

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

EDUARDO GABRIEL JUNG

**APLICAÇÃO DO MÉTODO DOS
ELEMENTOS DISCRETOS EM
SIMULAÇÕES ENVOLVENDO A
TERMOLOGIA**

**Alegrete
2023**

EDUARDO GABRIEL JUNG

**APLICAÇÃO DO MÉTODO DOS
ELEMENTOS DISCRETOS EM
SIMULAÇÕES ENVOLVENDO A
TERMOLOGIA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Bacharelado em Engenharia Mecânica como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador:

Leandro Ferreira Friedrich

Co-orientador:

Luis Eduardo Kostascki

**Alegrete
2023**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

J95a Jung, Eduardo Gabriel
Aplicação do método dos elementos discretos em simulações
envolvendo a termologia / Eduardo Gabriel Jung.
51 p.

Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação)-- Universidade
Federal do Pampa, ENGENHARIA MECÂNICA, 2023.
"Orientação: Leandro Ferreira Friedrich".

1. Abaqus. 2. LDEM. 3. Termologia. I. Título.

EDUARDO GABRIEL JUNG

**APLICAÇÃO DO MÉTODO DOS ELEMENTOS DISCRETOS EM SIMULAÇÕES ENVOLVENDO
A TERMOLOGIA**

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

Dissertação defendida e aprovada em: 02, fevereiro de 2023.

Banca examinadora:

Prof. Msc. Leandro Ferreira Friedrich

Orientador

Unipampa

Prof. Dr. Felipe Denardin

Unipampa

Prof. Dr. Thiago da Silveira

Unipampa



Assinado eletronicamente por **THIAGO DA SILVEIRA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 06/02/2023, às 13:44, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **FELIPE DENARDIN COSTA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 07/02/2023, às 15:47, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **LEANDRO FERREIRA FRIEDRICH, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 07/02/2023, às 16:05, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1034001** e o código CRC **490BAD49**.

RESUMO

As simulações computacionais têm tornado-se uma grande aliada dos engenheiros. Sendo uma forma de baixo custo e risco, o método dos elementos finitos tem se posicionado como o mais utilizado. Entretanto, em casos aonde se analisa a falha estrutural, o método dos elemento discretos torna-se uma ferramenta interessante. O entendimento da falha em estruturas submetidas à ação de grandes gradientes térmicos, como o incêndio, torna-se um problema de alta complexidade e importância. Com a perspectiva deste trabalho acadêmico, busca-se a viabilidade da aplicação e fatores representativos no estudo do método dos elementos discretos juntamente com a termologia, também em busca de caminhos úteis para pesquisa e ampliação do conhecimento neste meio. Foram utilizados métodos de revisão bibliográfica juntamente com análises computacionais no software Abaqus, além de diferentes formulações desenvolvidas para este fim. Foi realizada simulação no ambiente Abaqus/explicit, Abaqus/Standart e cálculos analíticos, que foram comparados para verificação. Nos resultados desta pesquisa, pode-se notar consistência do método relacionado às simulações envolvendo expansão e ruptura térmica, e localizou-se e apontou-se inconsistência na metodologia referente à transferência de calor, onde devido a restrições do software utilizado, não foi possível executá-las como esperado. Na conclusão, demonstrou a falha inicial de nossas hipóteses, as quais não possibilitaram a validação pela nossa metodologia. Foi possível sugerir novos estudos voltados para a linha de transferência de calor, onde acredita-se que simulações através do Fortran tenham bons resultados, além de uma autocrítica, onde fosse possível um maior aprofundamento dos estudos.

Palavras-chave: Abaqus. LDEM. Termologia.

ABSTRACT

Computer simulations have become a great ally of engineers, being a low cost and risk way, and the finite element method has positioned itself as the most used. However, in cases coupled to failure the discrete element, the method becomes an interesting tool . The understanding of failure in structures subjected to the action of large thermal gradients, such as fire, becomes a problem of high complexity and importance. With the perspective of this academic work, the search for the feasibility of the application and representative factors in the study of the method of discrete elements together with thermology, also in search of useful ways for research and expansion of knowledge in this environment. Bibliographic review methods were used along with computational analyzes in the Abaqus software, in addition to different formulations developed for this purpose. A simulation was carried out in the Abaqus/explicit, Abaqus/Standart environment and analytical calculations, which were sought to be compared for validation. In the results of this research, consistency of the method related to simulations involving expansion and thermal rupture can be noted, and inconsistency in the methodology regarding heat transfer was located and pointed out, where due to restrictions of the software used, it was not possible to perform them as expected. In conclusion, I proved the initial failure of our hypotheses, which did not allow validation by our methodology. It was possible to suggest new studies turns to the heat transfer line, where it is believed that simulations through for Fortran to have good results, in addition to self-criticism, where it was possible to further study

Keywords: Abaqus, LDEM, Thermology.

LISTA DE FIGURAS

1	Modelo cúbico básico do DEM	16
2	Modelo constitutivo Bilinear	17
3	Elementos de treliça.....	19
4	Modelo DEM e suas massas nodais.....	20
5	Esquema de representação da incorporação do critério de aleatoriedade no LDEM se utilizando do Modelo de Hillerborg e considerando G_f como campo de aleatoriedade sob ε_p	21
6	Amostra padrão.....	24
7	FEM no Abaqus.....	25
8	LDEM no Abaqus.....	25
9	Demonstração do engaste nas duas extremidades da amostra.....	27
10	Dilatação térmica de uma Barra única.....	31
11	Gráfico deslocamento e temperatura para uma barra única.....	31
12	Dilatação térmica pelo método do LDEM.....	32
13	Gráfico do deslocamento em relação temperatura do LDEM	33
14	Dilatação térmica pelo método do FEM.....	33
15	Gráfico do deslocamento em relação temperatura FEM.....	34
16	Tabela de resultados da dilatação térmica.....	34
17	Visualização da distribuição de tensões através de engaste simples.....	35
18	Visualização da distribuição de tensões através de engaste duplo.....	36
19	Visualização dos métodos de engaste	36
20	Visualização do gráfico tensão em relação temperatura e forma de engaste .	37
21	Demonstração da ruptura por engaste simples	38
22	Gráfico das forças resultantes no engaste simples	39
23	Demonstração da ruptura por engaste duplo	39
24	Gráfico das forças resultantes no engaste duplo	40
25	Demonstração da ruptura por engaste simples vinculado com critério de aleatoriedade	41
26	Gráfico das forças resultantes no engaste simples, vinculado ao critério de aleatoriedade	41
27	Demonstração da ruptura por engaste duplo, vinculado com critério de aleatoriedade	42
28	Gráfico das forças resultantes no engaste duplo vinculado ao critério de aleatoriedade	42
29	Transferência de calor no Bloco padrão, FEM standart	43
30	Gráfico da transferência de calor no Bloco padrão, FEM standart.....	44
31	Tentativa de transferência de calor no LDEM com elemento T3D2	45
32	Transferência de calor no Bloco padrão FEM standart	46

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

LDEM	Método dos elementos discretos formado por barras
FEM	Método dos elementos finitos
AISI	American Iron and Steel Institute

LISTA DE SÍMBOLOS

A_l	Areá da secção transversal
L	Comprimento da secção cúbica
ν	Coefficiente de Poisson
Γ	Energia dissipada na ruptura de um prisma
G_f	Energia dissipada na ruptura de um material
A	Areá de fratura atual
C	Matriz de amortecimento
F	Força axial
ε	Deformação específica
E	Modulo de elasticidade
ρ	Densidade do material
δ_l	Varição de comprimento de elemento
α	Coefficiente de dilatação térmica
δT	Varição de temperatura
σ	Tensão
Q_x	Taxa de transferência de calor no eixo x
K	Coefficiente de transferência de calor
dt	Diferencial de temperatura
dx	Comprimento do elemento
C_p	Calor específico
ε_p	Deformação crítica de falha do elemento

SUMÁRIO

1 Introdução	11
1.1 Objetivos.....	12
1.1.1 Objetivo Geral.....	12
1.1.2 Objetivos Específicos.....	12
1.2 Justificativa	13
1.3 Hipóteses.....	13
2 Revisão Bibliográfica	15
2.1 Método dos elementos discretos formado por barras	15
2.1.1 Modelo constitutivo para o dano.....	16
2.1.2 LDEM no ambiente Abaqus/explicit	18
2.1.3 Modelagem das treliças espaciais	18
2.1.4 Discretização das massas	19
2.1.5 O modelo constitutivo do LDEM no Abaqus	20
2.1.6 A inclusão do critério de aleatoriedade.....	21
2.2 Termologia.....	22
2.2.1 Dilatação Térmica.....	22
2.2.2 Condução de calor.....	22
3 METODOLOGIA	24
3.1 Características do modelo.....	24
3.2 Dilatação térmica	26
3.3 Tensão térmica	26
3.3.1 Retração térmica com ruptura.....	27
3.3.2 Retração térmica com ruptura aleatória	28
3.4 Transferência de calor.....	28
3.4.0.1 Transferência de calor FEM Standart	29
3.4.1 Transferência de calor LDEM explicit.....	29
4 RESULTADOS	30
4.1 Dilatação Térmica.....	30
4.1.1 Simulação de uma Barra	30
4.1.2 Dilatação térmica em um bloco padrão do LDEM	32
4.1.3 Tensão resultante na dilatação térmica de um bloco.....	35
4.1.4 Ruptura do bloco padrão pela tensão térmica.....	37
4.1.4.1 Característica de Aleatoriedade.....	40
4.2 Transferência de calor.....	43
4.2.1 Transferência de calor na amostra padrão através do FEM.....	43
4.2.2 Transferência de calor no LDEM Abaqus/explicit	44
4.2.3 Transferência de Calor no LDEM Abaqus/standart.....	45
5 Considerações Finais	47
5.1 Conclusões.....	47
5.2 Trabalhos futuros	48
Referências	49

1 INTRODUÇÃO

O estudo da falha de estruturas submetidas à ação de grandes gradientes térmicos, como no caso de incêndios, é um problema complexo e de grande importância para a sociedade. Saber como e quando irá falhar uma estrutura disposta a estas condições extremas resultará na segurança das pessoas assim como a diminuição de perdas econômicas.

A realização de testes de falhas de estruturas submetidas a grandes gradientes térmicos, em escala real, são excessivamente custosos e de difícil reprodução (RUSSO S.; SCIARRETTA, 2012). A utilização de modelos físicos em escala reduzida apresentam-se como uma possível alternativa, contudo é muito difícil extrapolar estas propriedades e resultados a escalas reais. Além disto a infraestrutura necessária para a realização destes testes em escala reduzida segue sendo um impeditivo para a realização dos mesmos.

