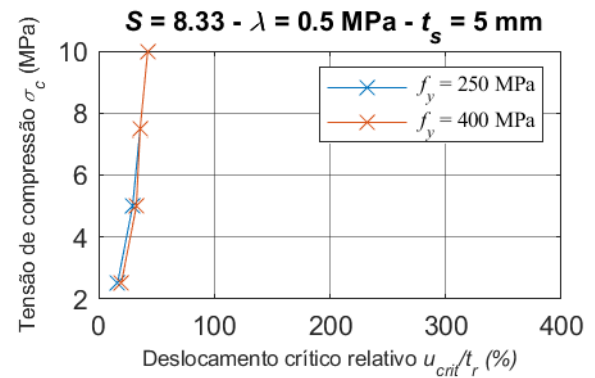
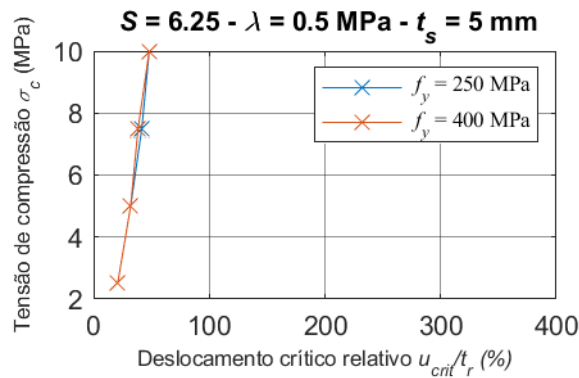
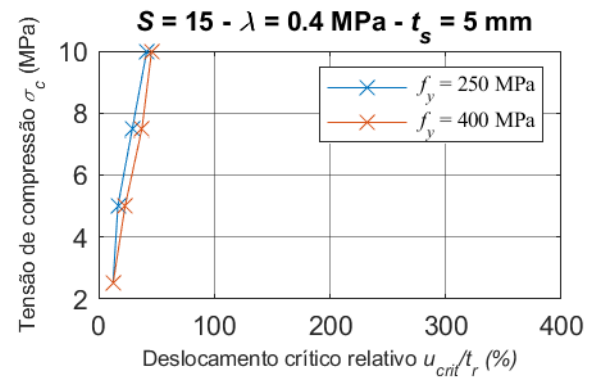
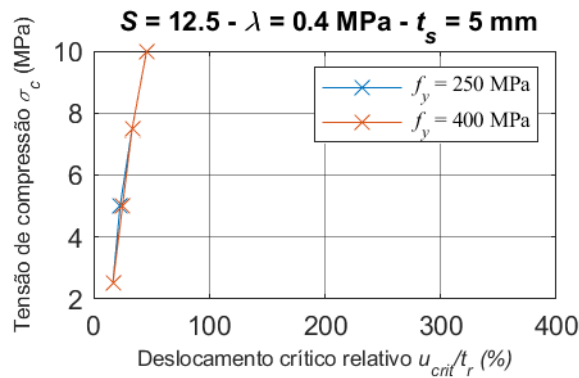
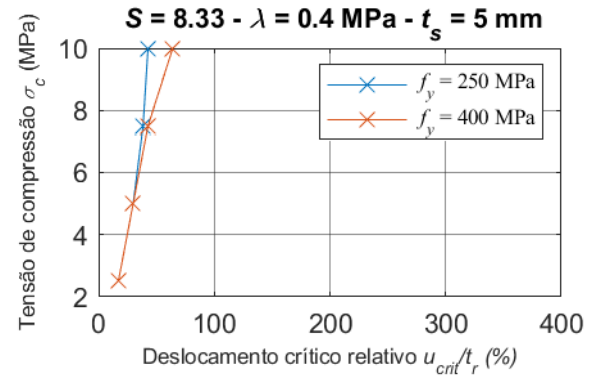
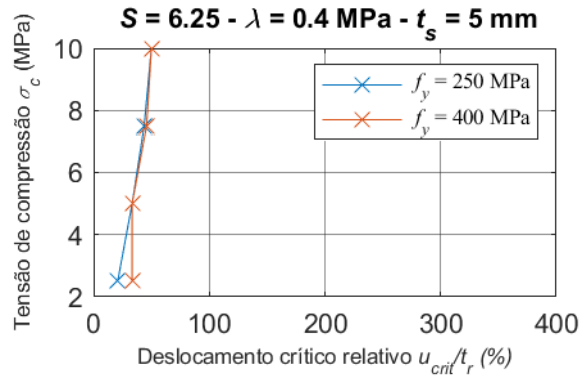


