

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

RAFAEL DE PAULA ASSIS

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DAS ARGAMASSAS DE
ASSENTAMENTO ATRAVÉS DO MÉTODO DOS ELEMENTOS DISCRETOS
FORMADO POR BARRAS**

Alegrete

2021

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DAS ARGAMASSAS DE
ASSENTAMENTO ATRAVÉS DO MÉTODO DOS ELEMENTOS DISCRETOS
FORMADO POR BARRAS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de
Engenharia Civil da Universidade
Federal do Pampa, como requisito
parcial para obtenção do Título de
Bacharel em Engenharia Civil

Orientador: Luís Eduardo Kostas

Alegrete

2021

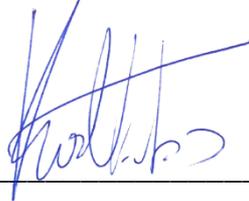
RAFAEL DE PAULA ASSIS

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DAS ARGAMASSAS DE
ASSENTAMENTO ATRAVÉS DO MÉTODO DOS ELEMENTOS DISCRETOS
FORMADO POR BARRAS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de
Engenharia Civil da Universidade
Federal do Pampa, como requisito
parcial para obtenção do Título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 29 de abril de
2021.

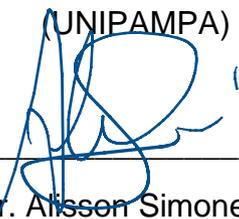
Banca examinadora:



Prof. Dr. Luis Eduardo Kostascki

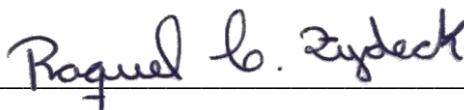
Orientador

(UNIPAMPA)



Prof. Dr. Alisson Simonetti Milani

(UNIPAMPA)



Eng. Civil Raquel Zydeck

AGRADECIMENTO

Agradeço principalmente à minha família, meu Pai Henrique, minha mãe Luciane e meu irmão Pedro Henrique por toda paciência, pelo carinho e incentivo essencial para nunca desistir nestes anos da graduação.

Gostaria de agradecer meus amigos de vida, Vinicius da Luz, Bruno Antunes, Leonardo Willian, Matheus Reffatti e Lucas Rodrigues, por todo apoio, principalmente nos tempos mais difíceis durante a graduação. E por sempre acreditarem em mim.

Gostaria de agradecer aos amigos que a Unipampa me apresentou e que vou levar pra vida, Dominique Jank, Paulo Emanuel, Guilherme Lena, Flavio Solis e Daniela Calegari, foram meus amigos de estudo, de projetos, de ansiedade antes de uma prova, muito obrigado. Agradecer também a Karia Paes por todo apoio de sempre.

Agradeço ao meu orientador, Luis Eduardo Kostas, por toda a ajuda e orientação em desenvolver este trabalho, onde foi um desafio enorme.

“Daqui para frente, estaremos deixando o terreno firme dos fatos para viajar juntos pelos turvos alagados da memória e nos embrenhar pelo matagal das suposições mais absurdas”.

Alvo Dumbledore

RESUMO

Simular a fratura dos materiais através de métodos numéricos está tornando-se cada vez mais comum, porém ainda não existe um método com 100% de precisão na hora de comparar com os resultados experimentais. Este trabalho consiste em utilizar o método dos elementos discretos formado por barras (LDEM) para simular a ruptura de corpos de prova de argamassa para assentamento submetidos à compressão axial. O LDEM abrange em simular a falha dos materiais através do contínuo que é representado por intermédio de um arranjo espacial de barras com a massa centrada nas suas pontas. Os corpos de prova serão submetidos a esforços de compressão, onde o corpo das amostras é composto pela malha formada pelo LDEM e das malhas da prensa que executam o esforço de compressão é formado pelo método dos elementos finitos (FEM). Na área de contato entre as amostras e os pratos da prensas foram utilizadas duas leis de contato diferentes, onde a primeira lei de contato rough representa uma graxa entre a face da amostra e a prensa e a segunda lei de contato frictionless representam atrito zero entre a face da amostra e a prensa. Após simulados os corpos de prova com as diferentes leis de contato os resultados são comparados, sendo eles: módulo de elasticidade, gráfico tensão x deformação, coeficiente de Poisson, tensão de ruptura e ruptura das amostras, para duas alturas diferentes de amostras, sendo elas 33 mm e 100 mm, dos quais os resultados serão comparados com os resultados práticos obtidos no trabalho de conclusão de curso (TCC) de Staler, 2019. A lei de contato que melhor representou os resultados numéricos juntamente com DEM e com Stalter, 2019 foi a lei de contato frictionless. Rough apenas não expressou resultados não satisfatórios nos parâmetros das tensões de ruptura e coeficiente de Poisson.

Palavras chave: Métodos dos elementos discretos formado por barras, Leis de contato, Módulo de elasticidade, Falha materiais e coeficiente de Poisson.

Abstract

Simulating the fracture of materials through numerical methods is becoming increasingly common, but there is still no method with one hundred percent accuracy when comparing with practical results. This paper consists of using the discrete element method (DEM) to simulate the failure of mortar specimens subjected to axial compression. The DEM involves simulating the failure of materials through the continuum, which is represented by a spatial arrangement of bars with mass centered at their ends. The specimens will be subjected to compressive stresses, where the specimen body is composed of the mesh formed by the DEM and the mesh of the presses that perform the compressive stress is formed by the finite element method (FEM). In the contact area between the specimens and the presses two different contact laws will be used, where the rough contact law represents a grease between the specimen face and the press and the frictionless contact law represents zero friction between the specimen face and the press. After simulating the specimens with the different contact laws will be compared the results of modulus of elasticity, stress x strain graph, Poisson's coefficient, tensile strength and rupture of the specimens, for two different specimen heights, with heights of 33 mm and 100 mm, two which the will be compared with the practical results obtained in the course completion work (TCC) of Staler, 2019. The contact law that best represented the numerical results along with DEM and Stalter, 2019 was the frictionless contact law. Rough only expressed unsatisfactory results in the parameters of shear stresses and Poisson's coefficient.

Keywords: Bar-formed discrete element methods, contact laws, modulus of elasticity, failure materials, Poisson's ratio.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Comportamento tensão-deformação dos corpos de prova de prova com altura de 100 mm e traço de argamassa (1:0,5:4).....	21
Figura 02: Comportamento tensão-deformação dos corpos de prova de prova com altura de 33 mm e traço de argamassa (1:0,5:4).....	21
Figura 03: Variação do coeficiente de Poisson médio em função do nível de tensão aplicado, traço I (1:0,5:4) – altura de 100 mm.....	23
Figura 04: Variação do coeficiente de Poisson médio em função do nível de tensão aplicado, traço I (1:0,5:4) – altura de 33 mm.....	23
Figura 05: Ruptura dos Corpos de Prova – Traço (1:0,5:4), altura de 100 mm.....	24
Figura 06: Ruptura dos Corpos de Prova – Traço (1:0,5:4), altura de 33 mm.....	24
Figura 07: Exemplos de divisão.....	25
Figura 08: Exemplo de malha no MEF.....	26
Figura 09: Configuração utilizada por Nayfeh e Hefzy, 1978, no DEM.....	28
Figura 10: Modelo Bilinear.....	30
Figura 11: Disposição cúbica da treliça.....	32
Figura 12: Modelo do cubo com a discretização das massas.....	33
Figura 13: Modelo de falha do elemento utilizada no Abaqus/Explic.....	34
Figura 14: Função da probabilidade onde foram definidos os intervalos com a mesma probabilidade de ocorrência.....	35
Figura 15 – Corpos de prova de Altura (a) de 33 mm e (b) 100 mm.....	36
Figura 16: Dimensões dos corpos de prova simulados com o LDEM.....	37
Figura 17: Modelos numéricos para ensaios que se utiliza a lei de contato rough e a lei de contato fricitionless para a altura dos cp's de 33 mm.....	38

Figura 18: Modelos numéricos para ensaios que se utiliza a lei de contato rough e a lei de contato fricitionless para a altura dos cp's de 100 mm.....	38
Figura 19: Exemplo de nós selecionados para o corpo de prova de 100 mm.....	40
Figura 20: Exemplo de nós selecionados para o corpo de prova de 33 mm.	41
Figura 21: Exemplo de nós selecionados para o corpo de prova de 33 mm.....	42
Figura 22: Exemplo de nós selecionados para o corpo de prova de 100 mm...42	
Figura 23: Comportamento tensão x deformação dos corpos de prova de altura 33 mm com lei de contato (a) frictionless e lei de contato (b) rough.....	44
Figura 24: Comportamento tensão x deformação dos corpos de prova de altura 100 mm com lei de contato (a) frictionless e lei de contato (b) rough.....	45
Figura 25: Comportamento Tensão x Deformação dos corpos de prova, com altura de 33 mm, a) Comportamento experimental e b) Comportamento numérico com lei de contato frictionless.....	45
Figura 26: Comportamento Tensão x Deformação dos corpos de prova, com altura de 33 mm, a) Comportamento experimental e b) Comportamento numérico com lei de contato rough.....	46
Figura 27: Comportamento Tensão x Deformação dos corpos de prova, com altura de 100 mm, a) Comportamento experimental e b) Comportamento numérico com lei de contato frictionless.....	46
Figura 28: Comportamento Tensão x Deformação dos corpos de prova, com altura de 100 mm, a) Comportamento experimental e b) Comportamento numérico com lei de contato rough.....	47
Figura 29: – Variação do coeficiente de Poisson em função da tensão aplicada nos corpos de prova de 33 mm, com lei de contato (a) frictionless e lei de contato (b) rough.....	51

Figura30: – Variação do coeficiente de Poisson em função da tensão aplicada nos corpos de prova de 33 mm, com lei de contato (a) frictionless e lei de contato (b) rough.....	52
Figura31: – Variação do coeficiente de Poisson em função da tensão aplicada nos corpos de prova de 100 mm, com lei de contato (a) frictionless e lei de contato (b) rough.....	52
Figura 32: – Variação do coeficiente de Poisson em função da tensão aplicada nos corpos de prova de 100 mm, com lei de contato (a) frictionless e lei de contato (b) rough.....	53
Figura 33: Comportamento Coeficiente de Poisson dos corpos de prova, com altura de 33 mm, a) Comportamento Experimental e b) Comportamento numérico, onde: Frictionless 1 e Rough 1 Coeficiente Poisson medido na região perto dos apoios e Frictionless 2 e Rough 2 Coeficiente de Poisson medido na região central (h = 16,5 mm).....	53
Figura 34: Comportamento Coeficiente de Poisson dos corpos de prova, com altura de 100 mm, a) Comportamento Experimental e b) Comportamento numérico, onde: Frictionless 1 e Rough 1 Coeficiente Poisson medido na região perto dos apoios e Frictionless 2 e Rough 2 Coeficiente de Poisson medido na região central (h = 50 mm).....	54
Figura 35: Ruptura dos cinco corpos de altura com lei de contato frictionless e altura de 33 mm.....	56
Figura 36: Ruptura dos cinco corpos de altura com lei de contato rough e altura de 33 mm.....	56
Figura 37: Ruptura dos 5 corpos de altura com lei de contato fricitionless e altura de 100 mm.....	57
Figura 38: Ruptura dos cinco corpos de altura com lei de contato rough e altura de 100 mm.....	5

LISTA DE TABELAS

Tabela 01: Valores de tensão de ruptura dos corpos de prova.....	34
Tabela 02: Propriedades Malha Cilíndrica.....	39
Tabela 03: Propriedades Prensa Metálica.....	39
Tabela 04: Tensão de ruptura dos corpos de prova numéricos de altura 33 mm.	48
Tabela 05: Tensão de ruptura dos corpos de prova numéricos de altura 100 mm.	48
Tabela 06: Módulo de Elasticidade dos corpos de prova numéricos de altura 33 mm.....	49
Tabela 07: Módulo de Elasticidade dos corpos de prova numéricos de altura 100 mm.....	50

LISTA DE SIMBOLOS

A_d – Área dos elementos diagonais.

ε_p - deformação máxima.

ε_r – Deformação de Falha.

ε_d = Deformação diametral;

ε_v = Deformação no sentido da carga (Vertical)

ε = Deformação;

A_l – Área da seção transversal do elemento longitudinal.

ν = Módulo de Poisson.

L – Comprimento do módulo cúbico do LDEM

μ = Coeficiente de Poisson.

σ = Tensão de Compressão

ΔL = Variação do Deslocamento (m)

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

LDEM – Método dos Elementos discretos formado por barras

DEM- Método dos Elementos discretos

FEM – Métodos dos Elementos Finitos

CP – Corpo de Prova

CP'S – Corpos de Prova

MPa - MegaPascal

GPa - GigaPascal

mm – milímetro

mm² - milímetro quadrado

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 OBJETIVOS	17
1.1.1 Objetivos Geral	17
1.1.2 Objetivos Específicos	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1 Ensaio à Compressão Axial das Argamassas de Assentamento	19
2.1.1 Resultados Experimentais	19
2.1.2 Valor do Módulo de Elasticidade da Argamassa (E_c)	20
2.1.3 Gráfico Tensão x Deformação	20
2.1.4 Coeficiente de Poisson da Argamassa	22
2.1.5 Ruptura das Amostras	23
2.2 Método dos Elementos finitos	25
2.2 Método dos Elementos Discretos	27
2.3 Método dos Elementos Discretos Formado por Barras	27
2.4 Lei Bilinear	29
2.5 Implementação do LDEM no ambiente Abaqus/Explicit	31
2.6 Trelça Espacial LDEM	31
2.7 Discretização das Massas	32
2.8 Inserção do modelo constitutivo no Abaqus/Explicit	34
2.9 Inclusão do caráter aleatório	34
2.10 Inserção da malha cilíndrica no ambiente Abaqus/Explicit	35
3 MATERIAIS E MÉTODOS	37
3.1 Metodologia	37
3.1.1 Propriedades Mecânicas Argamassa de Assentamento	38
3.1.2 Gráfico tensão x Deformação	39
3.1.3 Módulo de Elasticidade	41

3.1.4 Coeficiente de Poisson	41
4 RESULTADOS.....	44
4.1. Gráfico Tensão x Deformação	44
4.2 Módulo de Elasticidade	49
4.3 Coeficiente de Poisson	51
4.4 Ruptura dos Corpos de Prova.....	55
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	59
5.1 Sugestões para trabalhos futuros	60
6 REFERÊNCIAS.....	61

1 INTRODUÇÃO

Nas de paredes de alvenaria conhecer as propriedades mecânicas das argamassas é de suma importância, pois a argamassa de assentamento tem influência sobre o modo de ruptura. Porém, como explicado por Mohamad 2009, o comportamento das argamassas de assentamento, assim como a determinação de suas propriedades mecânicas é de difícil reprodução em laboratório, pois são poucos os estudos dos efeitos do confinamento exercido pelo bloco nas argamassas de assentamento. Muitas vezes as propriedades são tratadas como constantes ou obtidas através de ensaios uniaxiais, o qual não representa o estado real de tensões na alvenaria.