Frente a isto a realização de simulações numéricas torna-se uma alternativa interessante para conhecer os mecanismos de falha e cargas últimas que encontram-se em problemas de ruptura de estruturas devido a grandes gradientes térmicos. Dentre os diversos métodos numéricos disponíveis hoje em dia, o Método dos Elementos Discretos formados por barras (LDEM) é uma ótima opção quando estamos interessados em resolver a falha e ruptura em materiais quase-frágeis, porém esta versão do método, nunca foi testada para simulações de problemas envolvendo a termologia.

Assim, neste estudo buscou-se verificar se o LDEM é capaz de representar corretamente problemas básicos de termologia e se o comportamento do material simulado com este método é condizente com a teoria. Cabe salientar que os problemas analisados neste trabalho, em certo casos são mais fáceis de simular por métodos tradicionais, como elementos finitos, os quais foram desenvolvidos especificamente para estes fins. Porém se for de interesse, posteriormente, simular a falha em estruturas utilizando estes métodos, não seria possível sem a introdução de outras varias implementações e leis teóricas que deixariam mais complexas a simulação deste problema.

A motivação para este estudo é entender o LDEM como uma ferramenta nova e inovadora para compreender de melhor forma a fratura de uma material e a forma na qual ela irá ocorrer. Aliando isto com a termologia temos a possibilidade de estudarmos as consequências de um possível incêndio em nossas estruturas, ou então os resultados da perdas de camadas refratárias, por exemplo. A motivação para um estudo tendo em base

o LDEM se justifica devido ao fato de que através dele é possível a busca de melhores resultados na visualização do comportamento de diferentes materiais através da simulação computacional bem como o surgimento de danos na sua microestrutura. O tema de pesquisa do presente trabalho é o LDEM, delimitando-o para a utilização na termologia. A aplicação de elementos finitos no estudo de cargas térmicas já se trata de um tema amplamente desenvolvido, porém com o uso do LDEM é possível obter resultados mais aprofundados e precisos.

Tendo estas informações já comprovadas o problema da pesquisa é, qual o benefício da aplicação do LDEM na termologia? O LDEM é um método desenvolvido para o estudo do colapso de estruturas por cargas mecânicas, na termologia existira inúmeras peculiaridades as quais devem ser consideradas e avaliadas, além disto a análise por elementos finitos em boa parte dos casos torna-se suficiente.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é analisar se a versão do método dos elementos discretos implementada no ambiente Abaqus consegue representar corretamente problemas em simulações envolvendo a termologia.

1.1.2 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos pode-se ressaltar:

- Checar se um corpo simulado com o método dos elementos discretos se dilata de acordo com as características da termologia. Esta verificação se realizará comparando os resultados obtidos no LDEM com simulações em Elementos Finitos (FEM) e comparando com as fórmulas teóricas.
- Analisar se o corpo simulado com o método dos elementos discretos responde corretamente a transferência de calor interna. Para atingir este objetivo serão comparadas as simulações realizadas no LDEM e no FEM.
- Checar a necessidade de modificações para o correto funcionamento do método dos elementos discretos perante a termologia. Para atingir este objetivo será estudado se

há necessidade de alterar propriedades da lei constitutiva dos elementos do LDEM, em busca de que o modelo comporte-se da forma esperada segundo a bibliografia.

1.2 Justificativa

A busca de maiores conhecimentos científicos sobre o sistema construtivo em situações expostas a grandes gradientes térmicos é caracterizado como um campo desafiador. Além da alta complexidade física que envolve este fenômeno, a realização de ensaios experimentais tem custos elevados ((RUSSO S.; SCIARRETTA, 2012)). E ainda enfatiza-se a carência de infraestrutura laboratorial no país para realizar estes estudos ((SEITO A. I.; GILL, 2008)).

Entretanto, a evolução da tecnologia computacional tem permitido o surgimento de modelos teóricos e computacionais como uma alternativa a estudos experimentais de situações físicas reais. A utilização destas simulações permite estudar diversos cenários e variadas condições de contorno (BOLINA, 2020).

O método dos elementos discretos foi amplamente testado para a caracterização de falha em materiais com comportamento frágil ou quase-frágil. Assim, se o método simular de forma correta problemas básicos da termologia será possível utilizá-lo em problemas acoplados à falha e dano, onde estes são produzidos pelo aumento de temperatura. Desta forma poderia-se usar esta metodologia como uma ferramenta para resolver outros tipos de problemas complexos da engenharia.

A justificativa para este estudo está na necessidade de entender melhor como são os processos de falha e ruptura em diversos materiais, submetidos a condições ambientais extremas. O LDEM proporciona respostas confiáveis relacionadas a qual forma ocorre a falha, podendo ser esta metodologia uma aliada no estudo destes problemas.

1.3 Hipóteses

As hipóteses deste estudo são: H1) É possível a aplicação totalmente funcional do LDEM em problemas que envolvem a termologia. H2) Um corpo simulado através do LDEM se dilata de acordo com as características da termologia. H3) O corpo simulado através do LDEM responde de acordo com a realidade em transferência de calor interno. H4) As modificações necessárias para simulações através do LDEM na termologia são

possíveis.

Na sequência desta introdução será colocado no item 2 uma revisão bibliográfica que apresenta os principais temas a serem estudados neste trabalho. Dentro do item 3 se apresentara a metodologia aplicada a esta pesquisa. No item 4, apresentam-se os resultados obtidos neste trabalho. No item 5 estão expostas as considerações finais, onde se destaca a relevâncias do trabalho juntamente com as propostas de trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta secção apresenta conceitos e definições necessárias para a desenvoltura do trabalho.

2.1 Método dos elementos discretos formado por barras

A ideia inicial da representação de um sólido por elementos discretos se deu na década de 40, primeiramente apresentado pelo trabalho de (HRENNIKOF, 1941) o qual utilizou um arranjo de barras solidas para seu estudo. (ABSI, 1971) trabalhou em uma ideia muito semelhante para seus estudos, o qual por meio de um arranjo de barras simulou as fundações elásticas e paredes estruturais para grandes edificações. Com a evolução da informática e dos métodos computacionais o método dos elementos discretos foi acoplado juntamente como o método dos elementos finitos (MEF) para resolver problemas mais complexos. (P.A; D.R.J, 2004).

O LDEM representa um corpo contínuo por meio de um arranjo espacial de barras com a massa concentrada em suas extremidades. A configuração demonstrada na figura (1) representa o arranjo básico idealizado por (NAYFEH A.H.AND HEFZY, 1978), e posterior utilizado por Riera (1984) onde nove nós do módulo cúbico elementar, cada um com três graus de liberdade, se interconectam por 20 elementos uniaxiais. Para o caso de materiais isotrópicos a área da secção transversal A_L dos elementos longitudinais do módulo cúbico se dá pela Eq (1)

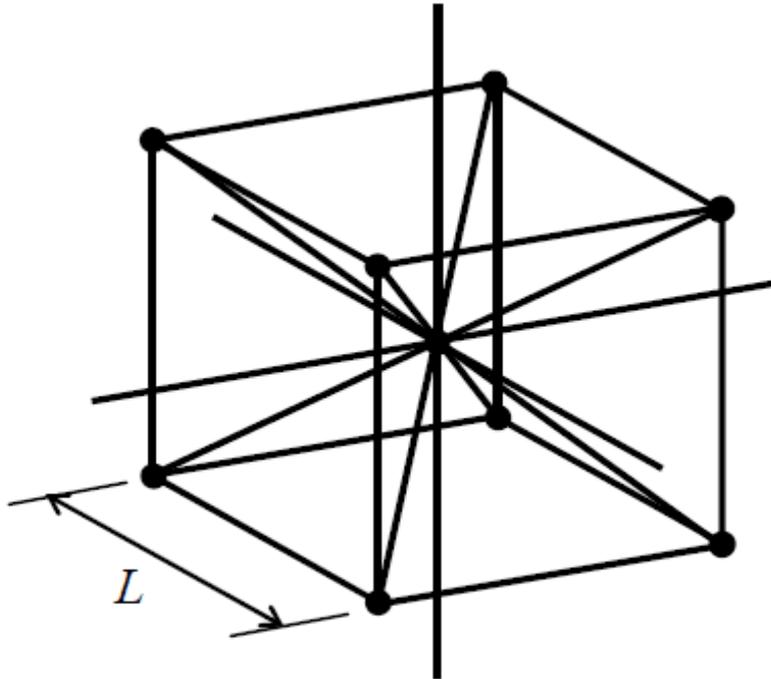
$$A_L = \frac{9 + 8(9\nu(4 - 8\nu))}{18 + 24(9\nu(4 - 8\nu))} * L^2. \quad (1)$$

onde L se caracteriza como o comprimento da secção cúbica e ν sendo o coeficiente de poisson. De forma muito similar A_d é obtido pela Eq (2).

$$A_d = \frac{2}{\sqrt{3}} * (9\nu(4 - 8\nu)) * \frac{9 + 8(9\nu(4 - 8\nu))}{18 + 24(9\nu(4 - 8\nu))} * L^2 \quad (2)$$

Maiores detalhes das Eq(1) e Eq(2) podem ser encontrados em (KOSTESKI, 2008).

Figura 1 – Modelo cúbico básico do DEM



Fonte: Adaptado (KOSTESKI, 2012)

2.1.1 Modelo constitutivo para o dano

Sendo G_f a energia dissipada na ruptura de um material, para a ruptura de um cubo de dimensões $L \times L \times L$ a energia dissipada será demonstrada na eq(3).

$$\Gamma = G_f A = G_f L^2 \quad (3)$$

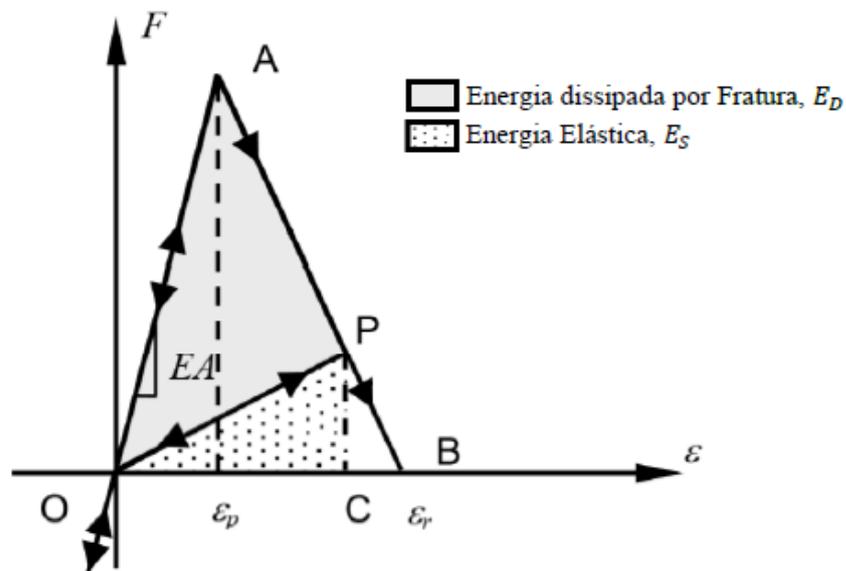
Aonde "A" é a área de fratura. Porém a energia dissipada na ruptura do mesmo cubo simulado com LDEM é composta pela contribuição de cinco elementos longitudinais (quatro coincidentes com os eixos do módulo e um elemento interna) e quatro diagonais. Esta energia dissipada na ruptura pode ser representada pela eq(4).

$$\Gamma_{DEM} = G_f(4 * 0.25 * C_A + C_A + 4C_A(\frac{2}{\sqrt{3}})^2)L^2 \quad (4)$$

Em resumo, quando um material se quebra geram-se áreas de fraturas equivalentes, estas indicadas na eq(4), a dissipação de energia da fratura está correlacionada com a área de fratura e a lei constitutiva empregada, (KOSTESKI, 2012).