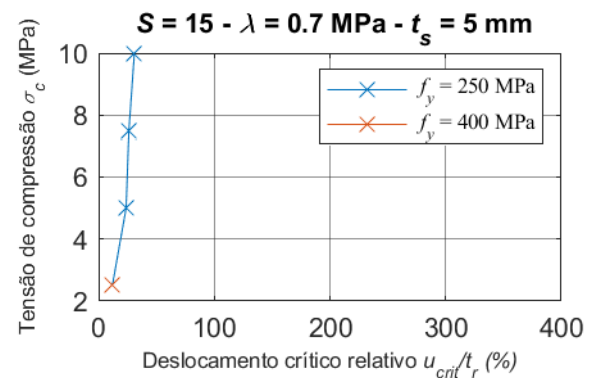
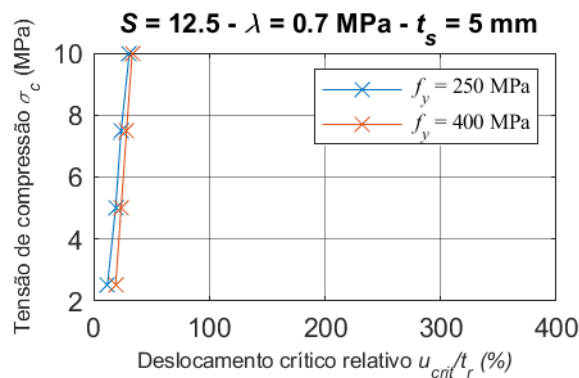
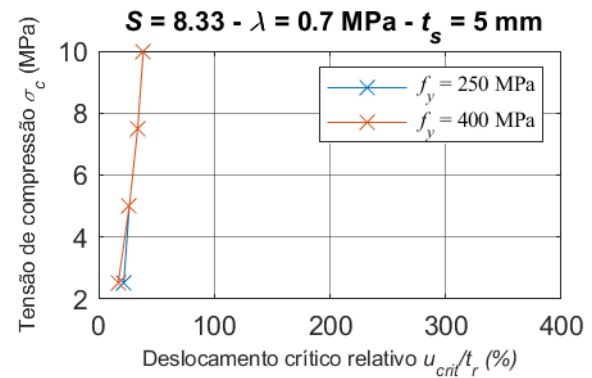
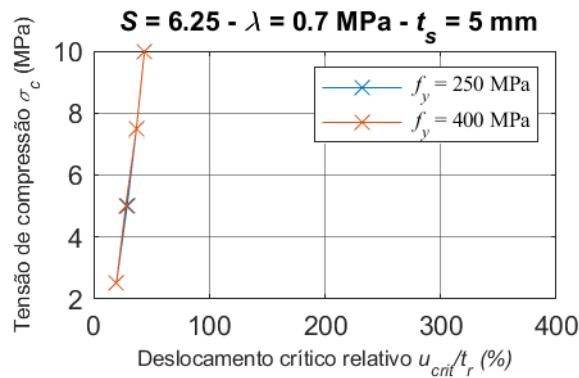
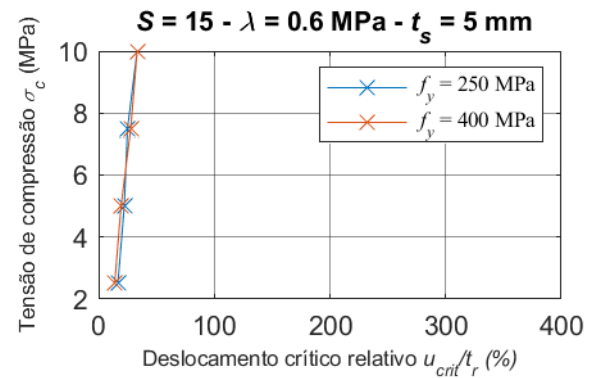
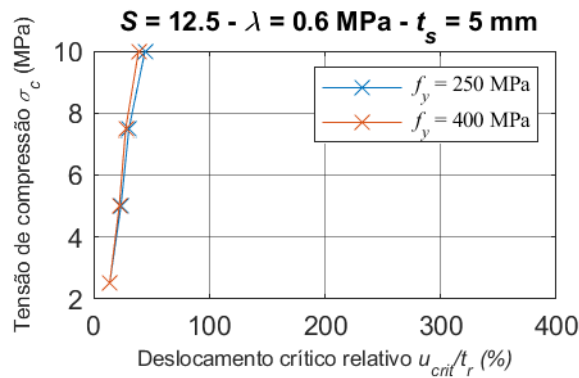
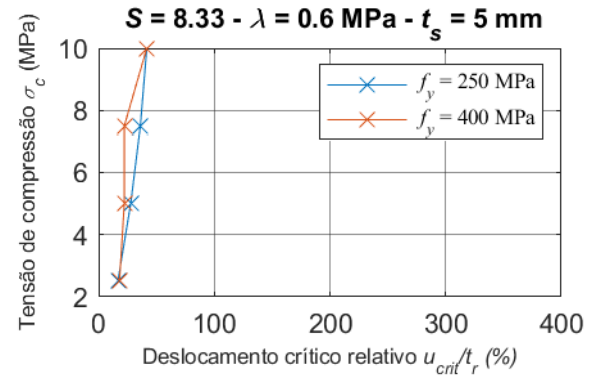
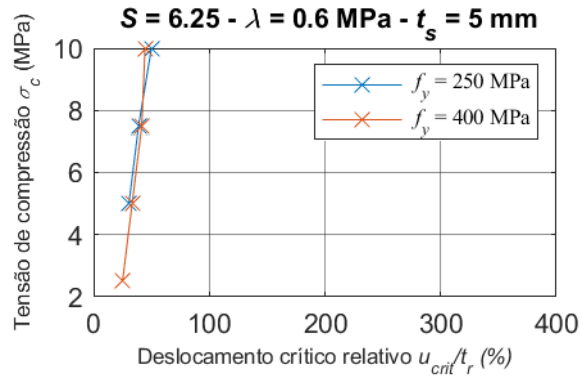
4.4.9. INFLUÊNCIA DA TENSÃO DE ESCOAMENTO DAS CHAPAS DE AÇO – EL LEVE