Entre outros trabalhos que estudam este problema, o trabalho de conclusão de curso (TCC) de Stalter (2019) consistiu em analisar o comportamento tensão-deformação de corpos de prova de argamassas de assentamento comprimidos axialmente. Stalter (2019) avaliou a influência da resistência e do grau de confinamento da argamassa em relação ao comportamento tensão-deformação, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson através de ensaios de compressão em corpos de provas cilíndricos instrumentados com straingauges.

Neste trabalho foi estudado uma forma de verificar melhor as propriedades mecânicas da argamassa de assentamento, de forma numérica. Pois através das simulações é possível verificar de forma detalhada o que acontece em problemas nos quais não é tão simples fazer verificações experimentais.

Para este fim se escolheu trabalhar com o Método dos elementos discretos formado por barras (do inglês LDEM). Segundo Kosteski (2012), o LDEM tem a habilidade natural para introduzir descontinuidades (trincas) de uma maneira muito direto e intuitiva, bastando romper a ligação entre seus componentes. Diferente do Método dos Elementos Finitos (FEM) onde baseia-se caracterização do contínuo (sem trincas) simulando as deformações para analisar o elemento em questão.

Rocha,(1997) foi um dos primeiros trabalhos em que foi utilizado o LDEM, onde o qual apresentou como vantagem do método a representação do material quando há perda de continuidade ao longo do processo de ruptura. Já RIOS, (2002), fala que o LDEM é extremamente vantajoso de ser usado em estudos de fratura de materiais frágeis e propagação de fissura. Cabe salientar que o LDEM não se restringe apenas a materiais frágeis, tendo sido aplicado com sucesso em materiais dúcteis e no concreto armado.

Através do LDEM é possível utilizar leis constitutivas para simular a falha do elemento. Neste estudo será utilizado o modelo Bilinear ou de Hillerborg. Esta lei tem o mesmo princípio, que quando um elemento rompe geram-se as áreas de fatura equivalentes, liberando-se energia de fratura que depende da área da fratura e da equação da lei constitutiva do material.

O presente trabalho consiste em utilizar o método dos elementos discretos formado por barras (LDEM) para simular a fratura das argamassas de assentamento, através da lei Bilinear. Isso será possível através da simulação do corpo de prova submetido a esforços de compressão com a ajuda do software comercial Abaqus/Explicit. Com a utilização deste método é capaz de verificar a propagação da trinca e analisar os gráficos de tensão x deformação, calcular o módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivos Geral

O objetivo geral desta pesquisa é avaliar as variações das propriedades mecânicas das argamassas de assentamento comprimidas axialmente, com diferentes resistências.

1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são:

- Simular corpos de prova cilindros submetidos à compressão alterando a lei de contato entre os espécimes e os pratos da máquina de ensaios.
- Verificar o comportamento de tensão de compressão versus deformação.
- Calcular módulo de elasticidade dos corpos de prova numéricos.
- Estudar como varia o coeficiente de Poisson durante o teste.
- Analisar a forma e mecanismos de ruptura dos corpos de prova.
- Comparar os resultados obtidos no trabalho com os resultados experimentais obtidos por Stalter, (2019).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Ensaio à Compressão Axial das Argamassas de Assentamento

Como cita Costa (2015), a análise do comportamento da argamassa de assentamento é fundamental, uma vez que esta garante o monolitismo e a solidez necessária ao conjunto, cabendo ressaltar que a função principal da argamassa é transmitir todas as ações atuantes da estrutura até a fundação. Logo, uma argamassa considerada adequada para alvenaria estrutural está vinculada com a capacidade de dissipação dos esforços atuantes na mesma, sem que incida fissuras prejudiciais a alvenaria.

O Ensaio à Compressão Axial das Argamassas de Assentamento busca de alguma maneira descrever o comportamento da argamassa confinado, através da avaliação das propriedades mecânicas como o módulo de elasticidade, o coeficiente de Poisson e o comportamento tensão x deformação

Como descreve, Lubeck (2016) o fenômeno de confinamento se dá pela existência da aderência entre a argamassa e os blocos nas juntas de alvenaria. Sendo a argamassa mais deformável que o bloco. A aderência entre a argamassa e os blocos de força que a deformação real seja um valor intermediário sobre a tendência de deformação dos dois materiais. Assim, desenvolvem-se tensões laterais e os blocos ficam sujeitos a um estado compressão e tração biaxial, enquanto que a argamassa é comprimida triaxialmente.

A tensão de confinamento é de extrema importância no ensaio triaxial das argamassas, pois nos estudos de Mohamed (1999), traços de argamassa mais fortes apresentam um sensível aumento no módulo de elasticidade à medida que se aumenta as tensões de confinamento, quanto que traços mais fracos mostram uma diminuição no módulo de elasticidade com o aumento das tensões de confinamento.

2.1.1 Resultados Experimentais

Os resultados experimentais utilizados neste trabalho, foram retirados do Trabalho de Conclusão de Curso da Thais Stalter (TCC). O trabalho d Stalter

(2019) consistiu em analisar o comportamento tensão-deformação de corpos de prova de argamassas de assentamento comprimidos axialmente. Através de ensaios de compressão em corpos de provas cilíndricos instrumentados com *straining gauges* para “avaliar a influência da resistência e do grau de confinamento da argamassa em relação ao comportamento tensão-deformação, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson.” (Thais Stalter, 2019 p. 13). Stalter ensaiou corpos de prova com alturas de 100 mm e 33 mm, ela ensaiou 05 corpos de provas para cada altura com dois traços diferentes, sendo eles: 1:0,5:4 e outro de 1:1:6. Neste trabalho optou-se em utilizar os resultados obtidos do traço 1:0,5:4, por este apresentar mais resistência.

2.1.2 Valor do Módulo de Elasticidade da Argamassa (E_c)

Segundo Stalter (2019), a importância deste módulo é em função de que as argamassas de assentamento devem possuir capacidade de absorver as deformações de eventuais movimentações da alvenaria. Ou seja, quanto menor o módulo de elasticidade, maior a capacidade de absorver deformações.

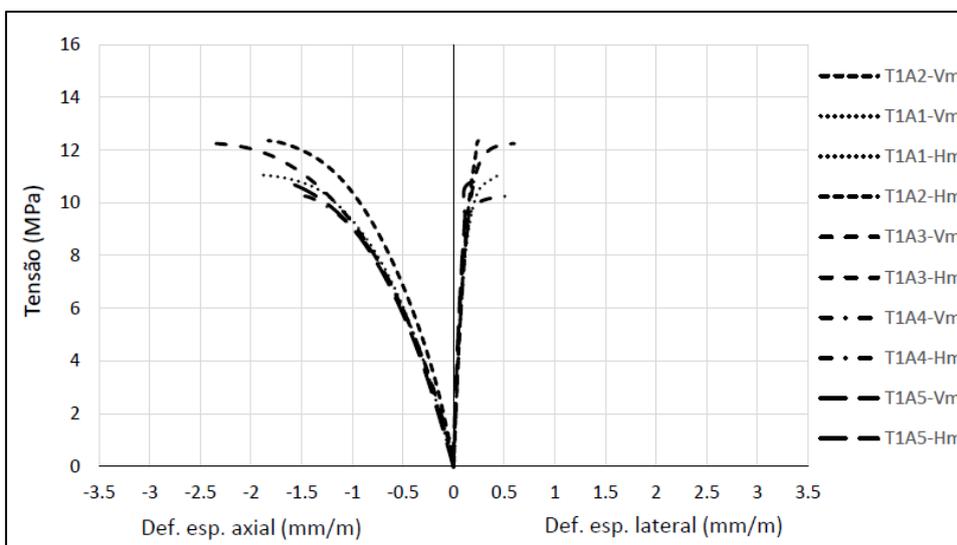
Nos resultados obtidos da tabela 09 do TCC de Thais Stalter, foi retirado o valor prático de 14 GPa para o módulo de elasticidade para os 05 corpos de prova ensaiados à compressão axial com altura de 100 mm e 33 mm. Do qual, este valor será utilizado como referência prática para os resultados do módulo de elasticidade das simulações numéricas.

2.1.3 Gráfico Tensão x Deformação

O gráfico tensão x deformação é importante para um melhor aprofundamento do conhecimento do comportamento mecânico das argamassas de assentamento, pois nele é possível analisar a máxima tensão em que os corpos de prova são submetidos antes da ruptura, também é possível analisar o comportamento das deformações junto com as tensões atuantes. Nas figuras 01 e 02 é demonstrado o comportamento experimental

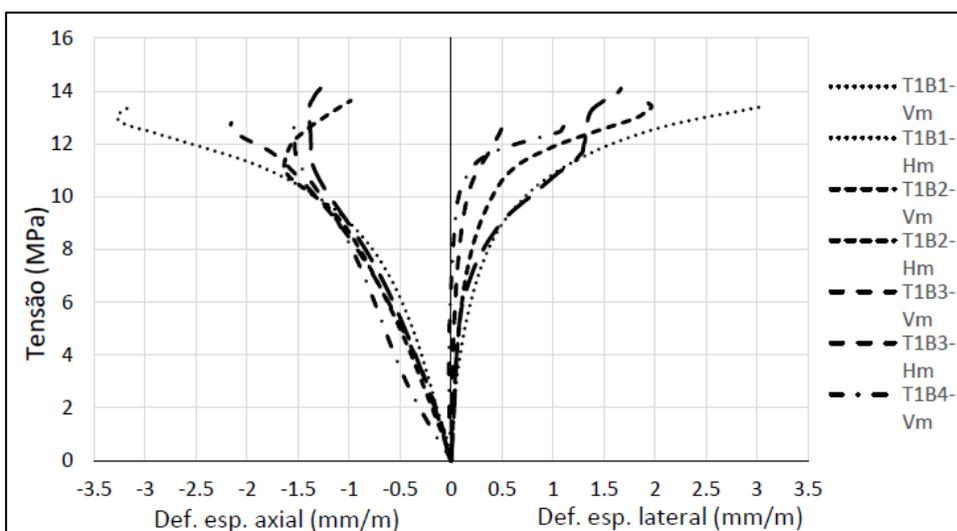
dos corpos de prova de Stalter, 2019. Dos quais os gráficos serão utilizados como referências práticas para as simulações numéricas deste trabalho.

Figura 01: Comportamento tensão-deformação dos corpos de prova com altura de 100 mm e traço de argamassa (1:0,5:4).



Fonte: Stalter, (2019, p.52)

Figura 02: Comportamento tensão-deformação dos corpos de prova com altura de 33 mm e traço de argamassa (1:0,5:4).



Fonte: Stalter, (2019, p. 53)

A tabela 01 demonstra os valores da resistência de compressão máxima (tensão de ruptura) dos corpos de prova ensaiados por Stalter, 2019, para o traço 1:0,5:4.

Tabela 01– Valores de tensão de ruptura dos corpos de prova.

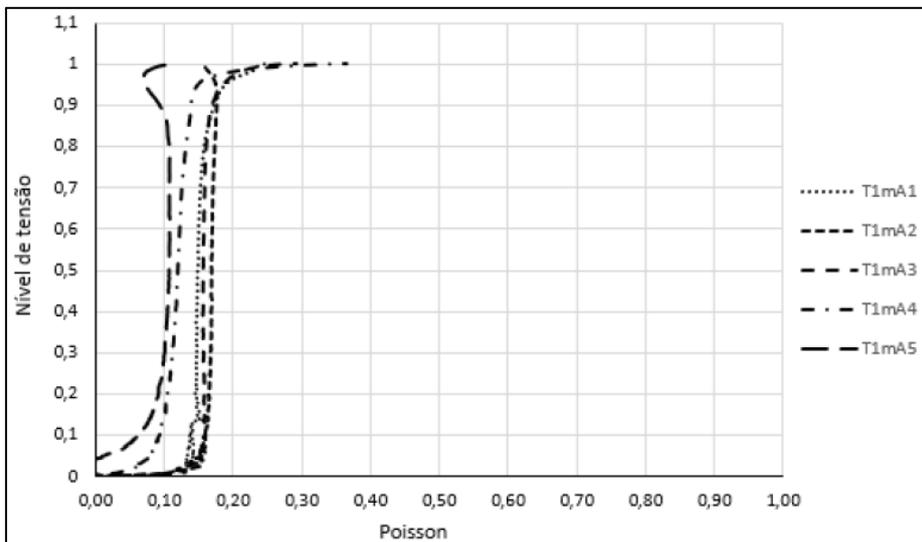
Traço	h (mm)	Amostra	fc (MPa)
1:0,5:4	100	1	11,058
		2	12,355
		3	12,247
		4	10,258
		5	10,797
		Média	11,343
		Desv. Pad.	0,922
		Coef. Var.	8,12%
		30	1
	2		13,871
	3		13,690
	4		12,926
	5		14,436
	Média		13,815
Desv. Pad.	0,572		
Coef. Var.	4,14%		

Fonte: Stalter, (2019, p.55)

2.1.4 Coeficiente de Poisson da Argamassa

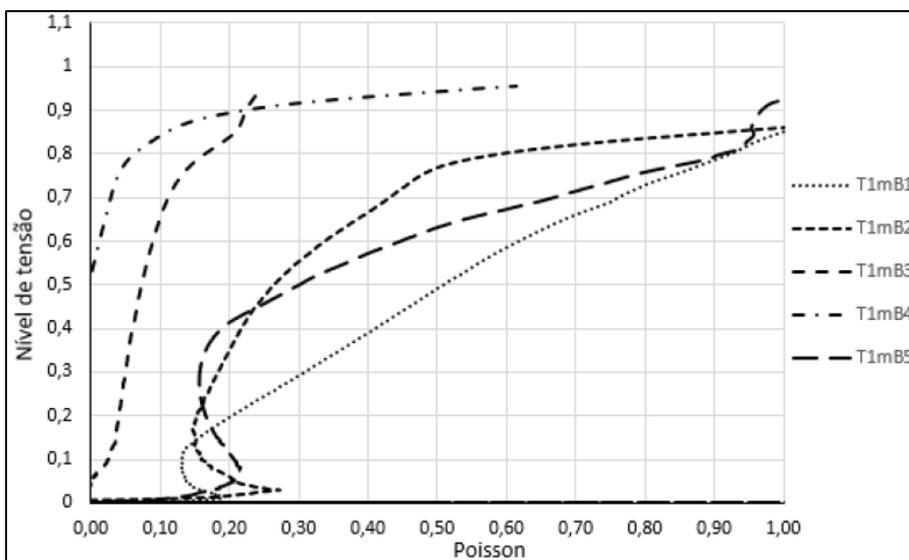
Segundo Stalter (2019) o valor do coeficiente de Poisson para as argamassas varia de acordo com o nível de tensão em que o material está submetido. Com isto as figuras 03 e 04, retirados dos resultados práticos obtidos da análise dos 05 corpos de provas ensaiados à compressão axial com alturas de 100 mm e 33 mm do TCC de Stalter (2019), serão utilizados como referência experimental para os gráficos do coeficiente de Poisson para as simulações numéricas, pra este trabalho.