Uma das leis constitutivas muito empregada para este meio, a lei bilinear, ou então o modelo de hillerborg, utilizou-se para a simulação dos mais variados materiais. (RIERA J.D.; ITURRIOZ, 1995) foram os pioneiros em adaptar esta lei constitutiva no contexto do LDEM, em virtude de uma opção para a captura dos efeitos da nucleação e propagação de fissuras. Alguns parâmetros que definem o modelo podem ser visualizados na figura (2).

Figura 2 – Modelo constitutivo Bilinear



Fonte: Adaptado (KOSTESKI, 2012)

Sendo:

F= Força axial

ε = Deformação específica

E = Modulo de Elasticidade

A = Área da seção transversal

A descrição deste gráfico se dá por (KOSTESKI L.E. PINTO.O. ITURRIOZ, 2010) e demonstra as energia envolvidas no modelo constitutivo, sendo elas: a área do triangulo OPC é a energia dissipada na fratura é a área do triangulo OAB a densidade de energia necessária para a ruptura.

Na formulação presente o LDEM admite somente falhas por tração. Em contrapartida para fratura por compressão a ruptura se dá por tração indireta, no qual o material deve se comportar como linear elástico para essa consideração. Esta suposição é razoável em materiais quase frágeis, nos quais as tensões últimas são usualmente entre cinco e dez vezes maiores que a tensão de tração uniaxial (KUPFER H.B. E GERSTLE, 1973). A principal premissa que se leva em conta é de que a área abaixo da curva força-deformação deve ser igual a densidade de energia necessária para a fratura da área influente do elemento.

2.1.2 LDEM no ambiente Abaqus/explicit

(KOSTESKI, 2012) implementou o LDEM dentro do ambiente Abaqus/explicit possibilitando diminuir os graus de liberdade em certos problemas e criando a possibilidade de aplicação em geometrias mais complexas, combinado esse método com elementos finitos. Em seus estudos o mesmo apresentou a validade desta implementação, e frisou a aptidão de resolver problemas complexos com o LDEM.

Dentro dos softwares de elementos finitos, o Abaqus caracteriza-se por ser um dos programas comerciais para a análise de elementos finitos de grande complexidade, além de possuir grande versatilidade, de modo que soluções precisas são obtidas para problemas dinâmicos, problemas complexos, bem como não lineares. O Abaqus/explicit é um produto dentro do ambiente do software que por suas particularidades é utilizado para análises não lineares com transiente ou dinamismo através da integração explícita (SIMULIA, b).

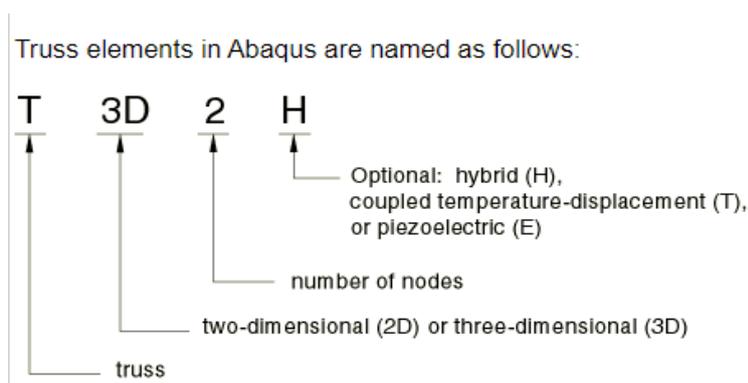
2.1.3 Modelagem das treliças espaciais

O LDEM é introduzido no Abaqus com a substituição do corpo contínuo, formado por suposição de módulos básicos e modelando as barras de treliças espaciais utilizando FEM, com elementos de treliça tridimensionais com dois nós (T3D2) geradas no

Abaqus/explicit ((KOSTESKI, 2012)). (KOSTESKI L.E. PINTO.O. ITURRIOZ, 2010) também ressaltam que cada um desses elementos estão associados a uma seção e tipo de material específico.

Existem diferentes variação dos elementos de treliças dentro do software, a dissolução da nomenclatura (T3D2) se dá como uma treliça (T), com três dimensões (3D) e dois nós (2). Na busca de uma maior gama de aplicações existe um quinto dígito, o qual é chamado de opcional e com três variações (H),(T) e (E) sendo (H) uma análise híbrida (Hybrid), (T) uma análise com deslocamento de temperatura aplicada (coupled temperature-displacement) e (E) uma análise piezoeletrica (Piezoelectric), demonstrado na imagem (3), porém estes opcionais estão somente disponíveis na versão Abaqus/Standart (SIMULIA, a).

Figura 3 – Elementos de treliça

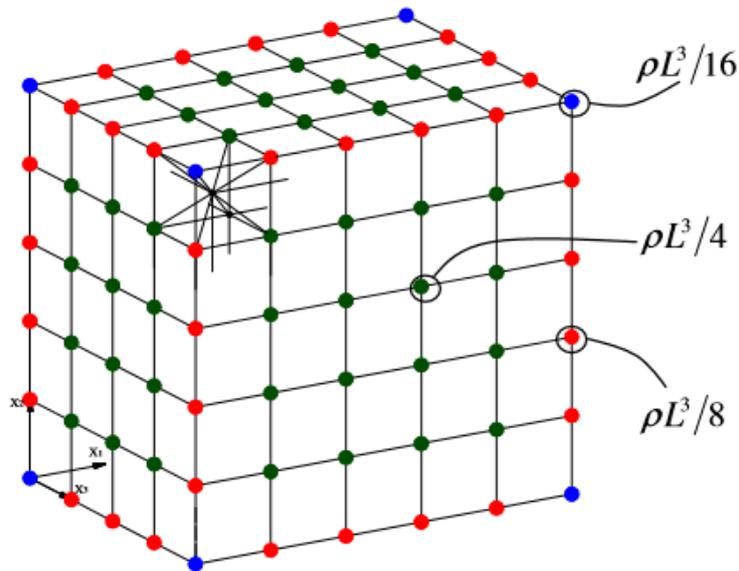


Fonte: Adaptado (SIMULIA, a)

2.1.4 Discretização das massas

O elemento discretizado do LDEM concentra suas massas nos nós do modelo espacial, e varia de acordo com a seção e o volume influenciável de cada ponto. Levando em conta o modelo cúbico apresentado na figura (1) o volume representativo do cubo será de L^3 e sua massa como ρL^3 , sendo ρ a densidade do material, sua massa sendo o conjunto do nó central e o somatório da oitava parte dos demais nós dos vértices. O nó central representa a massa por $\frac{\rho L^3}{2}$ e a massa de cada nó das extremidades por $\frac{\rho L^3}{16}$, assim na figura(4) pode notar-se os nós azuis possuindo $\frac{1}{16}$ da massa, sendo de vértices, nós vermelhos de aresta possuindo $\frac{1}{8}$ da massa e nós verde das faces possuindo $\frac{1}{4}$ da massa.

Figura 4 – Modelo DEM e suas massas nodais



Fonte: Adaptado (KOSTESKI L.E. PINTO.O. ITURRIOZ, 2010)

No entanto pelo emprego do software Abaqus/explicit não foi possível a adição de massas unicamente nos nós, estas causariam indefinições nos cálculos do programa. Em solução a esta será implementada a igualdade de densidades de massas das barras e as massas nodais, esta solução proposta e exemplificada por (KOSTESKI, 2012).

2.1.5 O modelo constitutivo do LDEM no Abaqus

O modelo de ruptura a qual Abaqus/explicit emprega tem características muito similares a lei constitutiva bilinear, ele trata a compressão sempre como elástico linear antes do dano, e a remoção dos elementos quando totalmente danificados, se possível.

(DUÓ, 2021) cita a utilização por parte do abaqus do modelo de fissura distribuídas (smeared crack model) para a representação da descontinuidade do comportamento frágil no concreto, o critério de fratura baseia-se no de (HILLERBORG, 1978), utilizando assim a taxa de liberação de energia (G_f) como parâmetro de fratura.

(KHAN N. IQBAL; TARAR, 2016) cita a forma a qual Abaqus/explicit utiliza da propriedade do material, brittle cracking, ou então modo de quebra frágil para a determinação da força e deslocamento necessário a ruptura. Vale a ressalva de que esta forma de simulação por conta do modelo de fissura frágil está somente disponível no Abaqus/explicit, em vista do Abaqus/Standart esta opção não é válida.

2.1.6 A inclusão do critério de aleatoriedade

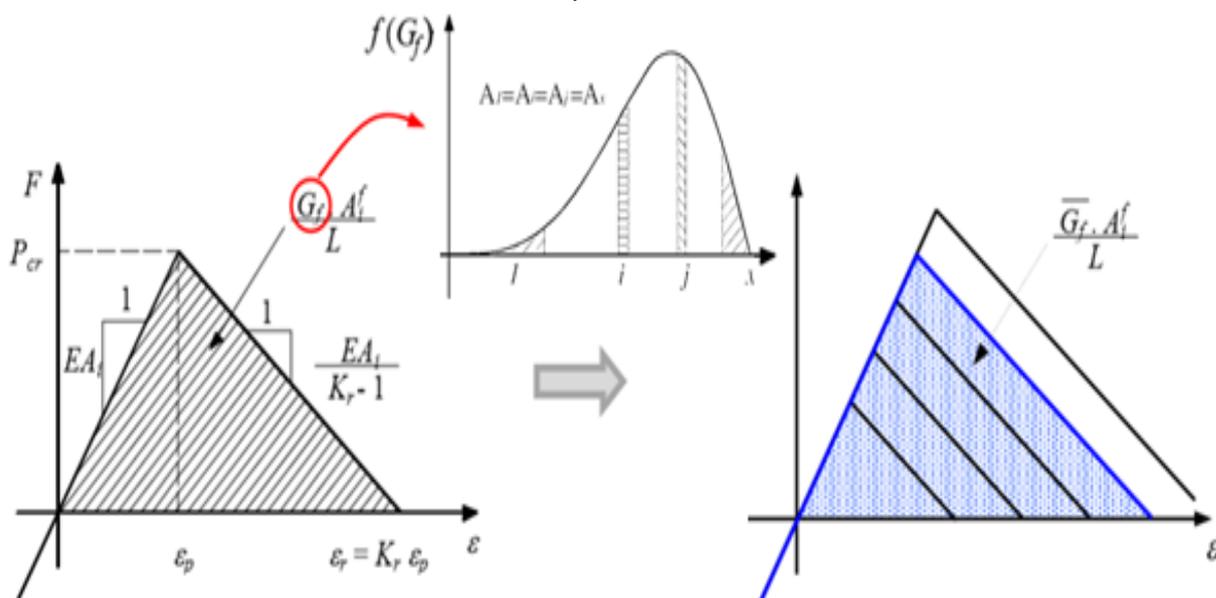
A necessidade da inclusão de um critério de aleatoriedade nas propriedades do material se deu por conta das imperfeições do cubo em escala real para o cubo elementar. Neste caso se adiciona no Abaqus uma variável aleatória sobre a tenacidade do matéria G_f , do tipo Weibull. Mais detalhes sobre o conceito em (KOSTESKI, 2012).