Figura 42 – Influência da tensão de escoamento das chapas de aço.









4.4.10. AVALIAÇÃO DA ANÁLISE PARAMÉTRICA – EL LEVE

Para avaliação da análise paramétrica, foram elaboradas as Tabelas 14 a 17, essas tabelas contemplam a média e o desvio padrão da diferença entre os valores máximos e mínimos de cada um dos gráficos para os diferentes patamares.

Tabela 14 – Médias e desvios padrões das diferenças entre fator de forma.

Patamar	Média (%)	Desv. Pad. (%)
2,5 MPa	11	8
5,0 MPa	10	6
7,5 MPa	13	5
10,0 MPa	12	4

Fonte: Dados do autor.

Tabela 15 – Médias e desvios padrões das diferenças entre fator de esbeltez.

Patamar	Média (%)	Desv. Pad. (%)
2,5 MPa	7	7
5,0 MPa	8	5
7,5 MPa	9	6
10,0 MPa	9	7

Fonte: Dados do autor.

Tabela 16 – Médias e desvios padrões das diferenças entre espessura do aço.

Patamar	Média (%)	Desv. Pad. (%)
2,5 MPa	4	6
5,0 MPa	3	4
7,5 MPa	3	5
10,0 MPa	4	5

Fonte: Dados do autor.

Tabela 17 – Médias e desvios padrões das diferenças entre escoamento do aço.

Patamar	Média (%)	Desv. Pad. (%)
2,5 MPa	2	4
5,0 MPa	3	4
7,5 MPa	3	5
10,0 MPa	3	5

Fonte: Dados do autor.

Das tabelas apresentadas, é possível observar o comportamento do isolador para diversas condições dos parâmetros estudados. Como as Tabelas 14 a 17 apresentam as médias das diferenças entre os valores máximos e mínimos dos deslocamentos críticos, tem-se que quanto maior esse valor para determinado parâmetro, maior a influência deste no comportamento do isolador.