Figura 03: Variação do coeficiente de Poisson médio em função do nível de tensão aplicado, traço I (1:0,5:4) – altura de 100 mm.



Fonte: Stalter, (2019)

Figura 04: Variação do coeficiente de Poisson médio em função do nível de tensão aplicado, traço I (1:0,5:4) – altura de 33 mm.



Fonte: Stalter, (2019)

2.1.5 Ruptura das Amostras

Nas figuras 05 e 06 são apresentadas as formas de ruptura dos corpos de prova do trabalho de Stalter, (2019), para as alturas de 100 mm e 33 mm, respectivamente.

Figura 05: Ruptura dos Corpos de Prova – Traço (1:0,5:4), altura de 100 mm.



Fonte: Stalter, (2019)

Figura 06: Ruptura dos Corpos de Prova – Traço (1:0,5:4), altura de 33 mm.



Fonte: Stalter, (2019)

Segundo Stalter (2019), é possível afirmar que a resistência de argamassa influencia no modo de ruptura do material, pois em traços com maior resistência resulta em um comportamento frágil na ruptura, apresentando sinais aparentes apenas instantes antes de alcançar a carga máxima de ruptura da argamassa.

Verificou-se que a forma de ruptura encontrada através das figuras 05 e 06 apresentaram grandes fissuras, com uma forma de ruptura mais brusca, principalmente na região das extremidades.

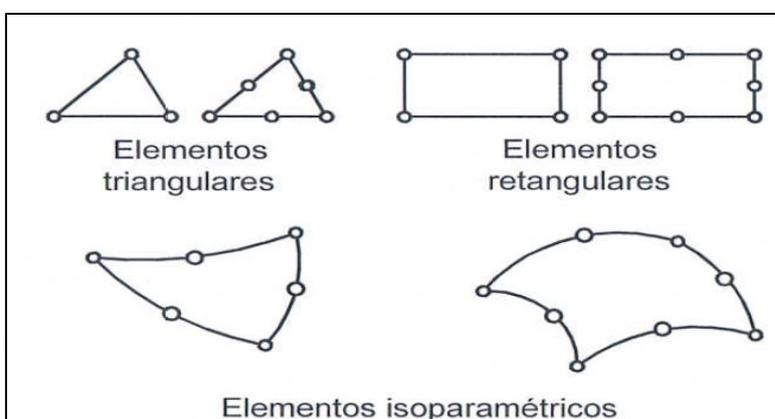
2.2 Método dos Elementos finitos

No caso particular do Métodos Elementos Finitos (MEF), é referido por vários autores que a publicação mais antiga em que é utilizada a designação “elemento finito” é o artigo, que data de 1960 e tem como autor Ray Clough. Anteriormente eram já conhecidas algumas técnicas que vieram a ser incorporadas no MEF, sem este aparecer ainda com as principais características que hoje em dia possui. Os grandes passos do desenvolvimento do MEF, que o conduziram ao formato que atualmente apresenta maior aceitação, foram dados na década de 60 e início da de 70. Inicialmente os elementos finitos mais comuns eram os triangulares e os tetraédricos, passando-se mais tarde a dar preferência aos quadriláteros e aos hexaedros.(AZEVEDO, 2003).

O Método dos Elementos Finitos é um procedimento numérico para a análise de estruturas e meios contínuo, e é baseado no conceito de discretização. A ideia consiste em transformar um problema complexo na soma de diversos problemas simples. No entanto necessário buscar-se soluções locais, cujas propriedades garantam uma convergência para os problemas globais.(ARAÚJO, 2010).

Para começar os cálculos através do MEF é preciso dividir o elemento que está sendo analisado em pequenas partes, denominada elemento finito, na figura 07 mostra-se alguns exemplos de formatos pequenos que pode ser dividido o elemento estudado.

Figura 07: Exemplos de divisão.

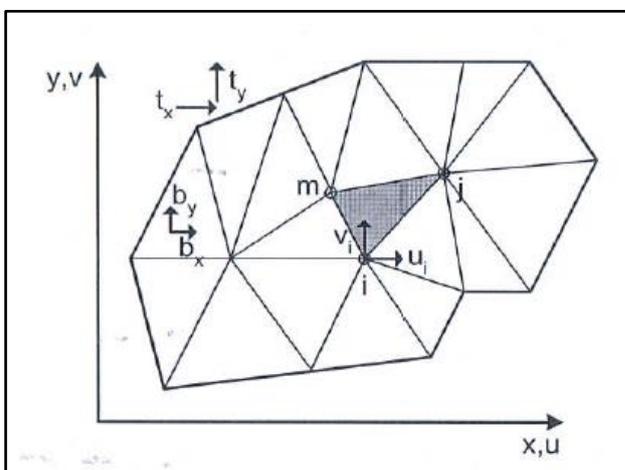


Fonte: Araújo (2010, p. 128)

Cada elemento é definido por sua geometria e pelo número de nós. Assim, têm-se os elementos triangulares de três e de seis nós, os elementos retangulares de quatro e de oito nós e os elementos isoparamétricos. Esses últimos são elementos distorcidos, que permitem uma boa modelagem de domínios irregulares. (ARAÚJO, 2010).

Após dividir o corpo estudado em pequenas partes obtém-se a geometria do MEF, denominada malha, conforme a Figura 08. (ESPINOZA, JONATAHN TAPIA; ARAYA, KARLA; DOENITZ, 2015)

Figura 08: Exemplo de malha no MEF.



Fonte: Araújo (2010, p.128)

Como exemplo de malha da Figura 8, através da Equação 1 pode-se calcular o deslocamento (U) de qualquer ponto dentro da malha.

$$F = KxU \quad \dots(1)$$

Onde:

u = Vetor dos Deslocamentos.

F= Vetor dos Esforços Externos.

K = Rigidez Global

Com a rigidez de cada elemento e conhecendo os movimentos de cada nó chamados de graus de liberdade, forma-se uma matriz de rigidez que representa a rigidez da estrutura.

Este método permite realizar um modelo matemático de cálculo do sistema real, mais fácil econômico de modificar que um protótipo em escala real. Mas o MEF não deixa de ser um método aproximado de cálculo devido as hipóteses básicas.(ESPINOZA, JONATAHN TAPIA; ARAYA, KARLA; DOENITZ, 2015).’

2.2 Método dos Elementos Discretos

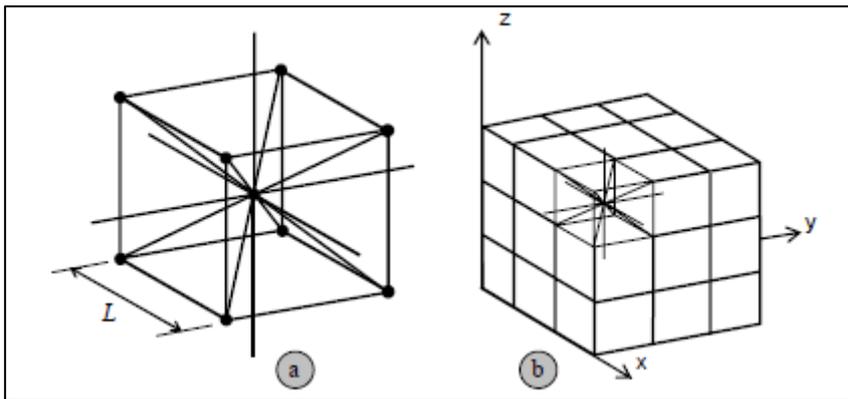
O Método dos Elementos Discretos formado por barras (DEM) foi inicialmente inspirado na solução de problemas geomecânicos com geotécnicos. Este método tem a capacidade de representar grandes deslocamentos e rotações de corpos interagindo conjuntamente dentro do modelo através dos contatos ou interfaces. A medida que os elementos inicialmente unidos se afastarem, eles podem reconhecer novos contatos criados pela interação com outros corpos, gerando-se forças nessas interfaces.

A geração das forças no modelo é feita durante o monitoramento da movimentação de cada elemento, considerando as condições ou propriedades físicas das interfaces para introduzi-las dentro do cálculo conjugando a segunda lei de newton e a lei de força deslocamento.

2.3 Método dos Elementos Discretos Formado por Barras

No método dos Elementos Discretos formado por barras (DEM) o contínuo é representado por intermédio de um arranjo espacial de barras com a massa centrada nas suas pontas. A configuração foi primeiramente utilizada por Nayfeh e Hefzy, 1978, mostrada na figura 09. O módulo básico é constituído interconectando 20 elementos de barra e nove nós. Cada nó tem três graus de liberdade, dados pelas componentes do vetor deslocamento. No caso de um material elástico isotrópico, a área da seção transversal do elemento longitudinal (os que definem os eixos do módulo e aqueles que conectam os nós internos) no modelo discreto equivalente, A_l , é descrito na equação 2.

Figura 09: Configuração utilizada por Nayfeh e Hefzy, 1978, no DEM.



Fonte: Kostaski (2012, p.40)

$$A_l = \varnothing L^2 \quad \dots(2)$$

Onde:

L= Comprimento do módulo cúbico.

A área dos elementos nas diagonais é descrito na equação 3.

$$A_d = \frac{2\delta\varnothing L^2}{\sqrt{3}} \quad \dots(3)$$

Onde os coeficientes δ e \varnothing são determinados pelas seguintes equações (4) e (5), respectivamente.

$$\delta = 9\nu(4 - 8\nu) \quad \dots(4)$$

$$\varnothing = \frac{9+8\delta}{18+24\delta} \quad \dots(5)$$

Onde:

V = Módulo de Poisson

Para $\nu=0.25$ a equivalência com o contínuo isotrópico é completa, porém com $\nu=0.25$ há diferenças nos termos de cisalhamento

Segundo a figura 9 o sistema de equações resultante depois de aplicar a segunda lei de Newton em cada nó está descrito na equação 6.

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + F_9(t) - P(t) = 0 \quad \dots(6)$$

Onde:

\ddot{x} , \dot{x} e x = São os vetores deslocamentos, velocidade e aceleração nodais.

M e C = São as matrizes de massa e amortecimento, respectivamente.

$F(t)$ e $P(t)$ = Contém as forças internas e externas que atuam nas massas nodais.

O coeficiente $2/\sqrt{3}$ leva em conta em diferença no comprimento entre os elementos diagonais e longitudinais.

2.4 Lei Bilinear

Este trabalho concentra-se na ruptura de materiais frágeis, por isso são válidos os princípios da Mecânica Elástica Linear das Fraturas. Quando um material frágil se rompe ocorre uma propagação instável de uma fratura que durante o processo de propagação é consumida uma certa quantidade de energia, em função da área de fratura formada. Tal consumo deve estar representado em uma relação constitutiva que descreva o comportamento do material na fase pós-ruptura. (ROCHA, 1989)

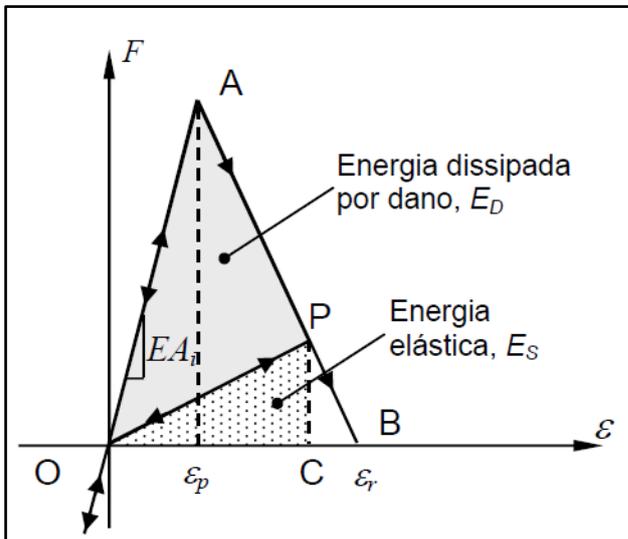
Hillerborg em 1978, propôs um modelo em que leva em conta a fratura frágil e também permite capturar os efeitos irreversíveis da nucleação e propagação das fissuras, enfim, tem em conta a redução na capacidade de carga do elemento. A equação 7 apresenta a relação constitutiva deste modelo bilinear de Hillerborg sendo ε_p e ε_r , respectivamente, as deformações críticas de falha e limite, E o módulo de elasticidade e A_i a área da barra, mostrada na figura 10.

$$f(\varepsilon) = \begin{cases} EA_i \varepsilon & \text{se } \varepsilon \leq \varepsilon_p \\ EA_i \varepsilon_p \frac{\varepsilon_r - \varepsilon}{\varepsilon_r - \varepsilon_p} & \text{se } \varepsilon_p < \varepsilon \leq \varepsilon_r \\ 0 & \text{se } \varepsilon > \varepsilon_r \end{cases} \quad \dots(7)$$

O modelo bilinear de Hillerborg cumpre com a condição necessária, que a área debaixo da curva força-deformação (área do triângulo OAB na figura 10) seja a densidade de energia necessária para fraturar a área de influência do elemento. Assim, para um ponto P na curva força força-deformação, a área do triângulo OPC representa a densidade de energia elástica armazenada no

elemento. No entanto, a área do triângulo OAP é a densidade de energia dissipada por fratura.

Figura 10: Modelo Bilinear



Fonte: Kostascki (2012, p.40)

O parâmetro ε_p foi definido por Rocha, 1989 como a deformação máxima de um elemento atingida antes da iniciação do dano (ponto A na figura 10). A relação entre ε_p e a energia de fratura G_f é dada pela equação 8:

$$\varepsilon_p = R_f \sqrt{\frac{G_f}{E}} \quad \dots(8)$$

Segundo (Kostascki, 2012) R_f não possui uma interpretação clara. Pois se tratando como um “fator de falha” não é possível prever quando o material irá romper, por isso, para melhor interpretação de R_f utilizasse o conceito de número de fragilidade estático s introduzido por Carpinteri, 1986, que quando o número de fragilidade aumenta mais dúctil é o elemento, está relação está escrita na equação 9.

$$s = \frac{1}{R_f \sqrt{L}} \quad \dots(9)$$

Onde:

L = Comprimento da Barra.

2.5 Implementação do LDEM no ambiente Abaqus/Explicit

O software Abaqus é um programa de análise de elementos finitos (MEF), é possível criar modelos mistos LDEM+MEF por causa de sua grande versatilidade para simular problemas geometrias e condições de contorno mais complexas, implementar as 4 leis constitutivas que este trabalho descreve nas barras da treliça.

O software proporciona soluções precisas e de alto desempenho por causa do poder da computação atualmente. Podendo simular o comportamento contínuo dos materiais (deformações) ou simular procedimentos de fratura (trincas).