Segundo (KOSTESKI L.E. PINTO.O. ITURRIOZ, 2010) para a introdução do aspecto aleatório no Abaqus, deve-se selecionar uma quantidade X de materiais o qual corresponda ao intervalo $[1;x]$ e gerar a quantidade de quatro vezes este valor, os quais totalizam as seções de ligação dos intervalos.

As seções equivalentes dos elementos são alocadas nas arestas, faces, internas e diagonais e a probabilidade x dos intervalos são em função da densidade de probabilidade (G_f), sendo sua área constante e igual a $1/x$ dentro destes intervalos.

A forma de incorporação da aleatoriedade na energia de fratura (G_f) é mostrado na figura (5), este o qual relaciona a energia com a área da lei constitutiva.

Figura 5 – Esquema de representação da incorporação do critério de aleatoriedade no LDEM se utilizando do Modelo de Hillerborg e considerando G_f como campo de aleatoriedade sob ε_p



Fonte: (DUÓ, 2021)

2.2 Termologia

Tratando-se de um ramo da física a termologia pode ser definida como o ramo que estuda os fenômenos térmicos, abrangendo um grande grupo no qual irá encontrar-se os subgrupo que estudam a temperatura e suas peculiaridades.

2.2.1 Dilatação Térmica

(R.C.HIBBELER, 2009) demonstra em seus estudos que uma mudança de temperatura poderá ocasionar alterações nas dimensões de um material. Usualmente com o aumento da temperatura o material irá expandir e se contrair com a sua diminuição. Em um material homogêneo, com temperatura constante e sem restrições o deslocamento ocasionado pela temperatura pode ser determinado pela eq(5).

$$\delta_l = \alpha \delta T L. \quad (5)$$

sendo:

δ_l = Variação de comprimento de elemento

α = Coeficiente de dilatação térmica

δT = Variação de temperatura

L = Comprimento inicial

Segundo (BEER; JOHNSTON, 1992) não se ocasiona tensão em um material livre somente pela aplicação de temperaturas, porém caso este material esteja restringido com a variação de temperatura aparecerão tensões, conforme a eq(6)

$$\sigma = E \alpha \delta T. \quad (6)$$

2.2.2 Condução de calor

Segundo (INCROPERA et al., 2008) a condução de calor se refere ao transporte de energia em um meio devido a um gradiente de temperatura interna, o mecanismo para que

isso ocorra se dá pela atividade atômica ou molecular aleatória. A condutividade térmica de um material pode ser definida como a taxa de transferência de calor por meio de uma unidade de comprimento por área por unidade de diferença de temperatura (ÇENGEL; CIMBALA, 2015).

Este fenômeno de transferência de calor interno de um meio pode ser demonstrado através da lei de Fourier, lei esta qual deduz a transferência de calor em sólidos em três dimensões, sua forma devidamente simplificada é deduzida em uma condução unidimensional pode ser mostrada na Eq(7) (ÇENGEL; CIMBALA, 2015)

$$Q_x = -KA \frac{dT}{dx} \quad (7)$$

Sendo:

Q_x = Taxa de transferência de calor no eixo x.

K = Coeficiente de transferência de calor.

A = Área do elemento.

dt= Diferencial de temperatura.

dx= Comprimento do elemento.

3 METODOLOGIA

3.1 Características do modelo

A realização deste estudo se deu através de simulações do conceito do LDEM no ambiente do abaqus/explicit, as quais foram verificadas através da comparação de dados obtidos em simulações pelo MEF e métodos analíticos, os quais já possuem sua funcionalidade comprovada. Em busca de uma melhor precisão para todas as simulações posteriormente demonstradas se manteve uma amostra padrão, esta com mesmas dimensões e material, sendo aço inox AISI 304 com propriedades retiradas de bibliografias já conhecidas (INCROPERA et al., 2008) (R.C.HIBBELER, 2009) e um corpo cúbico de dimensões 50x50x150mm, mostrado abaixo:

Propriedades do material aço inox AISI 304:

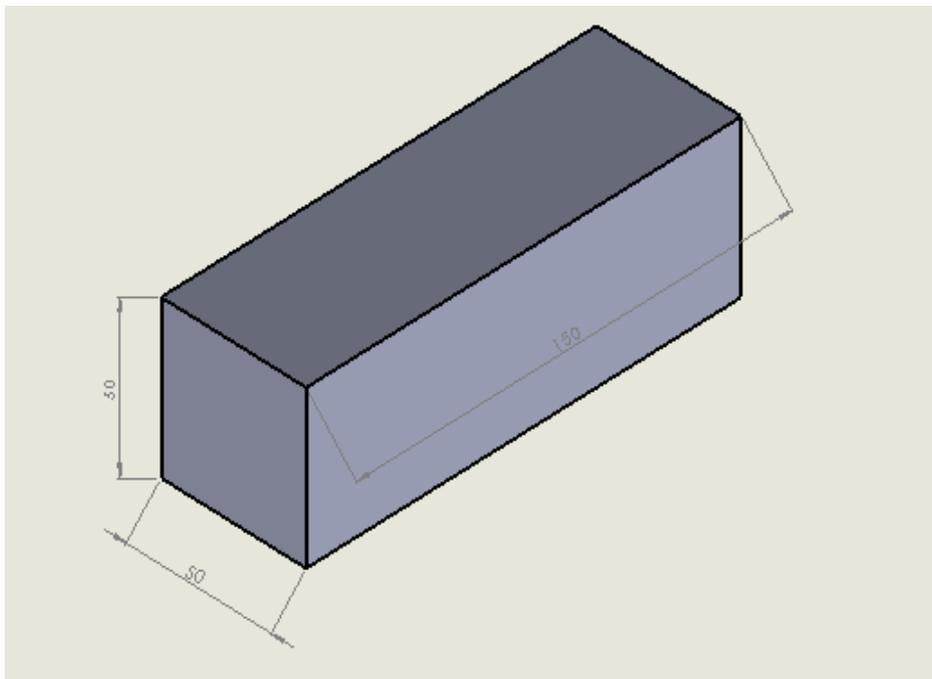
$$\rho = 7900 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$Cp = 477 \frac{\text{J}}{\text{kgK}}$$

$$E = 193\text{GPa}$$

$$\nu = 0,27$$

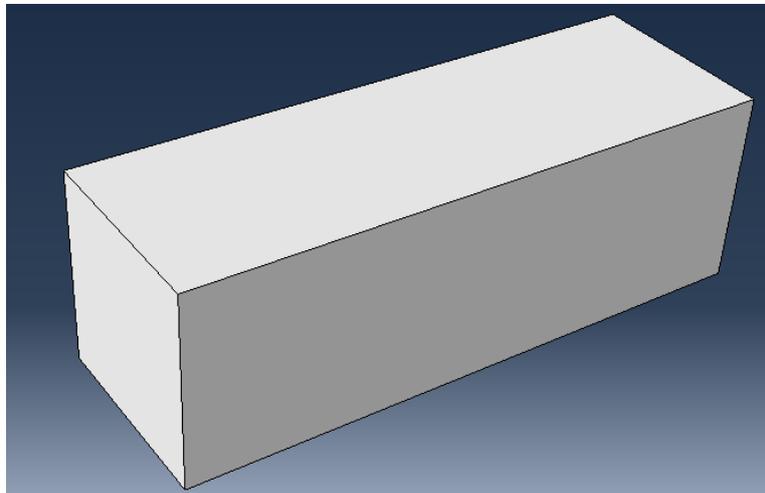
Figura 6 – Amostra padrão



Fonte: Próprio Autor

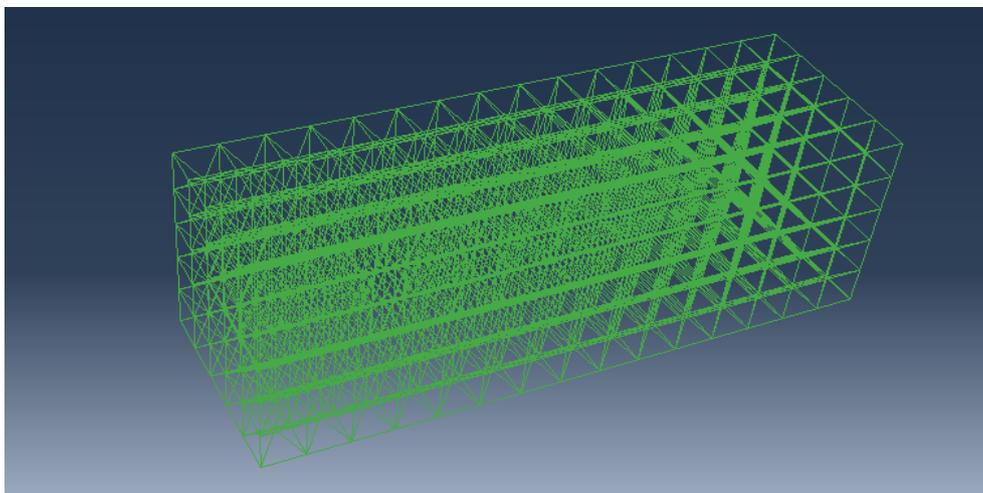
Para a transformação de nossa amostra padrão e adequação a estrutura de barras, as quais caracterizam o LDEM, utilizou-se de um código computacional, no qual se pode definir os parâmetros de nossa amostra. Foi atribuído para o estudo elementos de 10mm, sendo então constituída de 15 elementos na longitudinal e 5 nas restantes arestas. Posterior as definições, é criado pelo código computacional a geometria e a mesma é alocada em um arquivo para reconhecimento do Abaqus (maiores detalhes sobre este processo encontra-se em (KOSTESKI, 2012)), na figuras (7) e (8) demonstra a amostra padrão em cada ferramenta.