Assim, é possível observar que, para o estado limite leve, todos os parâmetros avaliados apresentam baixa influência, variando o resultado de deslocamento crítico de 11% a 13% para o fator de forma de 7% a 9% para a esbeltez e de 2% a 4% para os parâmetros relativos à chapa de aço.

Dessa forma, a influência dos parâmetros estudados é praticamente nula para o estado limite leve, quando comparada com a influência desses parâmetros para os estados limites completo e moderado.

Isso se deve ao fato de que o estado limite leve está associado à inversão da tensão de cisalhamento na borracha, que independe dos parâmetros da chapa de aço e, embora seja associada à geometria devido às tensões atuantes que se distribuem na área do isolador, acaba independendo pois tanto a tensão de cisalhamento atuante quanto a de compressão (como apresentado na seção 2.6.3) variam similarmente de acordo com a área do isolador.

Assim, o estado limite leve apresenta resultados que dependem muito pouco das características geométricas e mecânicas do isolador.

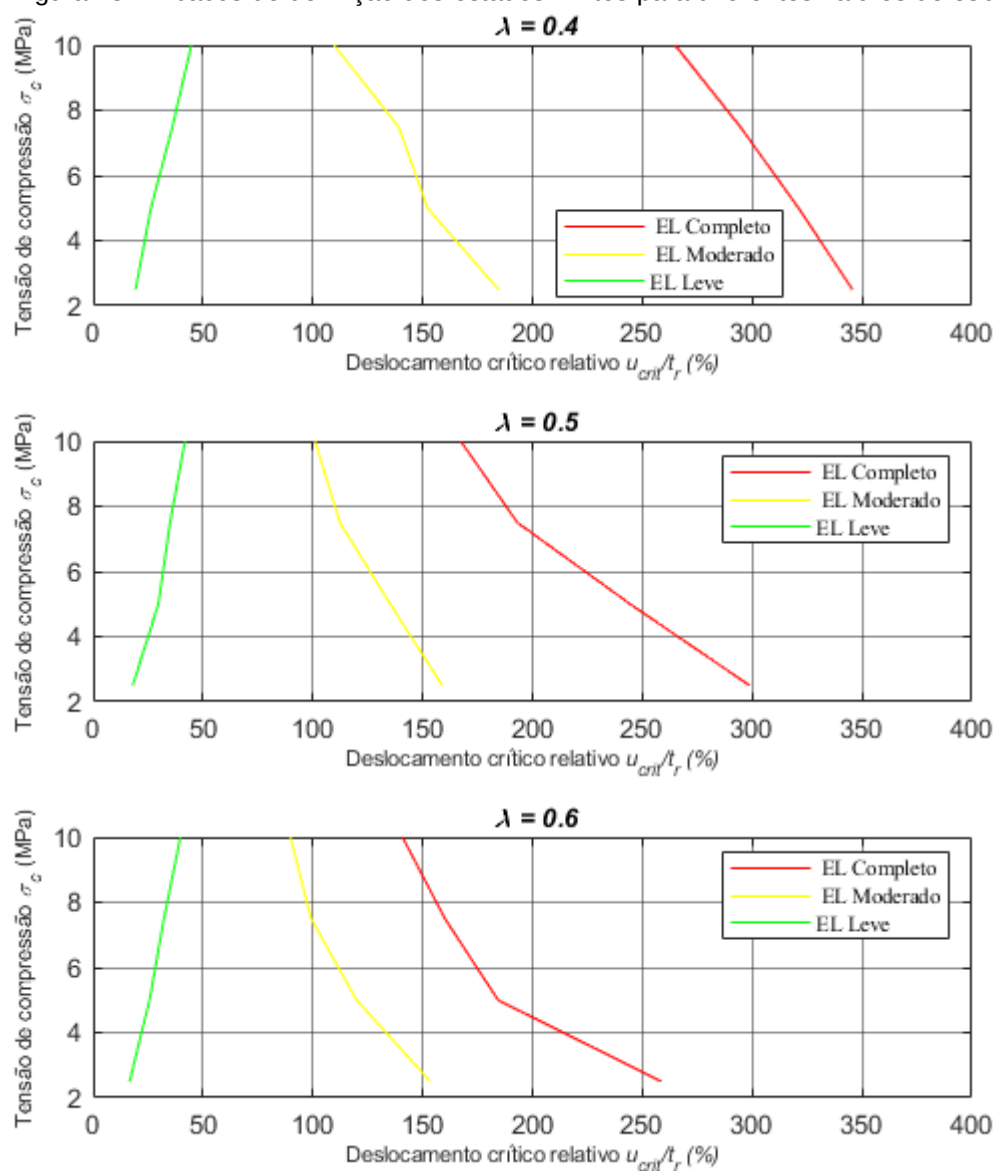
4.5. ÁBACOS DE DEFINIÇÃO DOS ESTADOS LIMITES