2.6 Treliça Espacial LDEM

A treliça espacial gerada pela superposição de módulos básicos é gerada no Abaqus/Explicit é onde cada elemento encontra-se associado a uma seção, a cada seção atribui-se um tipo de material. Na disposição cúbica da treliça, elaboradaneeste trabalho na descrição do DEM, podem ser vistos quatro tipos de seções diferentes correspondentes aos elementos: S^A para as arestas; S^C para as face; S^I para as barras internas; S^D para as barras em diagonais. As áreas de cada elemento descrito acima encontram-se nas equações abaixo.

$$S^A = \frac{AL}{4} \quad \dots(10)$$

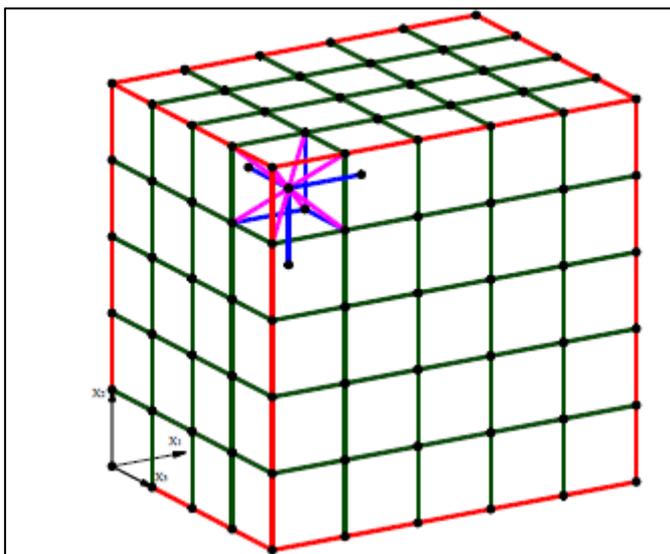
$$S^C = \frac{AL}{2} \quad \dots(11)$$

$$S^I = AL \quad \dots(12)$$

$$S^D = AD \quad \dots(13)$$

Na figura 11 é possível ver as quatro seções (Arestas(S^A) vermelhas, face (S^C) verdes, barras internas (S^I) azuis e barras diagonais (S^D) roxas) caracterizadas na disposição cúbica da treliça espacial.

Figura 11: Disposição cúbica da treliça.



Fonte: Kostaski (2012, p.98)

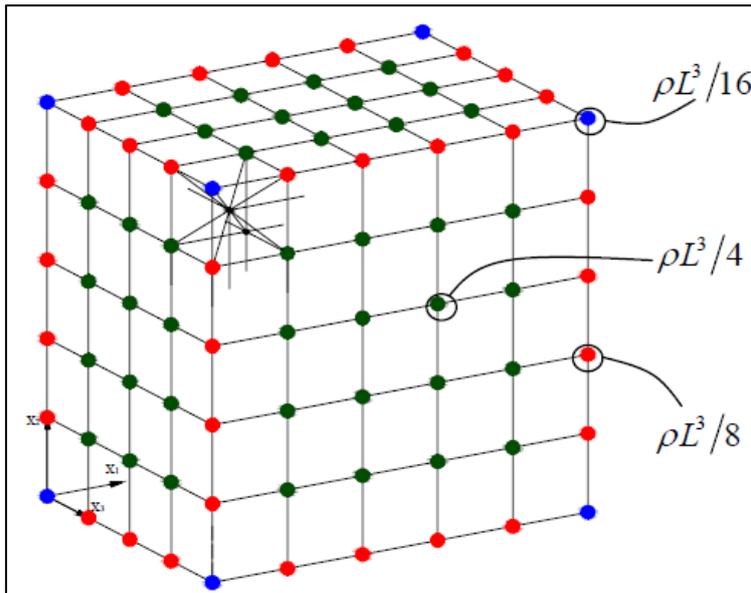
2.7 Discretização das Massas

No LDEM a massa de um corpo simulado depende totalmente dos nós da treliça com o valor desta dependendo do volume de influência de cada nó. Considerando o módulo cúbico da Figura 11, percebe-se que no volume do módulo (L^3) está contido o nó central e o somatório da oitava parte dos nós dos vértices do módulo.

A massa do módulo cúbico deve ser igual a (ρL^3) , sendo ρ a massa específica do material. Por isso, para formar a massa de um módulo cúbico colaboram um nó central que aportará toda sua massa ($\rho L^3/2$) e oito oitavos devidos aos nós dos vértices ($8 \times \rho L^3/16$).

Deste modo, os nós do vértice têm apenas um oitavo da massa de um nó completo ($\rho L^3/16$) (representados em azul), os nós das arestas (representadas em vermelho) e os pertencentes às faces (representadas em verde), representados na figura 12 ou superfícies do modelo terão um quarto e a metade da massa do nó completo.

Figura 12: Modelo do cubo com a discretização das massas.



Fonte: Kostaski (2012, p.99)

As massas de cada nós está destacadas na figura 12, sendo os nós dos vértices em azul (equação 14), dos nós das arestas em vermelho (equação 15) e dos nós das faces em verdes (equação 16), sendo:

$$m^v = \frac{\rho L^3}{16} \quad \dots(14)$$

$$m^a = \frac{\rho L^3}{8} \quad \dots(15)$$

$$m^f = \frac{\rho L^3}{4} \quad \dots(16)$$

No Abaqus/Explicit não pode ter barras com massa igual a zero, isto geraria erro nos cálculos. Portanto, visto que o software discretiza a massa do elemento de barra utilizando concentrando-a nos nós do elemento, optou-se por colocar uma densidade de massa nas barras que equivale às massas nodais (nós) no DEM, como descreve as equações 17 e 18.

$$\frac{\rho L^3}{2} = \frac{6 \rho_l \phi L^3}{2} + \frac{8 \rho_d \delta \phi L^3}{6} \quad \dots(17)$$

$$\frac{\rho L^3}{6} = \frac{3 \rho_l \phi L^3}{8} + \frac{\rho_d 2 \delta \phi L^3}{2\sqrt{3}} \quad \dots(18)$$

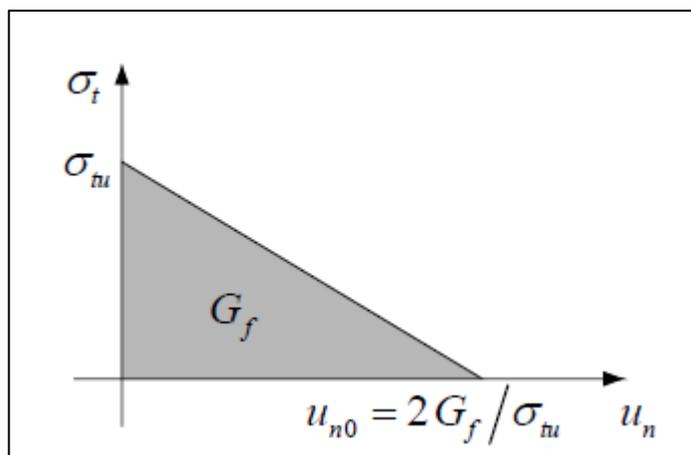
2.8 Inserção do modelo constitutivo no Abaqus/Explicit

O modelo de ruptura do Abaqus/Explicit possui características similares a da lei constitutiva bilinear do DEM. Das quais destacam-se:

- O comportamento à compressão é sempre elástico linear.
- O comportamento antes de começar o dano é elástico linear
- Podem-se remover os elementos quando eles forem totalmente danificados

O software Abaqus utiliza o modelo de fissuras distribuídas para representar descontinuidade no comportamento frágil do material. O critério é parecido com a lei bilinear de Hillerborg, 1976.

Figura 13: Modelo de falha do elemento utilizada no Abaqus/Explicit.



Fonte: Kostascki (2012, p.101)

Como mostrado na figura 13 o critério usa a taxa de liberação de energia em Modo I, G_f parâmetro de fratura. A tensão de falha é definida pela equação 19.

$$\sigma_{tu} = E\varepsilon_p \quad \dots(19)$$

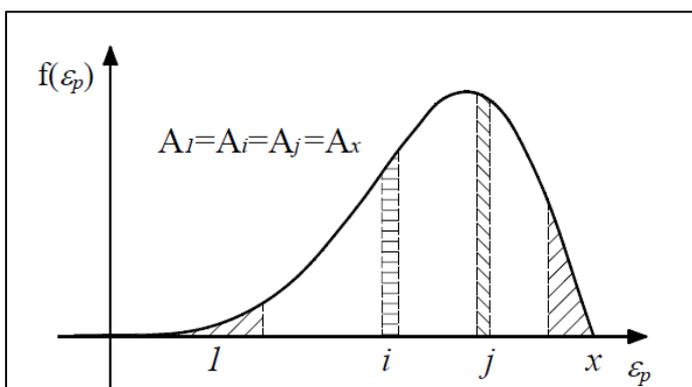
2.9 Inclusão do caráter aleatório

No Abaqus/Explicit, para definir a aleatoriedade do material para romper optou-se por definir x conjuntos de propriedades associadas ao material e para

cada conjunto dos quatro tipos de seções (S^A para as arestas; S^C para as face; S^I para as barras internas; S^D para as barras em diagonais).

Logo divide-se a função densidade de probabilidade de ϵ_p em x intervalos, associados aos conjuntos de propriedades definidas, que a área encerrada nestes intervalos seja constante e igual a $1/x$, como mostrado na figura 14.

Figura 14: Função da probabilidade onde foram definidos os intervalos com a mesma probabilidade de ocorrência.



Fonte: Kostascki (2012, p.104)

Em outras palavras, com os intervalos x definidos, obriga o software a romper as barras ou nós sempre em partes diferentes corpo cilindro, assim criando uma aleatoriedade na ruptura.

Para cada material gerado (x) é atribuído um valor ϵ_p caia nestes intervalos é constante, já que todas as probabilidades são iguais. Portanto para que em elemento tenha uma propriedade aleatória basta sortear um número pertencente ao intervalo $[1; x]$ com distribuição uniforme da probabilidade e atribuir a esse material ao elemento.

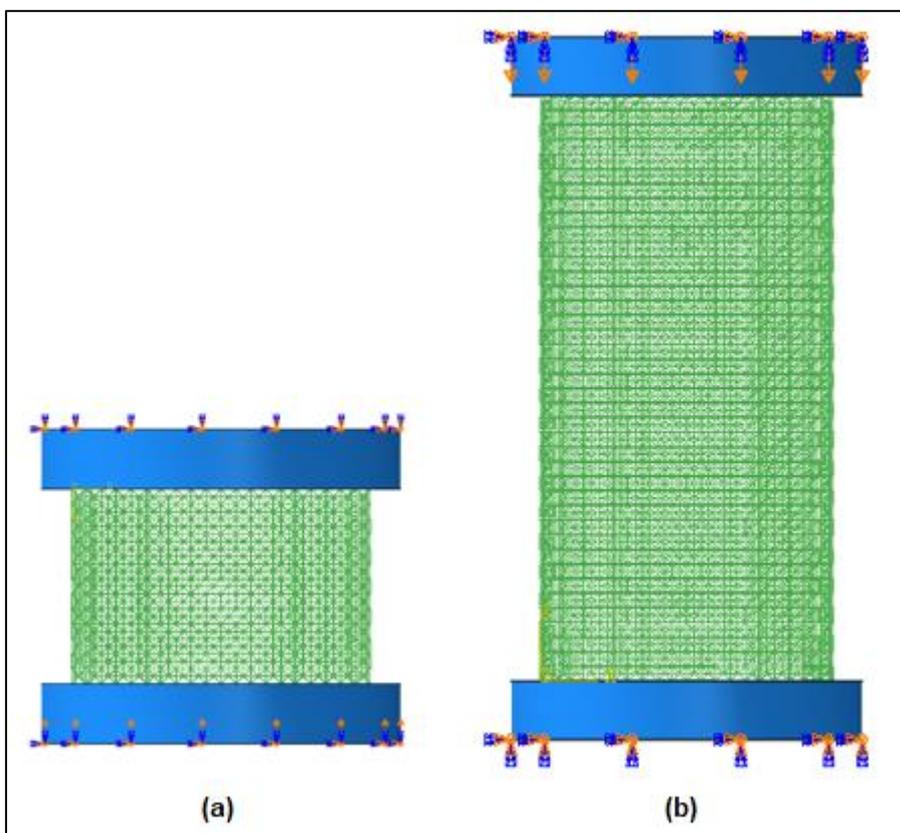
2.10 Inserção da malha cilíndrica no ambiente Abaqus/Explicit.

Será gerada a malha cilíndrica do elemento através do software Matlab, onde através deste programa é possível descrever com quantos módulos terá o diâmetro, quantidade de módulos da altura do corpo de prova, comprimento do módulo e descrever qual lei será utilizada na análise da ruptura.

É possível também através do Matlab descrever e aplicar as propriedades do material ensaiado, como: Módulo de Young (E_c), Energia de Fratura (G_f), Fator de falha (R_f), Coeficiente de Poisson (ν), Coeficiente de variação (C_v) e Densidade.

Após gerar o a malha cilíndrica com o Matlab, é exportado em arquivo .inp para o ambiente Abaqus/Explicit, para através do mesmo aplicada as condições de contorno em que U_x , U_y e U_z são iguais a 0, ou seja, o corpo de prova está com o deslocamento restrito nas três direções. E é aplicado também o carregamento de compressão nas prensas, como mostra a figura 15.

Figura 15: Corpos de prova de Altura (a) de 33 mm e (b) 100 mm.