Figura 7 – FEM no Abaqus



Fonte: Autor

Figura 8 – LDEM no Abaqus



Fonte: Autor

3.2 Dilatação térmica

Para o método de simulação da dilatação térmica a utilização da amostra padrão, primeiramente simulada por características do LDEM, posteriormente em características do FEM e em última etapa por cálculos analíticos.

Para a possibilidade da dilatação térmica foi necessário a adição de uma nova propriedade ao material, a expansão térmica (α) esta retirada de bibliografias conhecidas ((R.C.HIBBELER, 2009)) ((INCROPERA et al., 2008)).

Propriedade do material aço inox AISI 304:

$$\alpha = 17E^{-6}$$

Se realizou a simulação no Abaqus/explicit para o LDEM e FEM por um tempo 0.1s (o tempo não ira influenciar o resultado, por conta de não haver transiente), além de um gradiente de temperatura com amplitude de 800°C , considerando-se que o bloco esteve em uma temperatura de 0°C e uma carga térmica de 800°C atribuídas no elemento homogeneamente e no mesmo instante (estas considerações foram utilizadas para a não existência de transiente térmico).

Primeiramente na simulação foi realizada somente a análise de uma linha, a qual é composta o LDEM, após este, o estudo da amostra padrão, da qual irá se retirar quais as dimensões cúbicas após a aplicação da carga térmica, este então, o deslocamento que a carga resultou no sólido.

Também foi realizado o cálculo da dilatação térmica por métodos analíticos em conta de um método disponibilizado por (R.C.HIBBELER, 2009) e demonstrado no capítulo (2.2.1). Este terceiro procedimento se deu de forma manual, também através da utilização da amostra padrão e para forma comprovatória, inibindo possíveis erros na validação dos dados retirados pelo MEF.

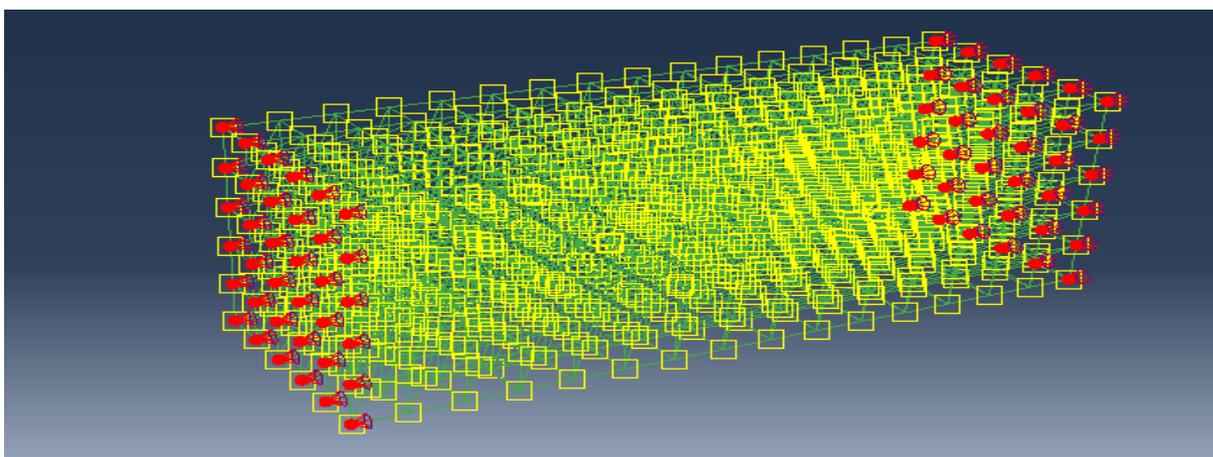
3.3 Tensão térmica

A restrição de deslocamento de uma amostra disposta a dilatação térmica resultará em tensões internas, as quais chamamos de tensões térmicas, logo posterior a análise da dilatação térmica buscamos estudos sobre as tensões térmicas.

Engastou-se as 2 extremidades da amostra conforme a figura (9) e adicionou-se um gradiente de temperatura negativo, homogêneo e instantâneo de 800°C, este gradiente é de forma negativa pois se busca uma força de tração, visto que nossa ferramenta de

análise funciona de melhor forma a forças de tração. Utilizou-se também de duas formas de engaste dos nós, esta consideração utilizou-se por busca de uma maior aproximação da realidade e em consideração ao critério de Saint Venant.

Figura 9 – Demonstração do engaste nas duas extremidades da amostra



Fonte: Autor

Destas simulações se busca a retirada de gráficos de tensão em relação a temperatura e o melhor entendimento sobre o comportamento da amostra padrão, para futuras comparações.

3.3.1 Retração térmica com ruptura

Buscando a aplicação do LDEM na sua desenvoltura original, a fratura do modelo, para esta simulação se manteve todas as considerações utilizadas anteriormente, porém adicionado as propriedades de fratura do material, informações sobre esta característica do material retirada de (BRANCO, 1999). Com a adição da deformação crítica de falha do elemento (ϵ_p) e a energia específica de fratura (G_f) torna-se possível simularmos a amostra até o ponto de ruptura.

Propriedade do material aço inox AISI 304:

$$(\epsilon_p) = 520 \frac{\times 10^6}{E}$$

$$(G_f) = 1000 \text{ N/m}$$

Em uma simulação a qual todos os elementos tenham a mesma resistência, e uma distribuição homogênea de tensões, esperamos que a ruptura ocorra em todos os ele-

mentos no mesmo instante, porém esta não é uma situação a qual está de acordo com a realidade.

3.3.2 Retração térmica com ruptura aleatória

Sabendo das características da metodologia proposta na seção (3.3.1) aonde a amostra irá sempre se romper de mesma forma, e esta característica não esta de acordo a realidade. Neste novo método o modelo se mantém igualmente com as características anteriormente citadas, porém algumas propriedades alteradas.

Buscando a aleatoriedade na ruptura do material, o valor da energia de fratura (G_f), se adiciona nas propriedade com uma distribuição aleatória do tipo Weibull, e um coeficiente de variação de 20%. Também considera-se que o comprimento de correlação em todas as direções vale $2L$ do modulo básico.

Com estas características se possibilita a fratura aleatória da amostra, a falha poderá acontecer em qualquer elemento, diferentemente do anterior, onde o colapso de toda malha ocorre no mesmo instante. Acredita-se que devido a característica da simulação, ocorrerá uma menor força, se comparada a ruptura sem aleatoriedade.

3.4 Transferência de calor

No método de simulação se utilizou a amostra padrão primeiramente simulada por características do FEM, posteriormente em características do LDEM e em última etapa por cálculos analíticos, estes últimos dois meios como forma de validação.

Se propôs primeiramente a realização da simulação no Abaqus/standart para o MEF e Abaqus/explicit para o LDEM por um tempo 300000ms, além de um gradiente de temperatura com amplitude de 800°C , considerando-se que o bloco esteve em uma temperatura ambiente de 0°C e uma carga térmica de 800°C foi atribuída no elemento por um coeficiente convectivo homogêneo em uma das faces longitudinais. O coeficiente de convecção utilizado foi de 25 W/m^2 , este indicado em um ensaio de fogo padrão na (EUROCODE, 2002).

Para a realização da simulação envolvendo a transferência de calor foi necessário a adição também de novas propriedades, esta sendo a condutividade térmica (k), dados retirados de (INCROPERA et al., 2008).

Propriedade do material aço inox AISI 304:

$$k=14.9 \frac{W}{mK}$$

3.4.0.1 Transferência de calor FEM Standart

Para fins de futuras comparações de resultados com o LDEM realizou-se simulações da transferência de calor pelo FEM. Para esta etapa se utilizou de uma integração standart vinculada a "heat transfer", sendo esta a forma a qual Abaqus mais se aproxima de uma simulação real de transferência de calor, porém somente disponível no Abaqus/standart e não envolve a dilatação térmica.

Utilizou-se da amostra padrão, a qual simulou-se por um tempo de 300000ms, (este tempo alto torna-se o suficiente para que o calor propague sobre toda o objeto) e um coeficiente convectivo com gradiente térmico de 800°C aplicado a uma de suas extremidades.

3.4.1 Transferência de calor LDEM explicit

Para um estudo o qual adiciona a transferência de calor se faz necessário a mudança de nosso elemento de barra, pois necessitamos que o software calcule também o deslocamento de energia térmica nas barras. Levando em conta nossa amostra padrão criada com um elemento (T3D2) neste novo estudo necessitamos do quinto dígito, chamado de opcional, adicionando uma análise de deslocamento de temperatura aplicada, o novo elemento caracteriza-se por (T3D2T).

Escolheu-se pontos com distâncias de 0mm, 50mm, 100mm e 150mm da aplicação da carga, aonde se retirou dados da temperatura do elemento, dados este que serão utilizados para comparação entre os métodos.

4 RESULTADOS

Com o decorrer da realização deste trabalho pode-se visualizar a notoriedade da aplicação do LDEM no ambiente Abaqus/explicit e ter por ambientação os bons resultados obtidos por ele através das simulações anteriormente realizadas, criando expectativas nos resultados com a proposta de análises da termologia.

Para uma melhor exemplificação dos resultados eles foram divididos em dois grandes setores, o da dilatação térmica, e o da transferência de calor. Em cada um destes buscou-se a realização de estudos que melhor demonstrassem sua particularidades.

4.1 Dilatação Térmica

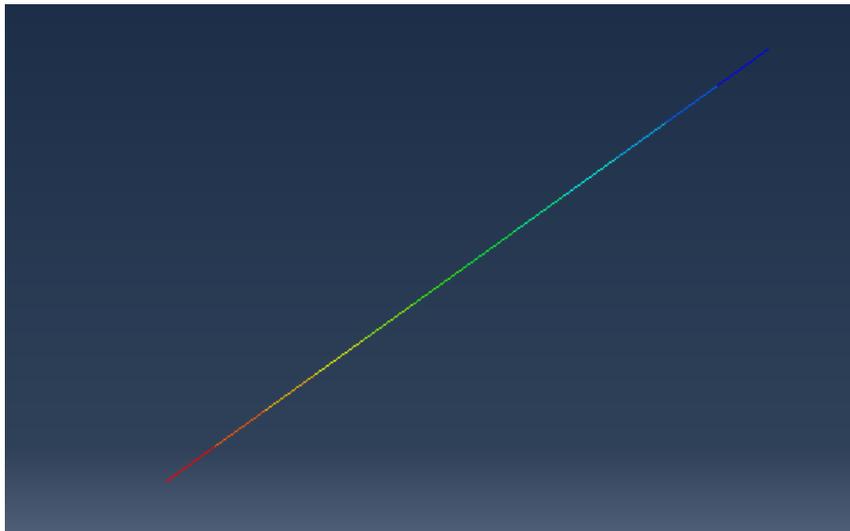
Dilatação térmica é a característica a qual o material tem de se deformar com a variação de temperatura (R.C.HIBBELER, 2009), nesta seção do trabalho buscamos por exemplificar simulações as quais estejam envoltas na dilatação térmica.