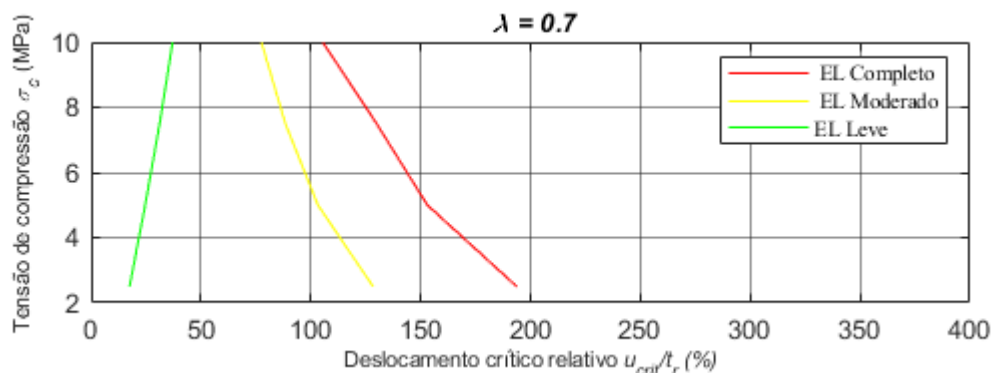
Por fim, observando-se que o fator mais influente para os Estados Limites Completo e Moderado é a esbeltez (λ), para facilitar a análise dos estados limites, e apresentar os resultados de uma maneira mais resumida, foram elaborados quatro

âbacos, com valores de esbeltez variando entre 0,4 e 0,7, sendo apresentadas, em cada um, curvas representativas dos três estados limites avaliados.

Por se tratar de um trabalho de estudo e análise de comportamento, as curvas citadas acima foram elaboradas a partir da média dos resultados dos demais parâmetros.

Figura 43 – Âbacos de definição dos estados limites para diferentes valores de esbeltez.





Fonte: Dados do autor.

Observando as curvas apresentadas na Figura 43, é possível observar que o comportamento apresentado está de acordo com todas as análises anteriormente feitas e que, além disso, o comportamento está dentro do esperado, de forma que o estado limite completo apresenta os maiores valores de deslocamento crítico, sendo seguido do moderado e então do leve.

É observado, também que para os estados limites completo e moderado, os valores de deslocamento crítico são reduzidos à medida que a tensão de compressão aumenta, enquanto ocorre o oposto para o estado limite leve. Isso se deve, pois o estado limite leve se refere à inversão de tensões na borracha, de forma que quanto menor a compressão atuante maior suscetibilidade dessa inversão.

Desses ábacos, é possível verificar que o Estado Limite Completo tende a se aproximar do Estado Limite Moderado à medida que a esbeltez do isolador aumenta, reduzindo o seu deslocamento crítico. O Estado Limite Moderado, também tende a ter seu deslocamento crítico reduzido, porém não com a mesma intensidade que o Completo, como esperado, visto que para este a influência da esbeltez é elevada.

Já o Estado Limite Leve, apresenta, praticamente, variação apenas para alterações no valor da tensão de compressão aplicada, como já apresentado anteriormente.

Com essas observações, e a partir das discussões das seções anteriores, tem-se que os ábacos gerados a partir dos resultados obtidos neste estudo apresentam resultados facilmente aplicáveis e que possibilitam de maneira prática a determinação das características de isoladores sísmicos, visto que apresentam curvas comparando os diferentes estados limites estudados e que todas as

observações realizadas nas seções de resultados desses estados limites se refletem nesses ábacos. Assim, os ábacos apresentados são um resumo de todos os resultados e observações do trabalho, sintetizando toda a análise realizada.

5. CONCLUSÃO

Neste trabalho, foram apresentados os principais conceitos relacionados à estabilidade de isoladores sísmicos de pontes e ao comportamento mecânico da borracha, seu principal componente.