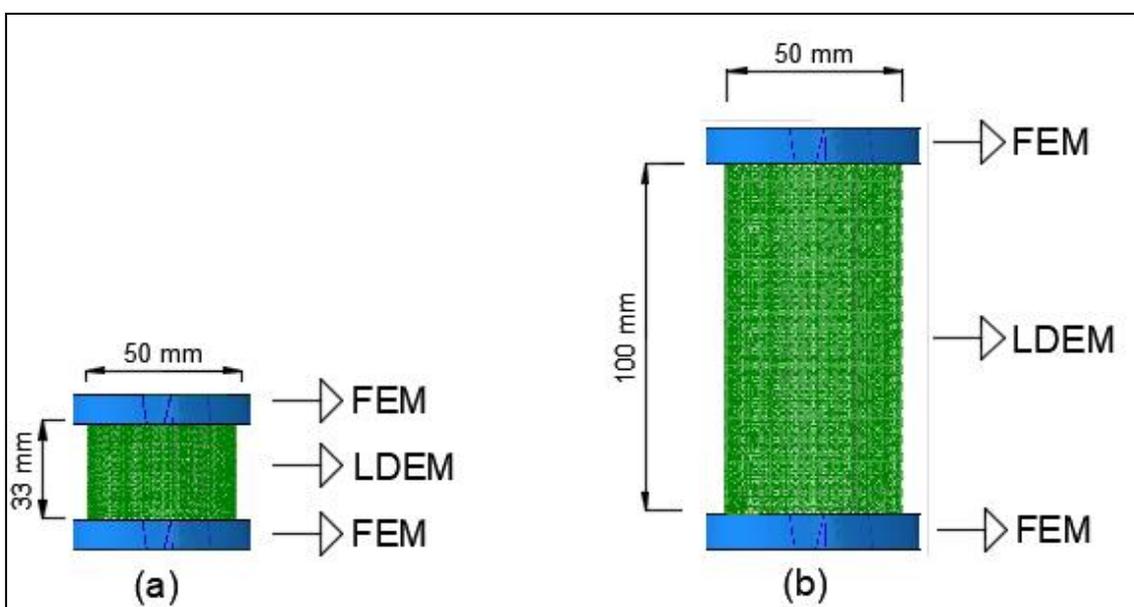
Fonte: Elaboração Própria

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Metodologia

Para a elaboração dos dois modelos dos corpos de prova com diâmetro de 50 mm e alturas de 33 mm e 100 mm no software ABAQUS utilizou-se o métodos dos Elementos Discretos Formado por Barras (LDEM) para compor a malha cilíndrica que representa a argamassa de assentamento e o Método dos elementos Finitos (FEM) para representar os pratos da prensa metálica. Na figura 16 é demonstrado os modelos utilizados para as simulações numéricas.

Figura 16: Dimensões dos corpos de prova simulados com o LDEM.



Fonte: Elaboração Própria.

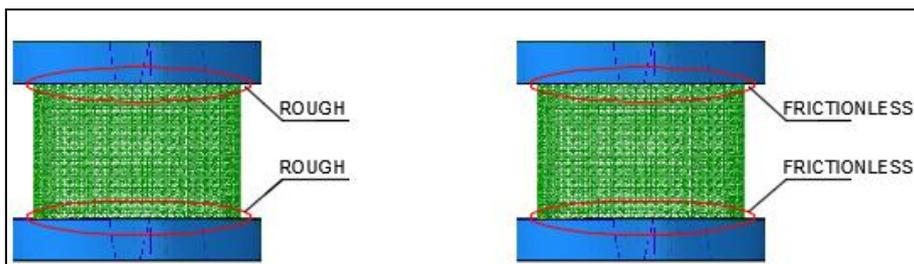
O modelo do corpo de prova (a) possui diâmetro de 50 mm e altura de 33 mm, com um comprimento de módulo (L_c) de 0,0025 m, isto gera o corpo cilindro com 21 nós nos eixos X e Y e 14 nós no eixo Z.

O modelo do corpo de prova (b) possui diâmetro de 50 mm e altura de 100 mm, com um comprimento de módulo (L_c) de 0,0025 m, isto gera o corpo cilindro com 21 nós nos eixos X e Y e 41 nós no eixo Z.

Na região de contato entre os métodos LDEM e FEM denominada no ABAQUS de “surface-to-surface contact” será utilizada duas leis de contato

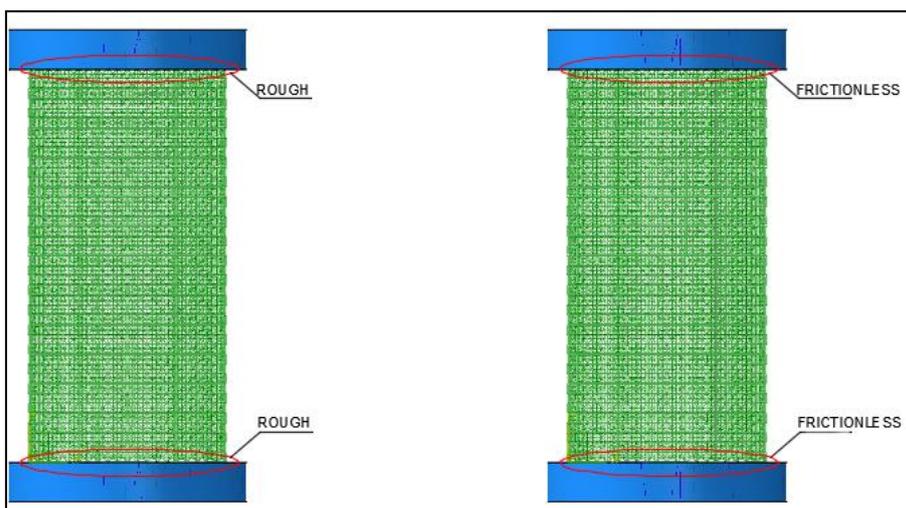
diferentes, onde a lei de contato “frictionless” simula a região sem atrito, semelhante a uma graxa e a lei de contato “rough” simula a região com atrito, semelhante a uma cola. Nas figuras 17 e 18 são demonstradas as regiões em que são aplicadas as leis de contato.

Figura 17: Modelos numéricos para ensaios que se utiliza a lei de contato rough e a lei de contato frictionless para a altura dos cp's de 33 mm.



Fonte: Elaboração Própria.

Figura 18: Modelos numéricos para ensaios que se utiliza a lei de contato rough e a lei de contato frictionless para a altura dos cp's de 100 mm.



Fonte: Elaboração Própria.

3.1.1 Propriedades Mecânicas Argamassa de Assentamento

No estudo de Stalter, (2019), foram ensaiados à compressão axial cinco corpos de provas de altura de 33 mm e 100 mm e traço 1:0,5:4 com propriedades mecânicas descritas na Tabela 02. Estas propriedades serão utilizadas para gerar a malha cilíndrica no LDEM, que representa a argamassa de assentamento.

Tabela 02 :Propriedades Malha Cilíndrica

Módulo de Young (Ec)	14 GPa
Energia de Fratura (Gf)	130 N/m
Fator de Falha (Rf)	9 Kg/m ³
Coefficiente de Poisson (v)	0,25
Densidade (p)	2000 Kg/m ³
Comprimento de módulo (LC)	0,005 m
Coefficiente de Variação (Cv)	60%

Fonte: Elaboração Própria.

Na tabela 03 são apresentadas as propriedades mecânicas que serão utilizadas para gerar as prensas metálicas no FEM.

Tabela 03: Propriedades Prensa Metálica

Módulo de Young (Ec)	200 GPa
Coefficiente de Poisson (v)	0,3
Densidade (p)	7850 Kg/m ³

Fonte: Elaboração Própria.

3.1.2 Gráfico tensão x Deformação

A importância do gráfico tensão x deformação se dá, pois indica o quanto o material irá deformar até sua ruptura. Do ponto zero até a ruptura do material é denominado zona elástica, onde as deformações não são permanentes. Nessa parcela do gráfico tem-se o módulo de elasticidade. Após a ruptura do material por completo saindo da fase elástica e inicia-se a fase plástica, onde as deformações são permanentes. Neste trabalho será analisada o comportamento dos corpos cilindros numéricos apenas na fase plástica do material.

A elaboração do gráfico tensão x deformação é feita selecionando dois nós no software Abaqus dos corpos de prova já ensaiados, como consta nas figuras 19 e 20. Após selecionados os nós, é recolhido o valor dos deslocamentos verticais de cada nó e distancia equidistante dos nós.

Para o cálculo das deformações dos nós é utilizada a equação 20, onde:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad \dots(20)$$

onde:

ε = Deformação;

ΔL = Variação do Deslocamento (m);

L = Distância entre os nós (m);

Similarmente são retiradas as reações provocadas pelas condições de contorno em que o elemento estava submetido. Com as reações (forças), dividiu-se pela área do corpo de prova ($D = 50\text{mm}$), para em fim ter as tensões que o corpo de prova foi submetido.

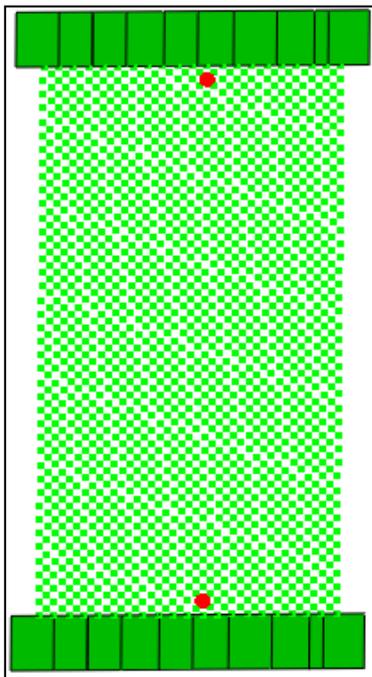
$$\sigma = \frac{F}{A} \quad \dots(21)$$

σ = Tensão (MPa)

F = Força aplicada ou Reação (N);

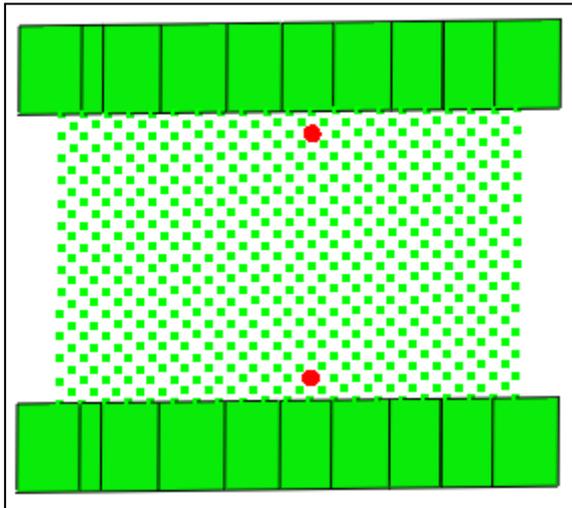
A = Área do corpo de prova (mm^2).

Figura 19: Exemplo de nós seleccionados para o corpo de prova de 100 mm.



Fonte: Elaboração Própria

Figura 20: Exemplo de nós selecionados para o corpo de prova de 33 mm.



Fonte: Elaboração Própria.

3.1.3 Módulo de Elasticidade

O módulo de elasticidade é a inclinação da curva do gráfico tensão x deformação. O módulo será calculado em função das deformações no estado elástico e por isso será utilizada a fórmula de Hooke, demonstrada na equação 22.

$$\sigma = E \varepsilon \quad \dots(22)$$

σ = Tensão de Compressão (Mpa);

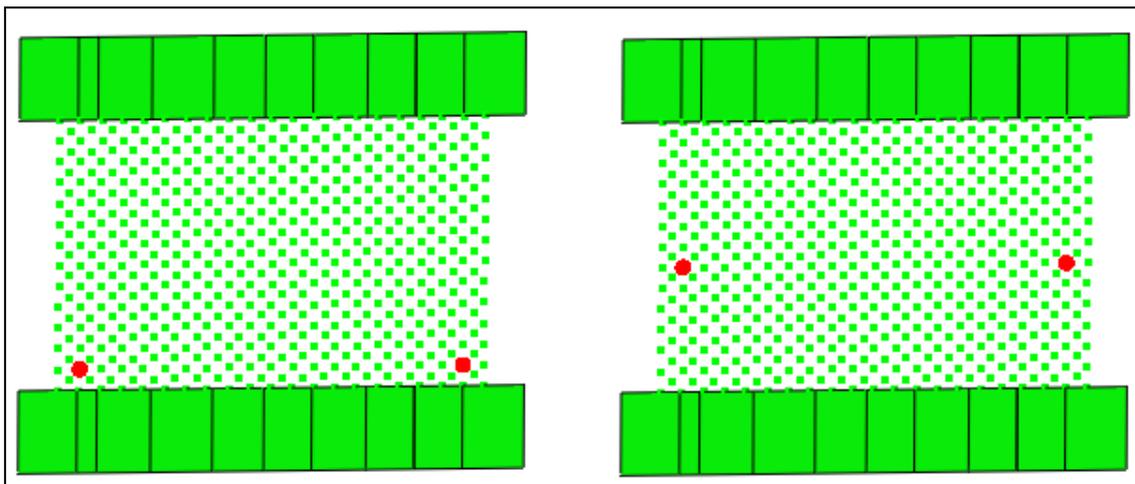
E = Módulo de Elasticidade (GPa);

ε = Deformação;

3.1.4 Coeficiente de Poisson

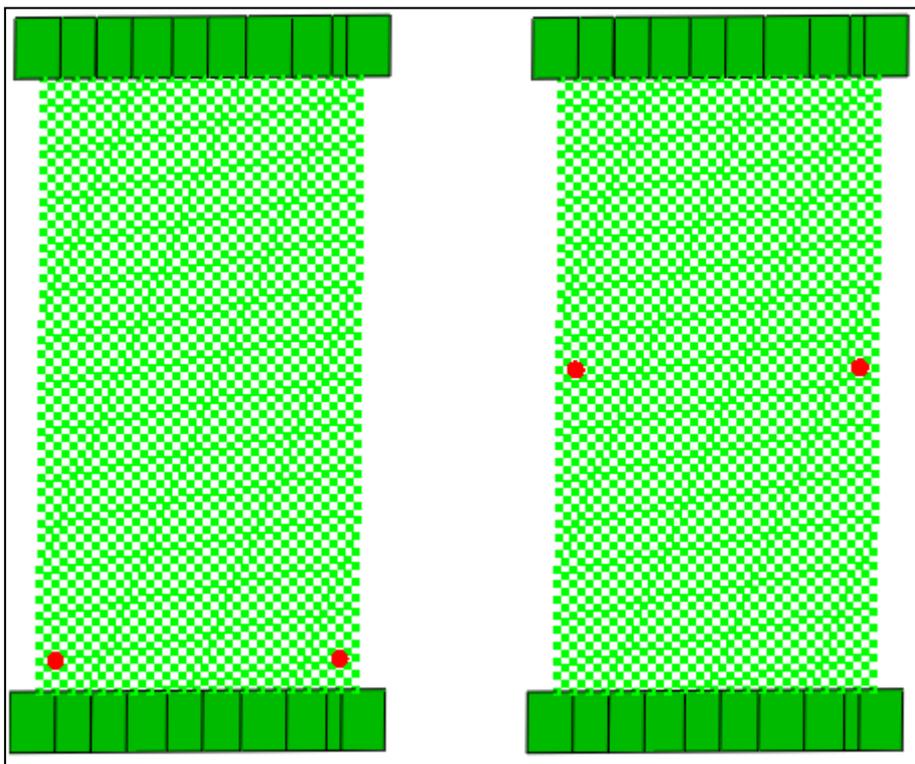
Para os corpos cilindro com altura de 33 mm e 100 mm foram calculados dois coeficientes de Poisson para cada amostra. Foram selecionados quatro nós para fazer os gráficos tensão aplicada x Coeficiente de Poisson. Dois nós foram selecionados um pouco acima da extremidade do corpo de prova e os outros dois nós foram selecionados no meio das alturas ($h=16,5$ mm e 50 mm) dos corpos de prova. Como consta nas figuras 21 e 22.

Figura 21: Exemplo de nós selecionados para o corpo de prova de 33 mm.