4.1.1 Simulação de uma Barra

Tendo em vista que o LDEM trata-se de um representação de um sólido por barras, como proposta inicial buscamos entender a forma com que o Abaqus irá se relacionar com a simulação de uma Barra, similar a do método, na dilatação térmica (o excesso de dilatação térmica resultará na falha do material).

Para esta simulação se criou uma linha com propriedade do aço inox AISI 304, comprimento de 150mm e elemento Truss (T3D2), simulado através de uma integração dinâmica explícita (Dynamic,Explicit). Simulou-se a uma carga térmica de 800°C aplicada de forma homogênea e instantânea, com uma de suas extremidades engastadas.

Figura 10 – Dilatação térmica de uma Barra única

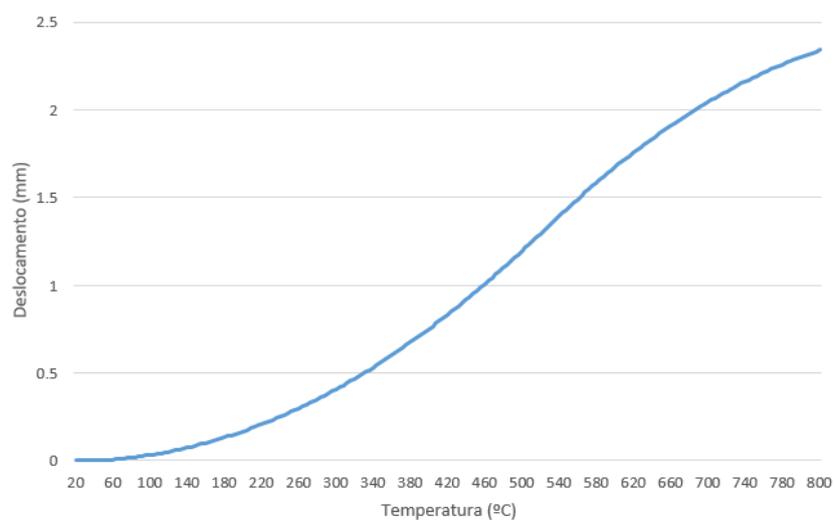


Fonte: Autor

Através deste estudo se determinou uma primeira funcionalidade do método, a simulação ocorreu de forma esperada e similar com a referência teórica. Com um gradiente térmico de 800°C e 150mm de comprimento inicial a barra se dilatou $2,341\text{mm}$.

Pode notar-se através do gráfico (11) o deslocamento em relação a temperatura, e a forma com que a dilatação ocorreu.

Figura 11 – Gráfico deslocamento e temperatura para uma barra única



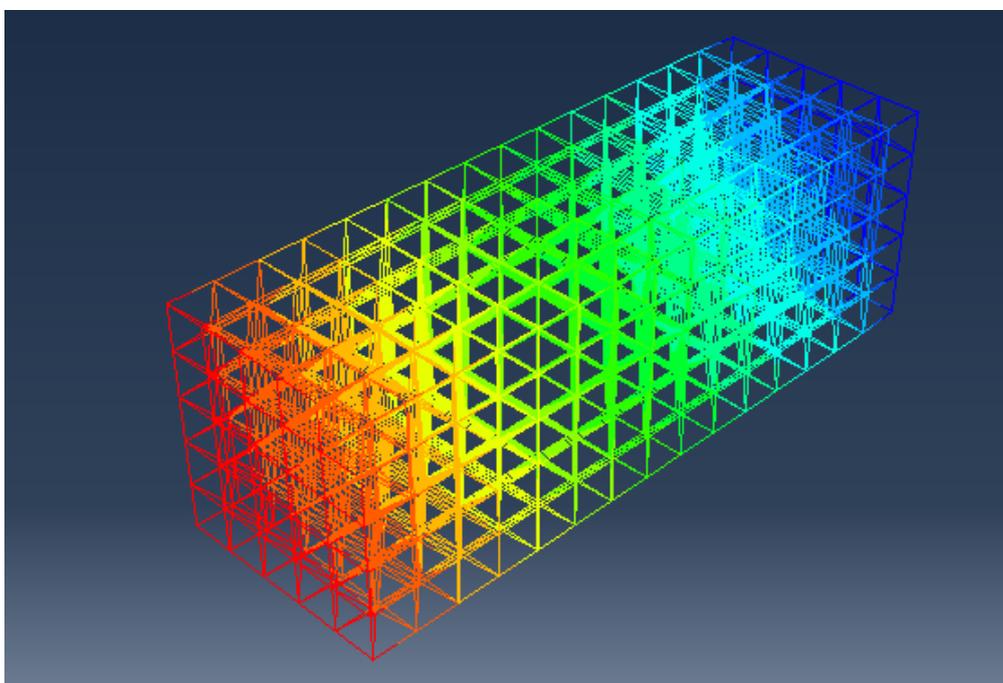
Fonte: Autor

4.1.2 Dilatação térmica em um bloco padrão do LDEM

Busca-se a simulação da amostra padrão do LDEM na dilatação térmica. Neste ponto utilizou-se de uma simulação com uma incrementação Dynamic/explicit e gradiente térmico de 800°C, engastada em uma das extremidades.

Se mediu as dimensões do bloco nos três sentidos de possível dilatação (X,Y,Z), no instante 0 e posterior a aplicação da carga térmica. Estes resultados foram comparados com a teoria analítica e com o FEM, quais resultados se mostram na figura (16).

Figura 12 – Dilatação térmica pelo método do LDEM

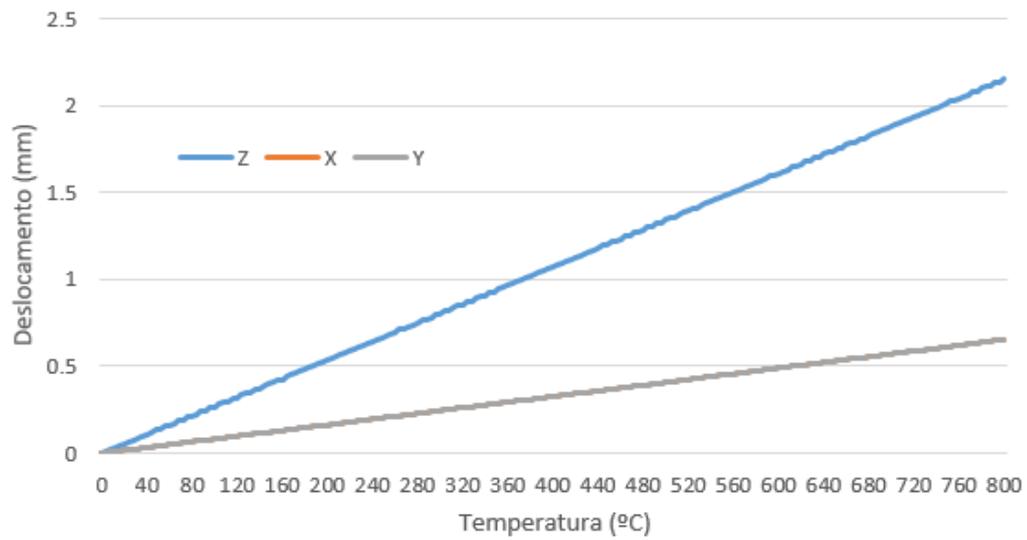


Fonte: Autor

Na Figura (12) pode-se visualizar, através de um um gradiente de cores, a dilatação térmica, bem como a área de engaste de sua extremidade em azul(não houve dilatação).

Em um primeiro momento notou-se a similar dilatação da amostra, levando em conta coordenadas cúbicas, valores de acordo com a revisão bibliográfica e referências analíticas. Pelo gráfico (13) pode-se notar de melhor maneira a forma qual a dilatação ocorreu. Se criou um gráfico de linhas sobre a deformação dos eixos X,Y,Z em relação a temperatura (o deslocamento em X e Y são idênticos).

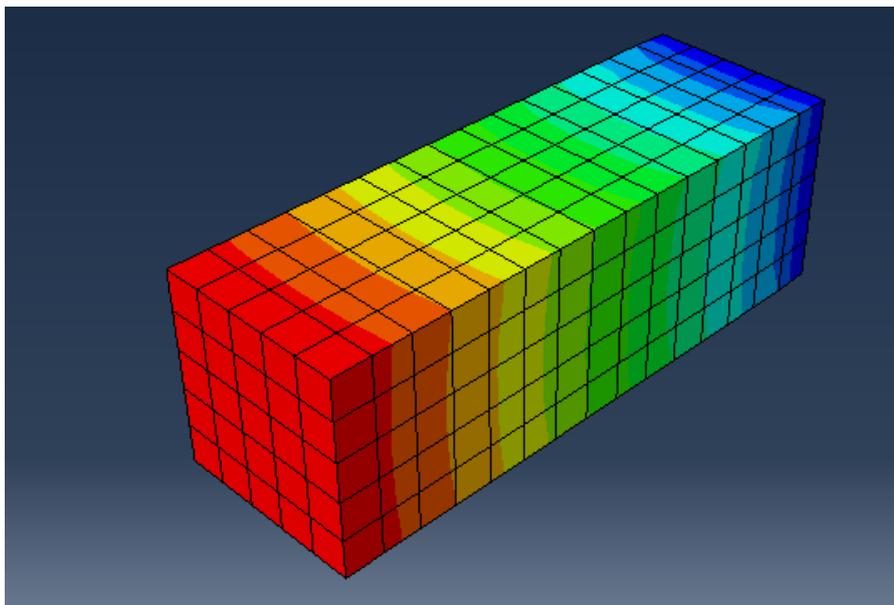
Figura 13 – Gráfico do deslocamento em relação temperatura do LDEM



Fonte: Autor

Em uma simulação do FEM buscou-se dados para validação do método anterior, se manteve de mesmas propriedades, características do material e tamanho dos elementos a um gradiente de 800°C.