Como o intuito de se estudar o comportamento desses isoladores foi elaborado um modelo numérico destes no software ABAQUS, a partir do qual foi realizada a sua calibração, utilizando como base ensaios experimentais realizados por Gauron *et al* (2018).

Essa calibração foi realizada considerando-se tanto aspectos qualitativos quanto aspectos quantitativos, avaliando-se o comportamento do isolador e os resultados das suas curvas de estabilidade. Por fim, o modelo foi calibrado, considerando-se seus resultados satisfatórios e próximos aos resultados experimentais de referência.

Após a calibração, foram elaborados mais 64 modelos, avaliando-se para cada um deles quatro patamares de tensões, totalizando assim 256 análises. A partir destas, foi realizada uma análise paramétrica da influência dos parâmetros dos isoladores considerados nesse trabalho, nos estados limites de perda de estabilidade e de ruptura por cisalhamento.

Assim, foi analisada a influência do fator de forma (S), do índice de esbeltez (λ), da classe de resistência (f_y) das chapas de aço e da espessura destas (t_s) no tipo de ruptura dos isoladores e no valor dos deslocamentos críticos (u_{cr}) para cada um dos quatro patamares de carga.

A partir dessa análise foi possível concluir que, como esperado, para baixas tensões de compressão a ruptura é predominantemente por cisalhamento, com exceção dos isoladores com valores de esbeltez altos. Inversamente à medida que a tensão de compressão vai aumentando, o tipo de ruptura passa a ser predominantemente por instabilidade, com exceção dos isoladores de valores de esbeltez baixos.

Além disso, foi possível observar que, dentre os parâmetros estudados, a esbeltez é o mais influente, seguido do fator de forma, para o qual quanto maior o seu valor, maior a suscetibilidade do isolador atingir a instabilidade. Quanto aos parâmetros referentes às chapas de aço, é possível observar que embora estes sejam

menos impactantes, alguns pontos ainda sofrem alteração de estado limite devida às variações deste.

A influência dos fatores citada é válida tanto para o tipo de ruptura do isolador quanto para o impacto no valor de deslocamento crítico, para o qual a esbeltez apresentou influência muito maior do que os demais parâmetros, como já proposto por Gauron *et al* (2018).

Além do estado limite completo, referente à ruptura dos isoladores, também foram determinados dois estados limites intermediários a partir desses modelos: o leve e o moderado. O primeiro consistiu na análise da inversão da tensão de cisalhamento da borracha e o segundo no início do escoamento das chapas de aço, situações essas que levam a alterações no comportamento dos isoladores, caracterizando assim um estado limite intermediário. Para cada um desses estados limites foi realizada novamente uma análise paramétrica, avaliando-se os parâmetros estudados e a influência destes.

Para o estado limite moderado, foi observado que a esbeltez continuou sendo o fator mais impactante, porém com menor influência do que no estado limite completo. A influência do fator de forma foi muito semelhante ao da esbeltez, embora um pouco abaixo. Em relação aos resultados provenientes da variação dos parâmetros relativos às chapas de aço, foi possível observar que o impacto destes aumentou quando comparado ao estado limite completo.

Assim, para o estado limite moderado, observou-se- que embora a esbeltez continue sendo o parâmetro predominante os outros parâmetros passam a ter influência muito mais próxima.

Para o Estado Limite Leve, os parâmetros apresentaram influência praticamente nula, quando comparada com a influência desses parâmetros para os estados limites completo e moderado.

Isso se deve ao fato de que o estado limite leve está associado à inversão da tensão de cisalhamento na borracha, que independe dos parâmetros da chapa de aço e, embora seja associada à geometria devido às tensões atuantes que se distribuem na área do isolador, acaba independendo pois tanto a tensão de cisalhamento atuante quanto a de compressão variam similarmente de acordo com a área do isolador

Por fim, foram elaborados quatro ábacos comparando os Estados Limites estudados nesse trabalho, para diferentes valores de esbeltez, considerada aqui como o parâmetro mais importante.

Dos ábacos, foi possível observar que o comportamento apresentado está de acordo com todas as análises anteriormente feitas e que, além disso, o comportamento está dentro do esperado, de forma que o estado limite completo apresenta os maiores valores de deslocamento crítico, sendo seguido do moderado e então do leve.