Fonte: Elaboração Própria.

Figura 22: Exemplo de nós selecionados para o corpo de prova de 100 mm.



Fonte: Elaboração Própria.

O coeficiente de Poisson é relação entre a deformação diametral (horizontal) pela deformação no sentido da carga (vertical). A equação 23 demonstra como é calculado o coeficiente de Poisson.

$$\mu = -\frac{\varepsilon_d}{\varepsilon_v} \quad \dots(23)$$

μ = Coeficiente de Poisson;

ε_d = Deformação diametral;

ε_v = Deformação no sentido da carga (Vertical).

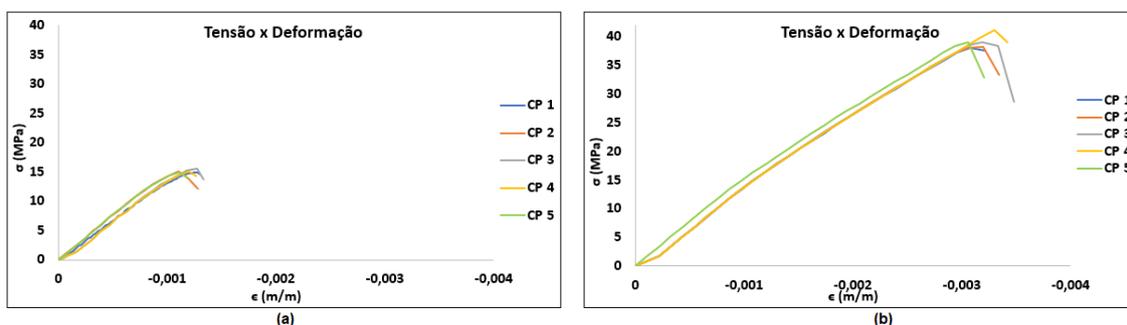
4 RESULTADOS

A seguir serão apresentados os resultados obtidos das simulações numéricas nos corpos de prova no ambiente Abaqus. Foram realizadas dez simulações dos cp's com altura de 33 mm, com cinco simulações com lei de contato rough e mais cinco simulações com lei de contato frictionless. Também foram feitas dez simulações dos cp's com altura de 100 mm, com cinco simulações com lei de contato rough e mais cinco simulações com lei de contato frictionless.

4.1. Gráfico Tensão x Deformação

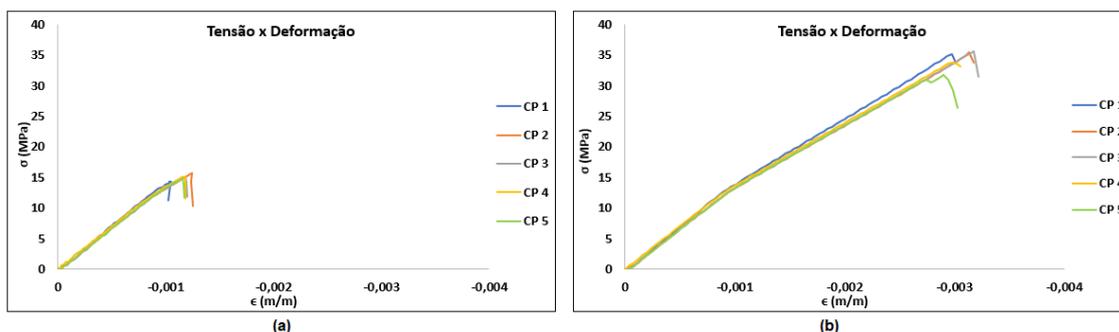
Nas figuras 23 e 24, são apresentados os resultados dos gráficos de tensão x deformação, para as alturas de 33 e 100mm.

Figura 23: Comportamento tensão x deformação dos corpos de prova de altura 33 mm com lei de contato (a) frictionless e lei de contato (b) rough.



Fonte: Elaboração Própria.

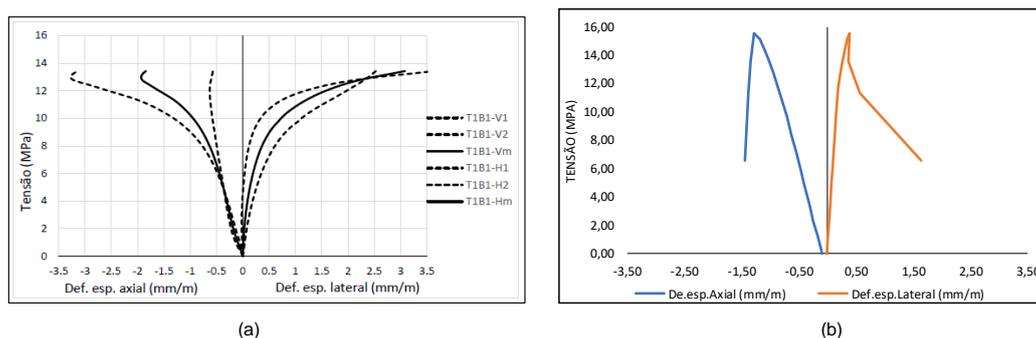
Figura 24: Comportamento tensão x deformação dos corpos de prova de altura 100 mm com lei de contato (a) frictionless e lei de contato (b) rough.



Fonte: Elaboração Própria.

Nas figuras 25, 26, 27 e 28 estão apresentadas as curvas representativas dos corpos de prova das simulações numéricas junto com os resultados experimentais, para como melhor comparação visual. Cabe salientar que a deformação específica lateral é calculada com o ponto medido na metade de altura dos corpos de prova (de acordo com as figuras 21 e 22), pois nos ensaios experimentais de Stalter, 2019, os strain gauges estão colados na metade da altura dos corpos de prova.

Figura 25: Comportamento Tensão x Deformação dos corpos de prova, com altura de 33 mm, a) Comportamento experimental e b) Comportamento numérico com lei de contato frictionless.

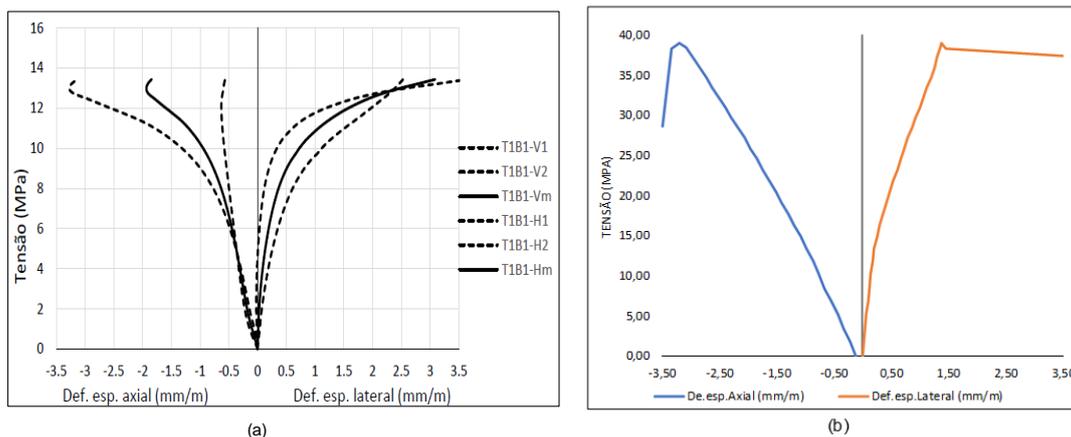


Fonte: Stalter (2019)

Fonte: Elaboração Própria

Fonte: Elaboração Própria.

Figura 26: Comportamento Tensão x Deformação dos corpos de prova, com altura de 33 mm, a) Comportamento experimental e b) Comportamento numérico com lei de contato rough.

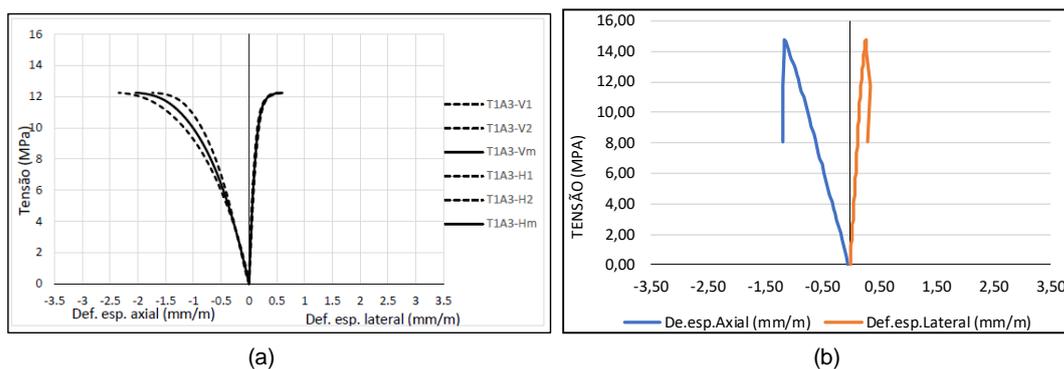


Fonte: Stalter (2019)

Fonte: Elaboração Própria

Fonte: Elaboração Própria.

Figura 27: Comportamento Tensão x Deformação dos corpos de prova, com altura de 100 mm, a) Comportamento experimental e b) Comportamento numérico com lei de contato frictionless.

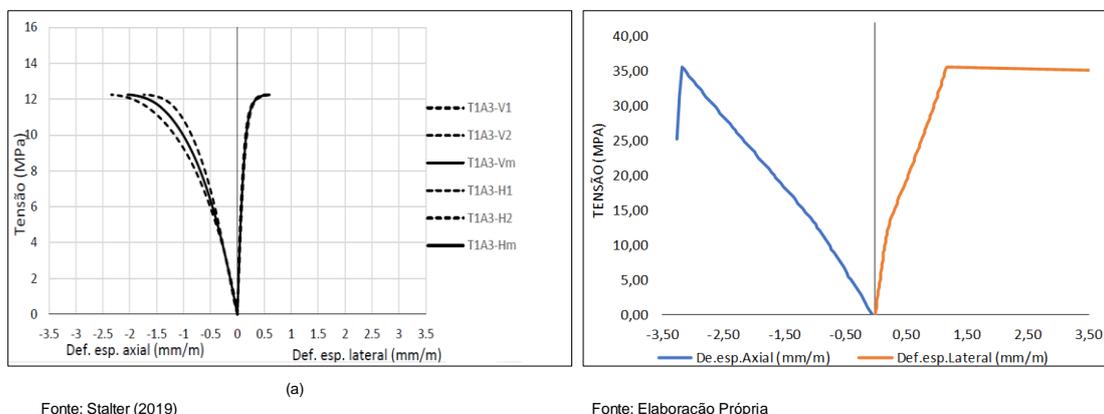


Fonte: Stalter (2019)

Fonte: Elaboração Própria

Fonte: Elaboração Própria.

Figura 28: Comportamento Tensão x Deformação dos corpos de prova, com altura de 100 mm, a) Comportamento experimental e b) Comportamento numérico com lei de contato rough.



Fonte: Elaboração Própria.

Ao analisar o comportamento dos corpos de prova nos quatro gráficos acima, percebe-se a semelhança do comportamento em todos os gráficos. Todos possuem o estágio elástico onde as deformações vão aumentando com o aumento das tensões de compressão em que o corpo está submetido. Também é possível notar a diferença nos valores de tensão que o corpo resiste entre as leis de contato frictionless e rough, onde rough por se tratar de uma “cola” as tensões finais são maiores na ruptura.

Comparando com as figuras 25, 26, 27 e 28 o comportamento da curva tensão x deformação dos corpos prova experimentais e numéricos, são semelhantes. Onde são caracterizados pela curva do gráfico linear até a ruptura.

Nas tabelas 04 e 05 estão apresentados os resultados da tensão máxima que cada corpo de prova foi submetido antes da ruptura.

Tabela 04: Tensão de ruptura dos corpos de prova numéricos de altura 33 mm.

Lei de Contato	Corpo de Prova	$\sigma_{\text{máx}}$ (MPa)
Frictionless	1	14,84
	2	15,06
	3	15,56
	4	15,11
	5	14,93
	Média	15,10 MPa
Rough	1	38,08
	2	38,16
	3	39,06
	4	41,07
	5	38,98
	Média	39,07 MPa

Fonte: Elaboração própria

Tabela 05: Tensão de ruptura dos corpos de prova numéricos de altura 100 mm.

Lei de Contato	Corpo de Prova	$\sigma_{\text{máx}}$ (MPa)
Frictionless	1	14,38
	2	15,67
	3	15,10
	4	15,10
	5	13,01
	Média	14,65 MPa
Rough	1	35,21
	2	35,49
	3	35,55
	4	33,79
	5	31,77
	Média	34,36 MPa

Fonte: Elaboração própria

Na tabela 01 (pag. 33) são demonstrados do estudo de Stalter (2019), que os corpos de prova experimentais de altura 33 mm e 100 mm possuem tensão de ruptura média de 13,81 MPa e 11,34 MPa, respectivamente.

Entende-se pelas tabelas 04 e 05 que com a lei de contato frictionless os corpos os corpos de prova numéricos de altura 33 mm e 100 mm possuem

tensão de ruptura média de 15,10 MPa e 14,65 MPa, respectivamente. Com a lei de contato rough os corpos de prova numéricos de altura 33 mm e 100 mm possuem tensão de ruptura média de 39,07 MPa e 34,36 MPa, respectivamente.

Concluiu-se que a lei de contato frictionless é a que melhor reflete as tensões de ruptura dos corpos de prova numéricos com os resultados práticos de Stalter (2019).

4.2 Módulo de Elasticidade

Assim como em Stalter, (2019) o valor do módulo de elasticidade foi obtido em 30% da tensão de ruptura dos corpos de prova. As tabelas 06 e 07 exibem o valor do módulo de elasticidade dos corpos de prova.

Tabela 06: Módulo de Elasticidade dos corpos de prova numéricos de altura 33 mm.

Lei de Contato	Corpo de Prova	Ec (Gpa)
Frictionless	1	12,99
	2	15,74
	3	12,54
	4	12,58
	5	15,15
	Média	13,80 GPa
Rough	1	13,55
	2	13,69
	3	13,60
	4	13,74
	5	13,92
	Média	13,70 GPa

Fonte: Elaboração própria

Tabela 07: Módulo de Elasticidade dos corpos de prova numéricos de altura 100 mm.

Lei de Contato	Corpo de Prova	Ec (Gpa)
Frictionless	1	13,64
	2	12,89
	3	12,89
	4	14,04
	5	14,77
	Média	13,65 GPa
Rough	1	13,68
	2	12,94
	3	12,92
	4	14,11
	5	12,91
	Média	13,31 GPa

Fonte: Elaboração própria

Com relação as tabelas 06 e 07, onde para rough obteve-se valores médios do módulo de elasticidade de 13,70GPa e 13,31 GPa, para alturas de 33 mm e 100 mm, respectivamente. E para frictionless obteve-se valores médios do módulo de elasticidade de 13,80GPa e 13,65GPa, para alturas de 33 e 100 mm, respectivamente. Conclui-se que os resultados das simulações experimentais são muito semelhantes ao valor prático de 14 GPa obtido por Stalter, (2019).