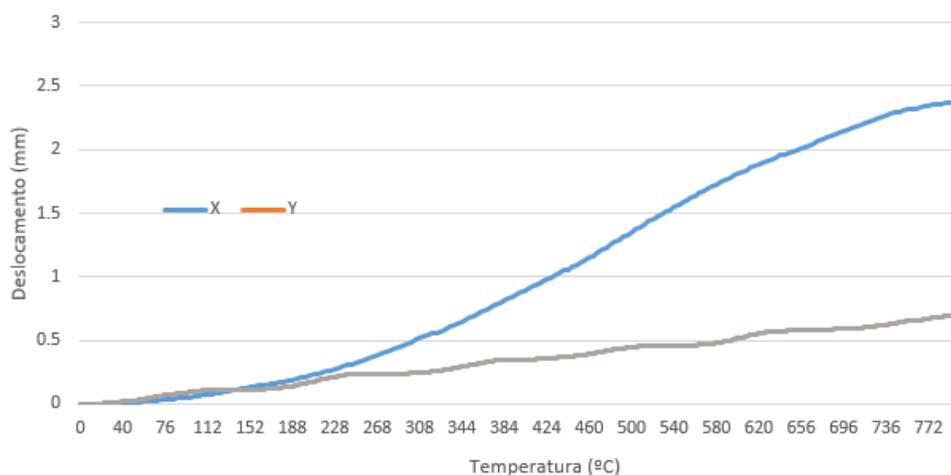
Figura 14 – Dilatação térmica pelo método do FEM



Fonte: Autor

Na Figura (14) pode-se visualizar, através de um um gradiente de cores, a dilatação térmica, bem como a área de engaste de sua extremidade em azul(não houve dilatação). Além de uma análise visual, foi traçado um gráfico de resposta em cada um dos eixos X,Y e Z (o deslocamento em X e Y são idênticos), este demonstrados na figura (15).

Figura 15 – Gráfico do deslocamento em relação temperatura FEM



Fonte: Autor

Figura 16 – Tabela de resultados da dilatação térmica

Valores obtidos na dilatação térmica			
	Final (X)mm	Final (Y)mm	Final (Z)mm
LDEM	152,161	50,684	50,684
FEM	152,385	50,698	50,698
Analítico	152,040	50,680	50,680

Fonte: Autor

Na figura (16) pode ser visualizados os resultados obtidos, de forma simplificada considerou-se como válido a dilatação térmica pelo LDEM, se demonstrou na figura (13) uma resposta mais linear em relação ao FEM (15), estas justificadas devida as características de cada método.

4.1.3 Tensão resultante na dilatação térmica de um bloco

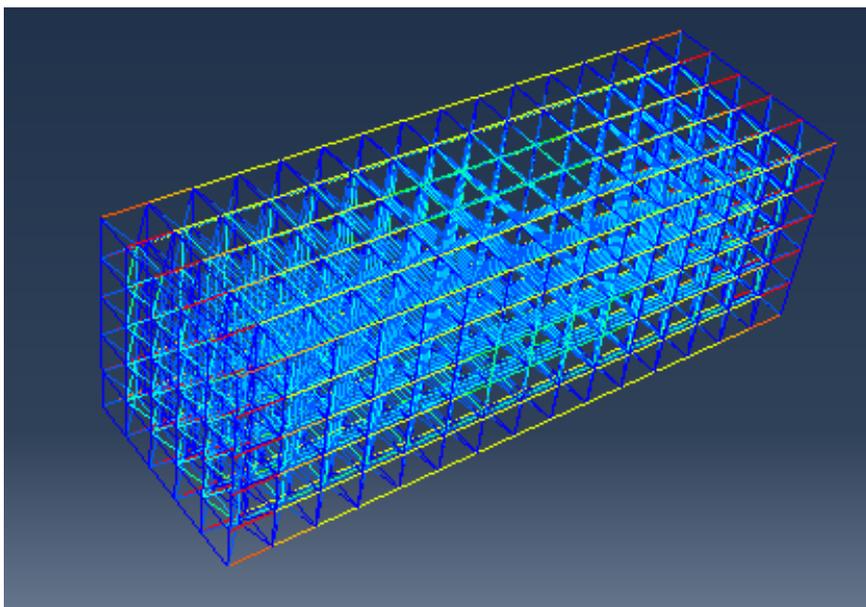
Com a ciência sobre a correta dilatação térmica da amostra, neste ponto buscou-se colocar em validação a tensão térmica resultante através de uma restrição implementada na dilatação térmica.

Com o uso da mesma amostra padrão, e gradiente de temperatura de 800°C, engastou-se as extremidades da amostra e analisou-se os resultados, utilizou-se também de um gradiente de temperatura negativa, esta característica de simulação foi em busca de tensões de tração.

Simulando o LDEM em situações que haja engaste da amostra surgem-se algumas peculiaridades. Tratando-se de um sistemas formado por barras, no momento que se engasta somente a primeira sequencia de nós (a partir deste momento, passamos a chamar de engaste simples), estes irão sofrer de grandes concentradores de tensões nos contornos, fenômeno o qual pode ser visualizado na figura (17), (nota-se que as barras estão com um carregamento desigual).

Este fenômeno pode ser explicado pelo principio de Saint Venant, o qual demonstra que um sistema de forças externas, em equilíbrio, qual age sobre uma proporção pequena da amostra em relação ao todo, produz tensões elevadas apenas nas imediações da região de aplicação dessas forças (R.C.HIBBELER, 2009).

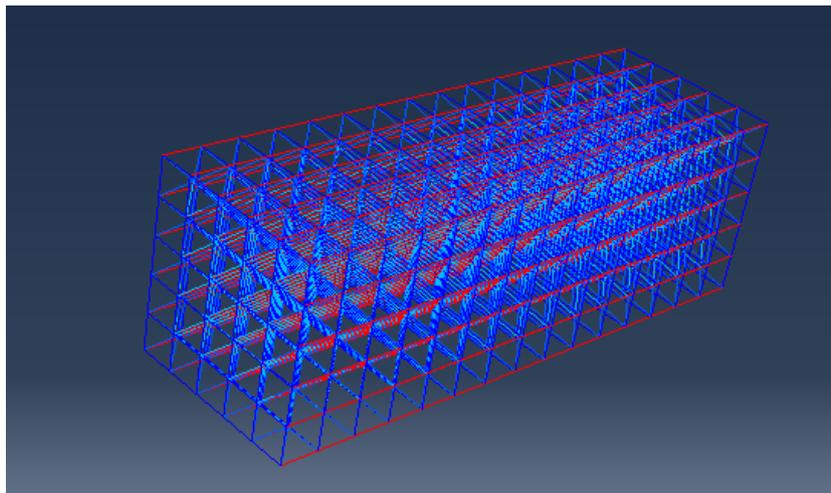
Figura 17 – Visualização da distribuição de tensões através de engaste simples



Fonte: Autor

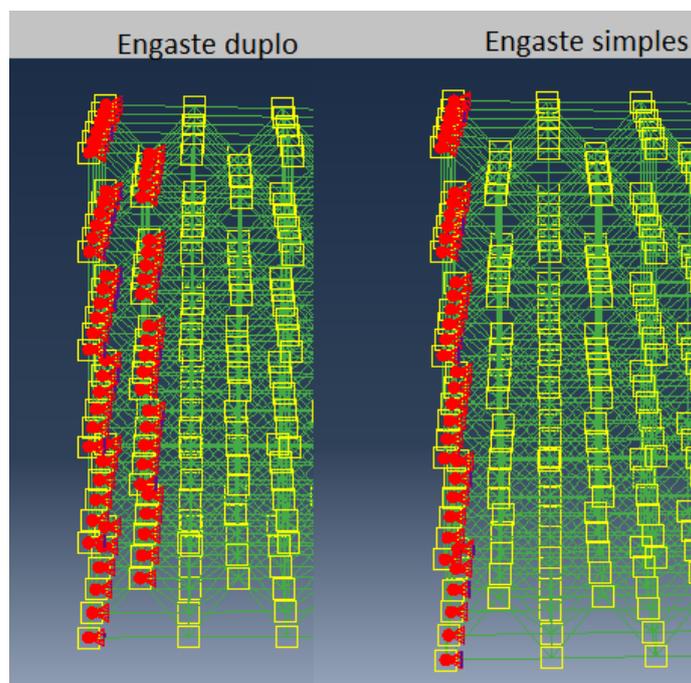
No segundo modelo de engaste (mais recomendado) se engasta a primeira e segunda linha de nós do elemento (partir deste momento, passamos a chamar de engaste duplo), com esta forma de engaste pode-se notar a melhor distribuições de tensões no elemento, conforme exposto na figura(18).

Figura 18 – Visualização da distribuição de tensões através de engaste duplo



Fonte: Autor

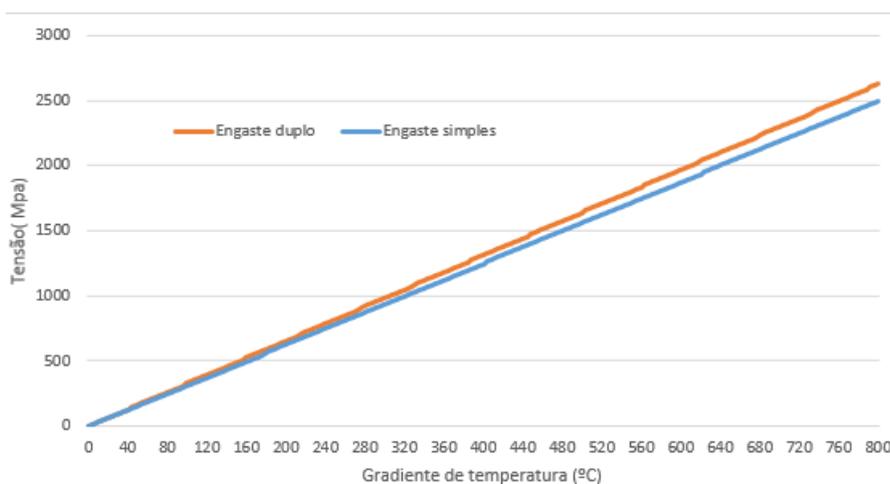
Figura 19 – Visualização dos métodos de engaste



Fonte: Autor

Se retirou destas simulações as curvas de tensões por temperatura, conforme pode ser visualizado na figura (20), estes dados retirados de um elemento do ponto central da estrutura. Pode-se notar no engaste simples um menor nível de tensão no centro, visto que as barras das extremidades estão sofrendo mais com os esforços.

Figura 20 – Visualização do gráfico tensão em relação temperatura e forma de engaste



Fonte: Autor

Levando em consideração a teoria e cálculos analíticos (Lei de Hooke e dilatação térmica), pode-se obter a tensão resultante deste gradiente térmico aplicado no bloco, demonstra-se na Eq(8)

$$\sigma = E * \alpha \Delta T \quad (8)$$

$$\sigma = 2611.2 \text{MPa}$$

Valor este teórico, comprovando a melhor exatidão do engaste duplo, o qual valor da simulação resultou em 2624.81MPa.