Foi observado, também, que para os estados limites completo e moderado, os valores de deslocamento crítico são reduzidos à medida que a tensão de compressão aumenta, enquanto ocorre o oposto para o estado limite leve. Além disso, o Estado Limite Completo tende a se aproximar do Estado Limite Moderado à medida que a esbeltez do isolador aumenta, reduzindo o seu deslocamento crítico. O Estado Limite Moderado, também tende a ter seu deslocamento crítico reduzido, porém não com a mesma intensidade. Já o Estado Limite Leve, apresentou comportamento praticamente inflexível.

Assim, a partir dessas análises e das discussões das seções anteriores, tem-se que os ábacos gerados a partir dos resultados do trabalho apresentam resultados muito satisfatórios, visto que apresentam curvas comparando os diferentes estados limites estudados e que todas as observações realizadas desses estados limites se refletem nesses ábacos. Dessa forma, os ábacos apresentados são um resumo de todos os resultados e observações do trabalho, sintetizando toda a análise realizada.

6. TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros nessa área existem as seguintes possibilidades:

- Estudo do comportamento e nível de estabilidade do isolador após eventos não destrutivos, após o escoamento das chapas de aço por exemplo;
- Avaliação com maior espaço amostral, incluindo chapas de aço mais finas e malha mais refinada, evitando problemas de convergência que causem perda dos dados do modelo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABAQUS/ ABAQUS standard. V. 2016. D. Systems editor.

AASHTO (2007). **AASHTO LRFD Bridge Design Specifications**, SI Units, 4th edition. American Association of State Highway and Transportations Officials.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9062: Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado**. Rio de Janeiro. 2017.

Bergström, J.S., Boyce, M.C. **Constitutive modeling of the large strain time dependent behavior of elastomers**. J Mech Phys Solids 1998;46:931–54.

Buckle I, Nagarajaiah S, Ferrell K. **Stability of elastomeric isolation bearings: experimental study**. ASCE J Struct Eng 2002;128(1):3–11.

Buckle I, Liu H. **Stability of elastomeric seismic isolation systems**. Proc., seminar on seismic isolation, passive energy dissipation and control, ATC-17-1. CA: Applied Technology Council; 1993. p. 293–305.

CEN. **European standard EN 15129: anti-seismic devices**. European Committee for Standardization; 2010.

Constantinou, M. C., Whittaker, A. S., Kalpakidis, Y., Fenz, D. M. et Warn, G. P. (2007). **Performance of Seismic Isolation Hardware under Service and Seismic Loading (Rapport technique)**. Report MCEER-07-0012, University at Buffalo, State University of New York. 2007.

Constantinou, M. C., Tsopelas, P., Kasalanati, A. et Wolff, E. D. (2015). **Property Modification Factors for Seismic Isolation Bearings (Rapport technique)**. MCEER- 15-0005, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York at Buffalo, NY.

Constantinou, M. C., Tsopelas, P., Kasalanati, A. et Wolff, E. D. (1999). **Property Modification Factors for Seismic Isolation Bearings (Rapport technique). MCEER- 99-0012**, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York at Buffalo, NY.

Dorfmann, A. et Ogden, R. W. (2004). **A constitutive model for the mullins effect with permanent set in particle-reinforced rubber**. International Journal of Solids and Structures, volume 41, p. 1855–1878.

fib (2007). **Seismic bridge design and retrofit - structural solutions (Rapport technique Bulletin 39)**. Fédération Internationale du Béton.

Gauron Olivier, Saidoua Adamou, Bussona Arnaud, Siqueira Gustavo Henrique, Paultre Patrick. **Experimental determination of the lateral stability and shearfailure limit states of bridge rubber bearings**. Eng Struct 2018;174:39–48.

Gent A. **Elastic stability of rubber compression springs**. J Mech Eng Sci 1964;6(4):318–26.

Gent, A. N. et Lindley, P. B. (1959). **The compression of bonded rubber blocks**. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, volume 173(3), p. 111 122.

Han X, Warn G. **Mechanistic model for simulating critical behavior in elastomeric bearings**. ASCE J Struct Eng 2015;141(5). 04014140(12).

Haringx J. **On highly compressive helical springs and rubber rods and their applications for vibration-free mountings**. I. Philips Res Rep 1948;3:401–49.