Um dos grandes desafios neste trabalho foi encontrar o melhor ajuste na velocidade do ensaio que é dada através do deslocamento imposto pelas prensas superiores e inferiores, um ensaio com grande velocidade o corpo de prova rompe 100%, não podendo obter os valores coerentes com o módulo de elasticidade dos ensaios experimentais, especialmente na lei de contato frictionless. Com uma velocidade muito baixa a amostra demora muito a romper (utilizando maior energia de fratura), especialmente na lei de contato rough, afetando diretamente os valores obtidos.

Está semelhança no módulo de elasticidade entre as duas leis de contato com o valor de 14 GPa, demonstra a quão boa foi a velocidade de

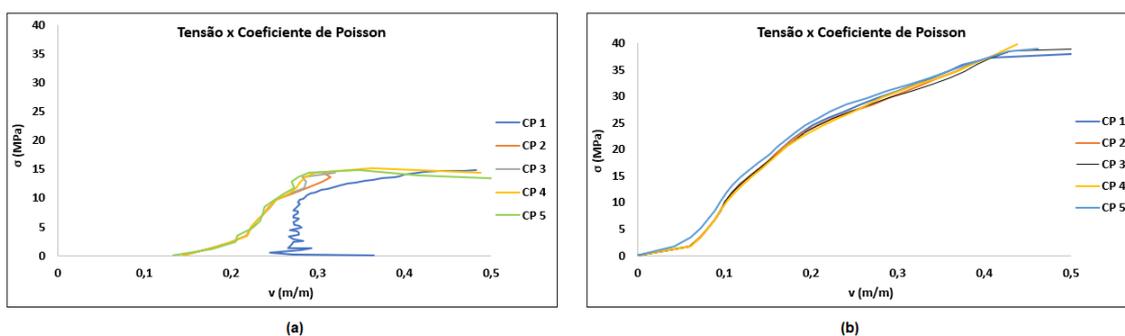
ensaio para as leis de contato, com step 0,015 e amplitude de 0,02 para frictionless, tanto step a 0,15 e amplitude de 0,002 para rough.

Outro ponto importante é a diferença entre as tensões máximas e deformações máximas que rough apresenta maiores valores em relação a frictionless. O que faz total sentido, pois rough simula uma cola (com atrito) na região de contato entre os métodos LDEM e FEM e frictionless simula uma graxa (sem atrito) na região de contato entre os métodos LDEM e FEM.

4.3 Coeficiente de Poisson

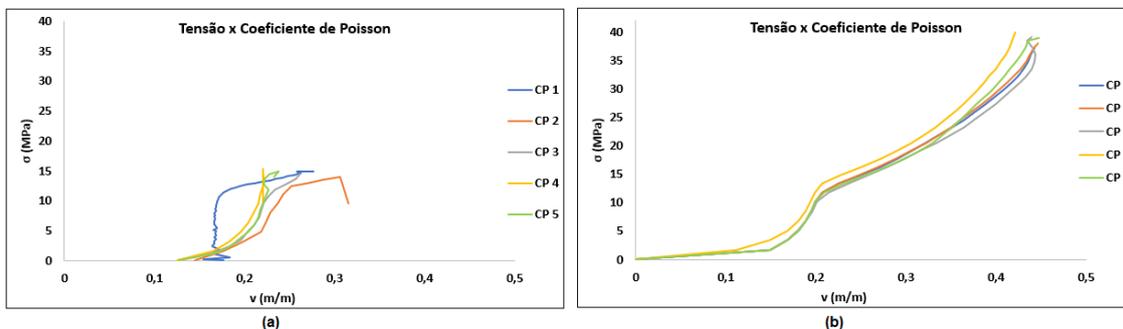
O coeficiente de Poisson foi calculado em dois pontos diferentes para cada corpo de prova. O primeiro ponto é perto da região dos pratos da prensa e outro na metade das alturas ($h/2$) dos corpos de prova. As figuras 29 e 30, exibem a variação do coeficiente de Poisson em função da tensão aplicada, na região mais próximas dos apoios e na região central dos corpos de prova, respectivamente, para as alturas dos cp's de 33 mm.

Figura 29: – Variação do coeficiente de Poisson na região próxima dos apoios em função da tensão aplicada nos corpos de prova de 33 mm, com lei de contato (a) frictionless e (b) rough.



Fonte: Elaboração Própria.

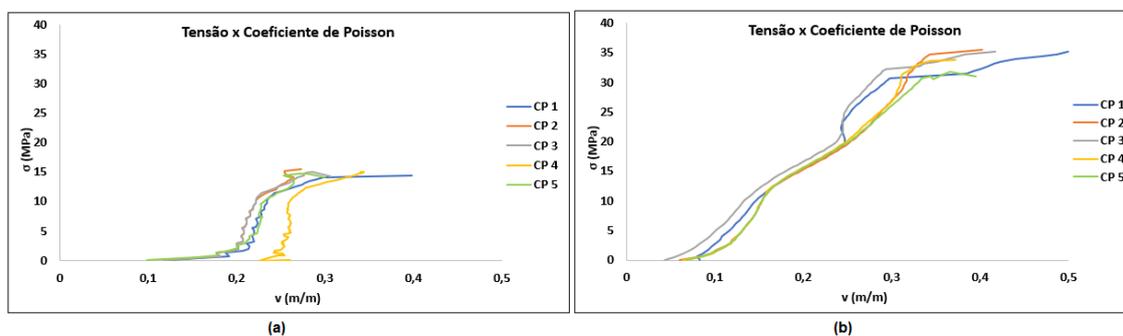
Figura 30: – Variação do coeficiente de Poisson na região central em função da tensão aplicada nos corpos de prova de 33 mm, com lei de contato (a) frictionless e (b) rough.



Fonte: Elaboração Própria.

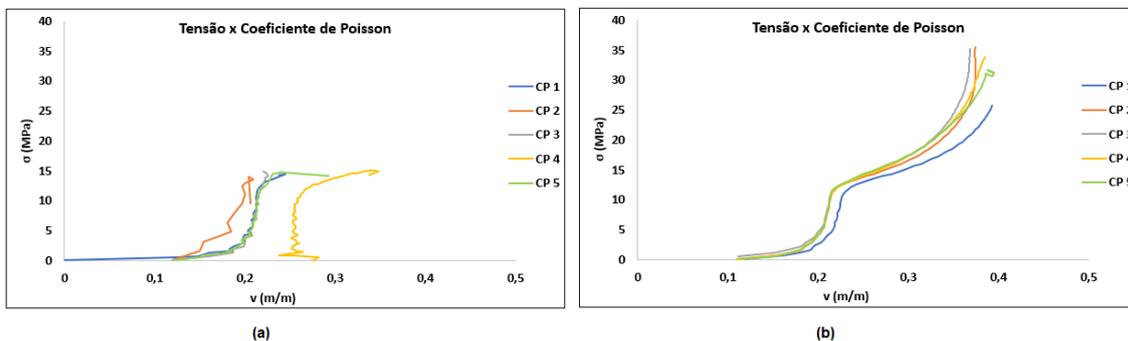
As figuras 31 e 32, exibem a variação coeficiente de Poisson em função da tensão aplicada, na região mais próximas dos apoios e na região central dos corpos de prova, respectivamente, para as alturas dos cp's de 100 mm.

Figura 31: – Variação do coeficiente de Poisson na região próxima dos apoios em função da tensão aplicada nos corpos de prova de 100 mm, com lei de contato (a) frictionless e (b) rough.



Fonte: Elaboração Própria.

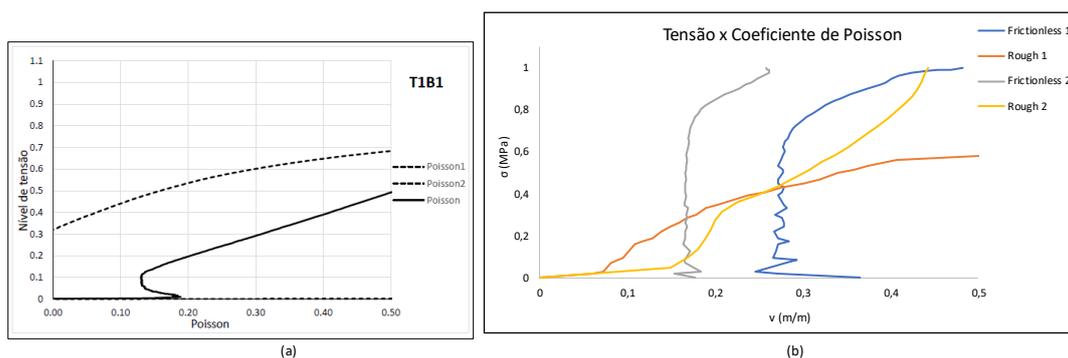
Figura 32: – Variação do coeficiente de Poisson na região central em função da tensão aplicada nos corpos de prova de 100 mm, com lei de contato (a) frictionless e (b) rough.



Fonte: Elaboração Própria

Nas figuras 33 e 34 estão apresentadas as curvas representativas dos corpos de prova das simulações numéricas junto com os resultados experimentais, para como melhor comparação visual.

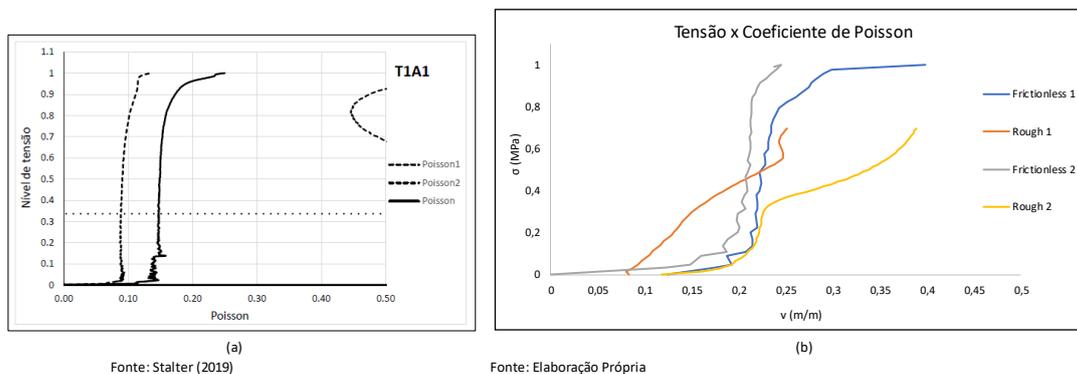
Figura 33: Comportamento Coeficiente de Poisson dos corpos de prova, com altura de 33 mm, a) Comportamento Experimental e b) Comportamento numérico, onde: Frictionless 1 e Rough 1 Coeficiente Poisson medido na região perto dos apoios e Frictionless 2 e Rough 2 Coeficiente de Poisson medido na região central ($h = 16,5$ mm).



Fonte: Stalter (2019)

Fonte: Elaboração Própria

Figura 34: Comportamento Coeficiente de Poisson dos corpos de prova, com altura de 100 mm, a) Comportamento Experimental e b) Comportamento numérico, onde: Frictionless 1 e Rough 1 Coeficiente Poisson medido na região perto dos apoios e Frictionless 2 e Rough 2 Coeficiente de Poisson medido na região central ($h = 50$ mm).



Fonte: Stalter (2019)

Fonte: Elaboração Própria

O comportamento do coeficiente Poisson no trabalho de Stalter (2019), para a altura dos cp's de 33 mm é representado através do aumento linear do coeficiente de Poisson na medida em que há o aumento da tensão de confinamento. Nas figuras 29 (a) e 30 (a) não descrevem este comportamento, pois o coeficiente de Poisson varia muito pouco com o acumulo de tensões. Nas figuras 29 (b) e 30 (b) o comportamento do coeficiente de poisson é muito parecido com o comportamento do trabalho de Stalter (2019).

O comportamento do coeficiente Poisson no trabalho de Stalter (2019), para a altura dos cp's de 100 mm o coeficiente de Poisson tem uma pequena variação nas tensões iniciais e se mantém constante com o aumento de tensões, só voltando a variar novamente após a amostra chegar na tensão de ruptura. Nas figuras 31 (a) e 32 (a), é possível notar que o coeficiente de Poisson varia muito pouco com o aumento das tensões, aproximando-se do comportamento dos resultados experimentais. As figuras 31 (b) e 32 (b) não correspondem aos resultados de Stalter(2019), pois o coeficiente de Poisson apresenta acréscimo linear na medida em que as tensões atuantes vão aumentando.

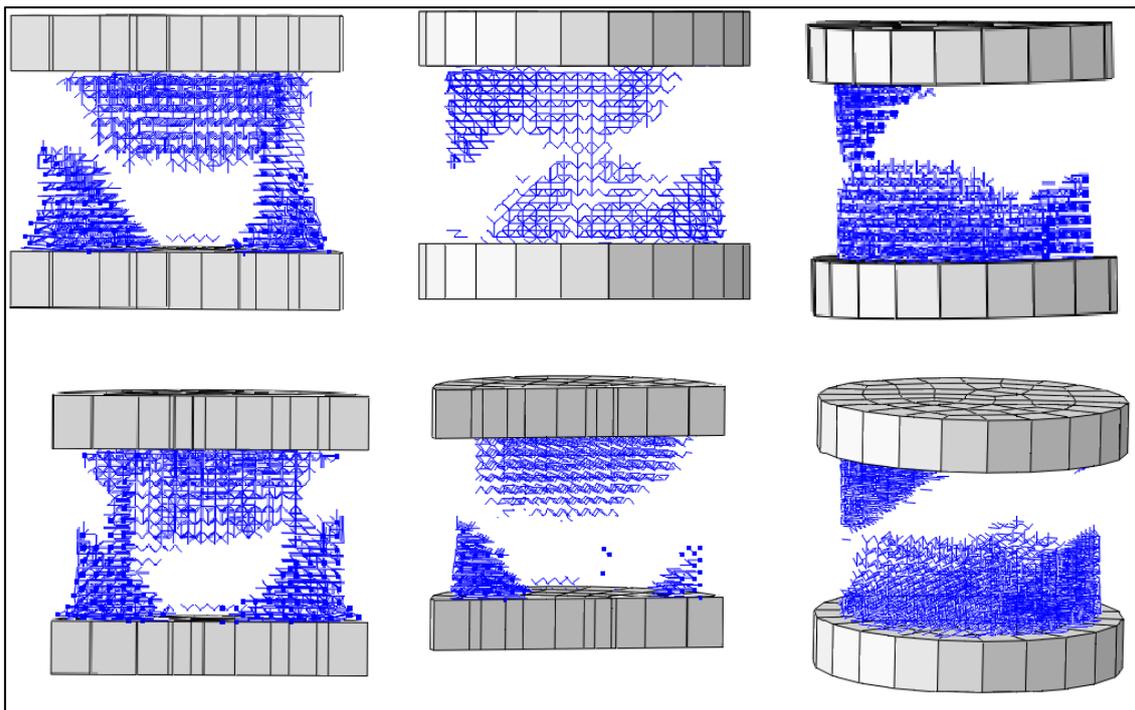
Em vista dos resultados apresentados neste trabalho sobre o coeficiente de Poisson, a lei de contato frictionless foi a que melhor reproduziu os

resultados encontrados por Stalter, (2019), para a altura do corpo de prova de 100 mm, nos corpos de prova de altura 33 mm o gráfico do coeficiente de poisso apresentou comportamento diferente. A lei de contato rough apresentou resultados parecidos com Stalter (2019), apenas no corpo de prova de altura 33 mm, nos corpos de prova de altura de 100 mm o gráfico do coeficiente de poisson apresentou comportamento diferente.