Haringx J. **On highly compressive helical springs and rubber rods and their applications for vibration-free mountings**. II. Philips Res Rep 1949;4:49–80.

Haringx J. **On highly compressive helical springs and rubber rods and their applications for vibration-free mountings**. III. Philips Res Rep 1949;4:206–20.

Kalfas Konstantinos N, Mitoulis Stergios A, Katakalos Konstantinos. **Numerical study on the response of steel-laminated elastomeric bearings subjected to variable axial loads and development of local tensile stresses.** Eng Struct 2017;134:346–57.

Kalfas Konstantinos N, Mitoulisb Stergios A. **Performance of steel-laminated rubber bearings subjected to combinations of axial loads and shear strains.** Procedia Eng 2017;199:2979–84.

Khaloo A, Maghsoudi-Barmi A, Moeini ME. **Numerical parametric investigation of hysteretic behavior of steel-reinforced elastomeric bearings under large shear deformation.** In Structures 2020 Aug 1 (Vol. 26, pp. 456-470). Elsevier.

Kelly J. **Dynamic and failure characteristics of Bridgestone bearings.** Tech rep UCB/ EERC-91/04. Berkeley (CA): Earthquake Engineering Research Center, University of California; 1991.

Kelly, J. M. (1997). **Earthquake-Resistant Design with Rubber**, 2nd édition. Springer.

Kelly JM, Takhirov SM. **Tension buckling in multilayer elastomeric isolation bearings.** J Mech Mater Struct 2007;2(8):1591–605.

Koh CG, Kelly JM. **Viscoelastic stability model for elastomeric isolation bearings.** ASCE J Struct Eng 1989;115(2):285–302.

Koh, C. G. et Kelly, J. M. (1987). **Effects of Axial Load on Elastomeric Isolation Bearings (Rapport technique). Report UCB/EERC-86/12**, Earthquake Engineering Research Center, University of California at Berkeley.

Kim Beomkeun, Lee Seong Beom, Lee Jayone, Cho Sehyun, Park Hyungmin, Yeom Sanghoon, *et al.* **A comparison among Neo-Hookean Model Mooney-Rivlin Model,**

and Ogden model for chloroprene rubber. Int J Precis Eng Manuf 2012;13(5):759–64.

Naeim F, Kelly J. **Design of seismic isolated structures - from theory to practice.** New York (NY): John Wiley & Sons, Inc.; 1999.

Naghavi Mohammad, Rahnavard Rohola, Thomas Robert J, Malekinejad Mohsen. **Numerical evaluation of the hysteretic behavior of concentrically braced frames and buckling restrained brace frame systems.** J Build Eng 2019;22:415 28.

R Rahnavard, HD Craveiro, R Napolitano. **Static and dynamic stability analysis of a steel-rubber isolator with rubber cores.** Structures 26, 441-455. Elsevier.

Roeder, C. W., Stanton, J. F. et Taylor, A. W. (1987). **Performance of elastomeric bearings (Rapport technique). NCHRP Report 298**, Transp. Res. Board, National Research Council, Washington, D.C.

Siqueira, Gustavo H. **Vulnerability assessment of highway bridges in Quebec retrofitted using natural rubber seismic isolators.** PhD thesis. Sherbrooke (QC): Faculté de Génie, Département de Génie Civil, Université de Sherbrooke; 2013.

Siqueira, Gustavo H. *et al.* **Fragility curves for isolated bridges in eastern Canada using experimental results.** Engineering Structures, v. 74, p. 311-324, 2014.

Stanton, J. F. et Roeder, C. W. (1982). **Elastomeric Bearings Design, Construction, and Materials (Rapport technique). NCHRP Report 248**, Transp. Res. Board, National Research Council, Washington, D.C.

Toopchi-Nezhad Hamid, Tait Michael J, Drysdale Robert G. **Testing and modeling of square carbon fiber-reinforced elastomeric seismic isolators.** Struct. Control Health Monit 2008;15:876–900.

Toopchi-Nezhad Hamid, Tait Michael J, Drysdale Robert G. **Bonded versus unbonded strip fiber reinforced elastomeric isolators**: Finite element analysis. Compos Struct 2011;93:850–9.

Warn G, Weisman J. **Parametric finite element investigation of the critical load capacity of elastomeric strip bearings**. Eng Struct 2011;33:3509–15.