4.4 Ruptura dos Corpos de Prova

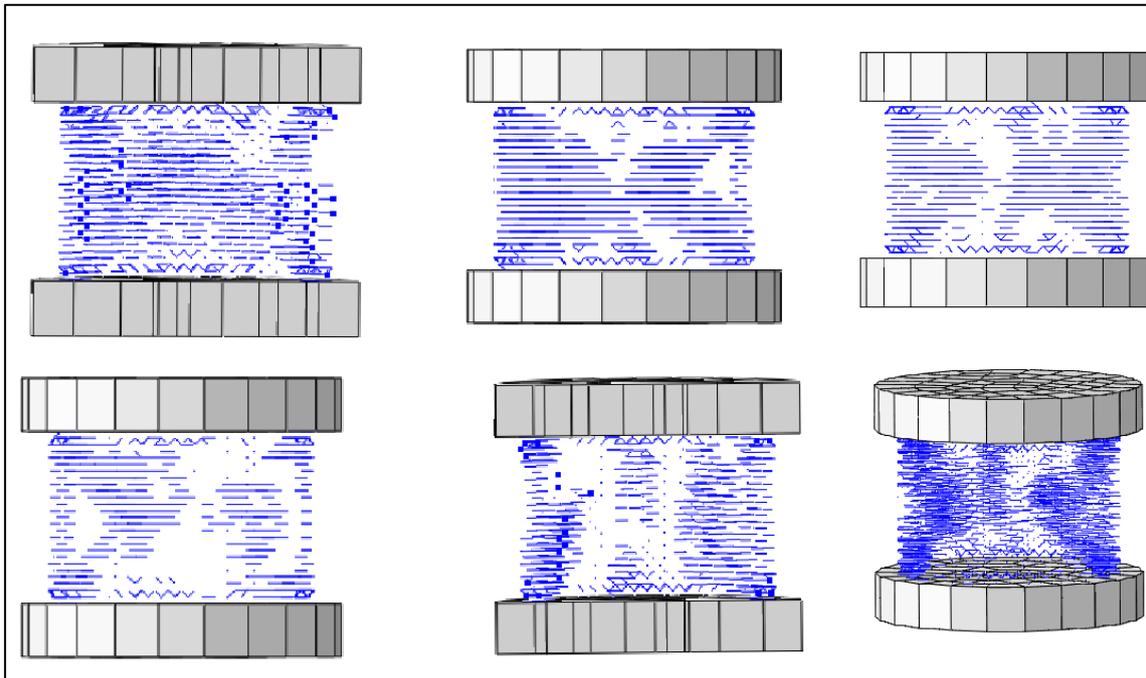
Nas figuras a seguir são apresentadas as rupturas dos corpos de prova das vinte simulações totais. Onde cada figura representa a ruptura de um corpo de prova.

Figura 35: Ruptura dos cinco corpos de altura com lei de contato frictionless e altura de 33 mm.



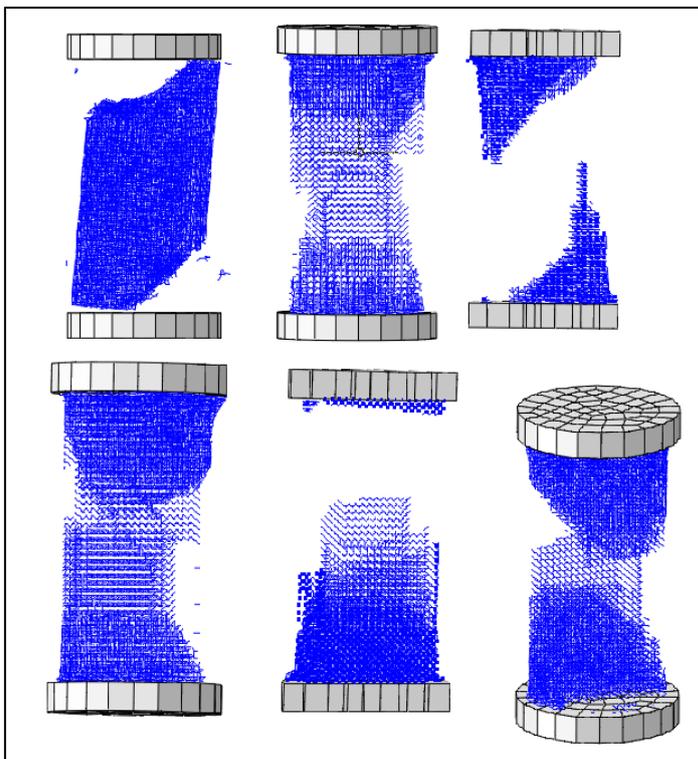
Fonte: Elaboração Própria.

Figura 36: Ruptura dos cincocorpos de altura com lei de contato rough e altura de 33 mm.



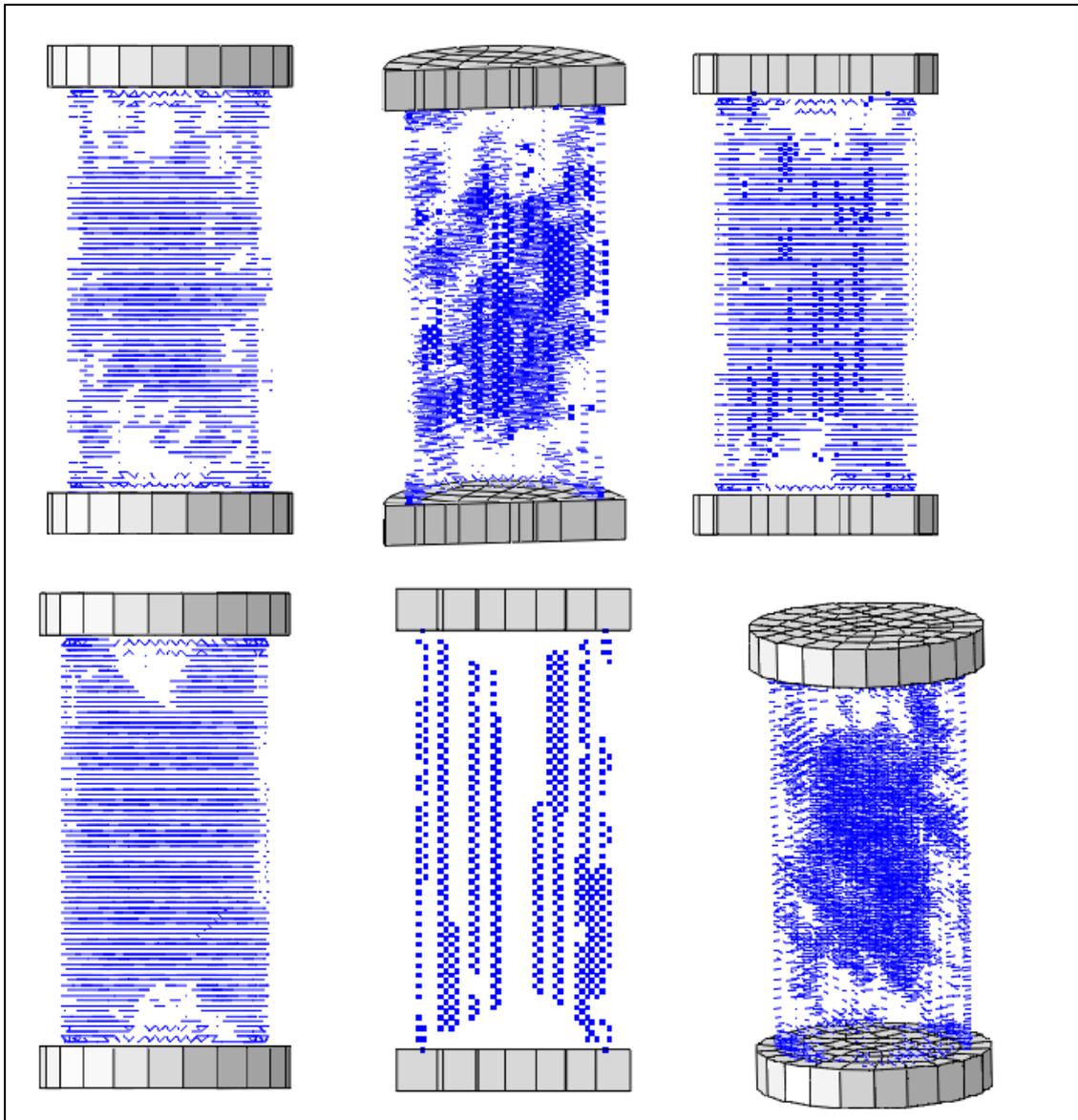
Fonte: Elaboração Própria

Figura 37: Ruptura dos 5corpos de altura com lei de contato fricitionless e altura de 100 mm.



Fonte: Elaboração Própria

Figura 38: Ruptura dos cinco corpos de altura com lei de contato rough e altura de 100 mm.



Fonte: Elaboração Própria

Nos corpos de prova numéricos rompidos com a lei de contato frictionless apresentam grande semelhança com a ruptura experimental, onde os cp's de altura de 33 mm apresentam grandes falhas e perda muito grande de material na região central das amostras. Os Cp's com altura de 100 mm apresentam grandes fendas verticais que percorrem todo comprimento das amostras.

Com relação aos corpos de prova numéricos rompidos com lei de contato rough apresentaram uma ruptura diferente da ruptura experimental, pois como rough simula uma cola as tensões atuantes nas superfícies dos cp's com as prensas metálicas, gerando um acúmulo de tensões nesta região e por isso a ruptura acontece em formato de uma ampulheta. Essa forma de ruptura é mais visível nos cp's com altura de 33 mm.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho buscou realizar a simulação numérica com dois diferentes vínculos entre os cp's e as prensas metálicas, do ensaio de compressão em argamassas realizado experimentalmente por Stalter, (2019). Onde foi comparado os resultados dos gráficos tensões x deformação, tensões de ruptura, módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson e ruptura das amostras.

Na lei de contato rough as tensões máximas, coeficiente de Poisson (cp's com altura de 100 mm) e ruptura das amostras demonstraram resultados diferentes com os resultados de Stalter, (2019). O comportamento do gráfico tensão x deformação, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson (com altura de 33 mm) apresentaram resultados semelhantes com os encontrados por Stalter, (2019).

A lei contato frictionless gerou resultados compatíveis com resultados práticos de Stalter, (2019). Nos itens: de gráfico tensão x deformação, tensões de ruptura, módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson (nos cp's com 100 mm de altura) e ruptura dos corpos de prova.

Por fim, as duas leis de contato apresentaram resultados significativos, mas a lei de contato frictionless foi a que melhor adequou-se para caracterizar o comportamento das argamassas de assentamento, simultaneamente com o trabalho de Stalter, (2019).

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

A seguir são apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Simular o segundo traço 1:1:6. com os mesmos valores de Amplitude e step deste trabalho;
- Simular os corpos de prova com lei Constitutiva Diferente;
- Simular os cp's com materiais diferentes na malha do LDEM. Ex: Concreto Armado.

6 REFERÊNCIAS

ARAÚJO, J. M. DE. **Curso de Concreto Armado - Volume 2.**, 2010.

AZEVEDO, Á. F. M. **Método dos elementos finitos. EngineeringComputations**, p. 248, 2003.

BINELO, M. O. et al. **Método dos Elementos Discretos e Desafios de Desempenho Computacional**. Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, p. 43–62, 2017.

Carpinteri, A. **Mechanical damage and crack growth in concrete: plastic collapse to brittle fracture**. Dordrecht: Martinus Nijhoff;1986

COSTA, F. B. P. (2015), **Avaliação do desempenho de argamassas de assentamento modificadas poliméricamente para alvenaria estrutural**. In: Science &EngineeringJournal, p. 43-51, 2015.

ESPINOZA, JONATAHN TAPIA; ARAYA, KARLA; DOENITZ, M. **Método De Los Elementos Finitos**. p. 201–228, 2015.

HILLERBORG, A. **A model for fractureanalysis**. p. 1–16, 1978.

HILLERBORG, A. **A model for fractureanalysis**. Cod LUTVDG/TV BM-3005, p.1-8, 1978.

KOSTESKI, L. et al. **Combinação Entre O Metodo Dos Elementos Discretos Compostos Por Barras E O Metodo Dos Elementos**. v. XXIX, p. 15–18, 2010.

KOSTESKI, L.; BARRIOS, R.; ITURRIOZ, I. **Determinación de parámetrosfractomecánicos estáticos y dinámicos utilizando el Método de los Elementos Discretos compuestos por barras**. Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y DiseñoenIngeniería, v. 24, n. 4, p. 323–343, 2008.

KOSTESKI, L. E. **Aplicação do método dos elementos discretos formado por barras no estudo do colapso de estruturas**. 2012.

LÜBECK, A. **Comportamento mecânico e influência da argamassa no modo de ruptura da alvenaria estrutural**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, 2016.

MOHAMAD, G. & ROMAN, H. **Estudo do comportamento triaxial de argamassa**. In: III Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas. Vitória – ES, 1999.

MOHAMAD, G.; NETO, A. B. S. S.; PELISSER, F.; LOURENÇO, P. B.; ROMAN, H. R. **Caracterização mecânica das argamassas de assentamento para alvenaria estrutural – previsão e modo de ruptura**. Revista Matéria, v. 14, n. 2, p. 824-844, 2009.

Nayfeh, A. H., Hefzy M. S.; (1978): **Continuum Modelling of Three-Dimensional Truss-Like Space Structures**. AIAA Journal, Vol. 16 pp. 779-787

RIOS, R. D. **Aplicação do Método dos Elementos Discretos em Estruturas de Concreto**. p. 151, 2002.

ROCHA, M. M. **Ruptura e efeito de escala em materiais não-homogêneos de comportamento frágil**. 1989.

STALTER, T.C. **Comportamento Tensão-Deformação de corpos de prova de argamassas de diferentes resistências submetidos a compressão axial**. 90f. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Pampa. Alegrete.2019.