4.1.4 Ruptura do bloco padrão pela tensão térmica

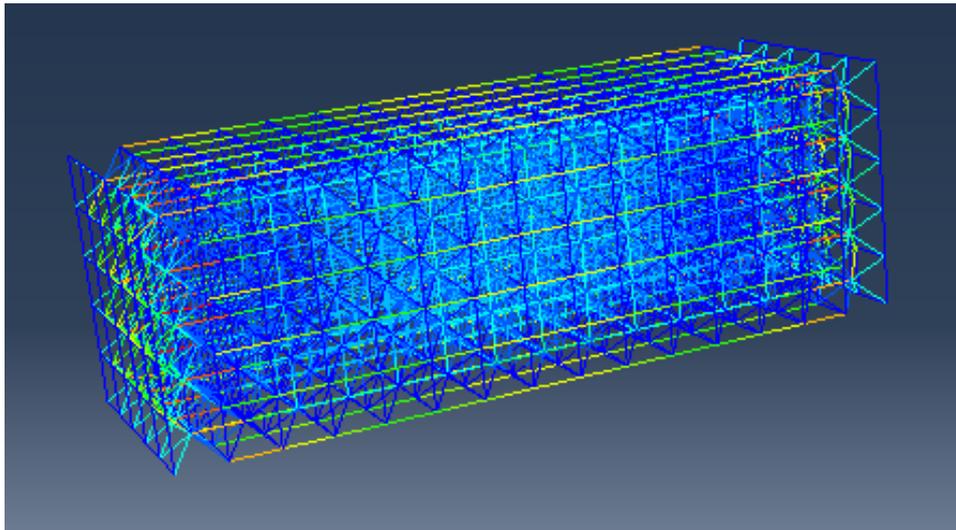
Já se compreendendo a forma a qual a tensão atua na amostra, buscamos então anexarmos características de ruptura do material no experimento. O engaste e a adição de temperatura foi realizado da mesma forma com que na simulação anterior (4.1.3).

Engastou-se as duas extremidades da amostra e adicionou-se uma carga térmica de resfriamento, em busca de tensões de tração. Nosso método de estudos, o LDEM comporta-se de melhor forma perante a tração.

Em um método qual se busca a ruptura de um material devemos adicionar em nossos métodos os coeficiente de Brittle Cracking (estes já dentro dos padrões do LDEM), e demonstrados nas propriedades padrão. Buscou-se novamente através da simulação as tensões resultantes da dilatação térmica, porém em particularidade deste estudo se visualizou a forma com que a ruptura aconteceu, bem como as tensões quais resultaram nesta catástrofe.

Primeiramente na figura (21) pode-se notar uma simulação a qual levou a ruptura do material, onde o mesmo teve uma forma de engaste simples e por característica, rompeu somente as barras horizontais das extremidades.

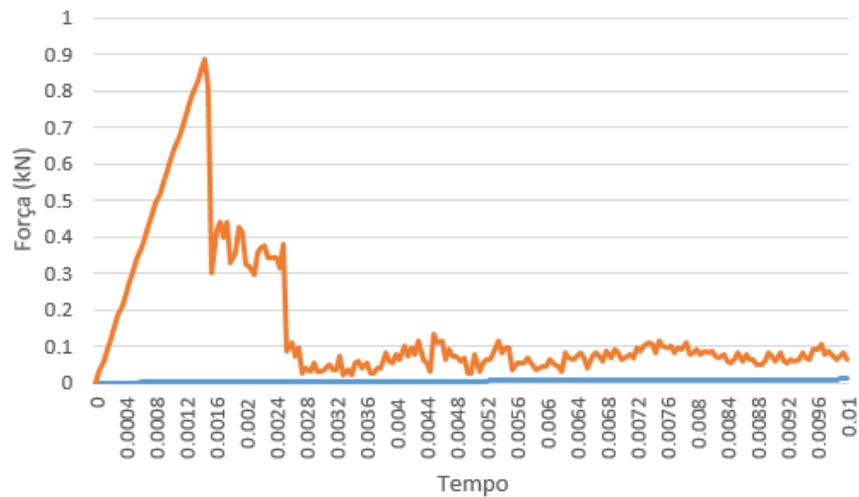
Figura 21 – Demonstração da ruptura por engaste simples



Fonte: Autor

Se registrou também no gráfico (22) a resposta a qual as forças atuaram neste elemento. Pode-se exemplificar, que a força representante para nosso estudo será a máxima do gráfico (tempo:0,0012), visto que após este instante o modelo perde suas características originais.

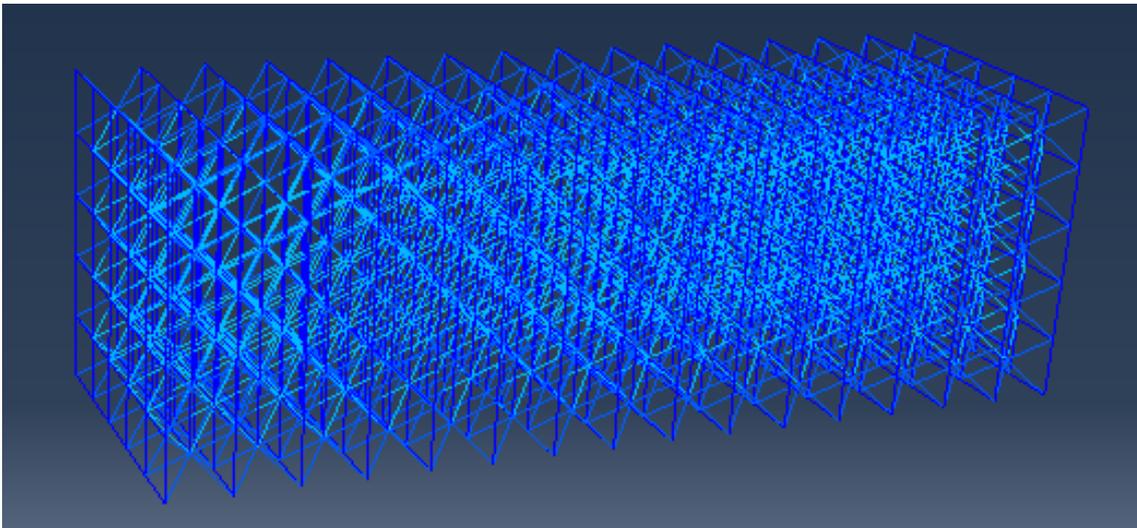
Figura 22 – Gráfico das forças resultantes no engaste simples



Fonte: Autor

Em um segundo estudo da ruptura do material, simulou-se um engaste duplo. Na figura (23) pode-se visualizar a forma com que ocorreu a ruptura, tendo uma distribuição homogênea de tensões, todas as barras horizontais se romperam no mesmo instante.

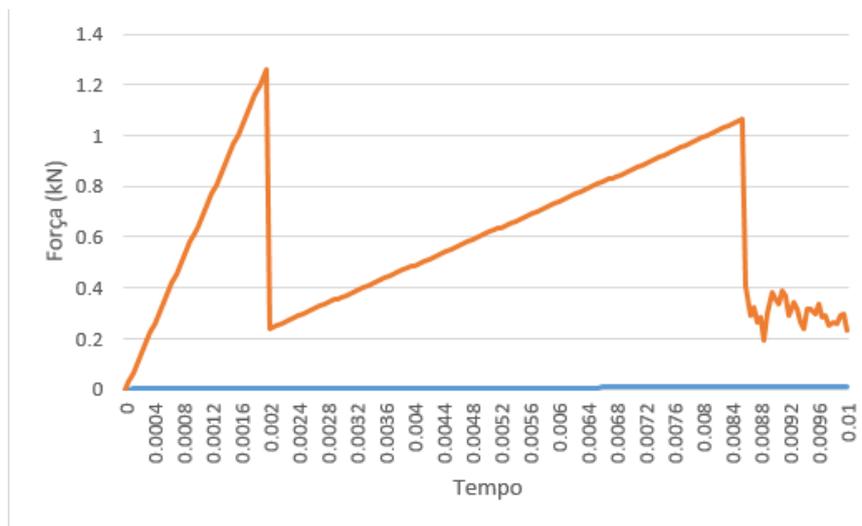
Figura 23 – Demonstração da ruptura por engaste duplo



Fonte: Autor

Este segundo modelo de ruptura se aproxima de melhor forma da realidade, as barras sofrem de uma força homogênea e seu colapso aconteceu em um mesmo instante. Na figura (24) pode-se visualizar o gráfico das forças resultantes no elemento, se mostrou um gráfico com respostas mais homogêneas e esbeltas. Pode-se exemplificar, que a força representante para nosso estudo será a máxima do gráfico (tempo:0,0016), visto que após este instante o modelo perde suas características originais.

Figura 24 – Gráfico das forças resultantes no engaste duplo



Fonte: Autor

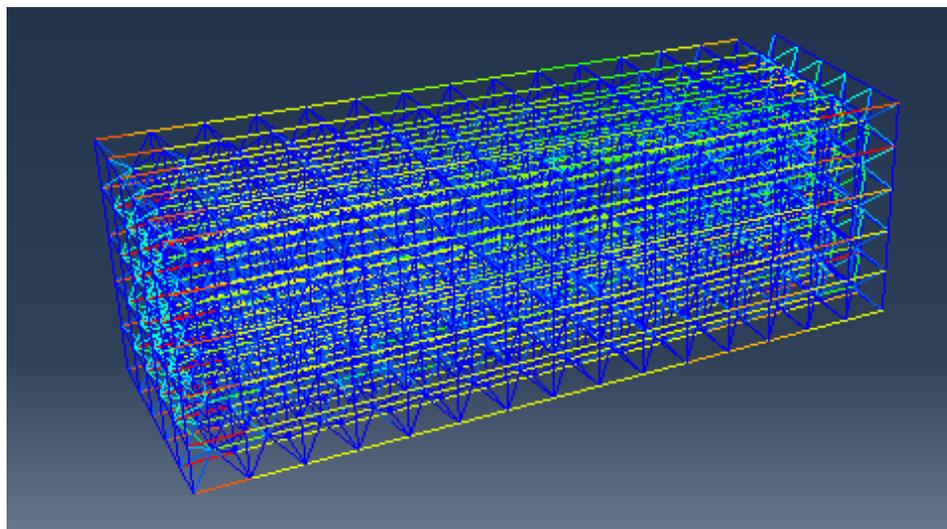
4.1.4.1 Característica de Aleatoriedade

Tratando-se de um sólido real, uma homogeneidade absoluta em todo o elemento é algo impossível. Desta forma a ruptura no material entra em critérios de aleatoriedade (o material irá se romper em seu ponto mais fraco), através da metodologia do LDEM, como citado no capítulo (2.1.6) estes critérios são adicionados a simulação, em busca de uma maior aproximação da realidade.

Utilizou-se do mesmo bloco padrão, utilizado nas simulações anteriores, no qual manteve-se o engaste nas duas extremidade e um gradiente térmico negativo de 800°C, os valores deste estudo são comparados com os obtidos do capítulo (4.1.4).

A primeira análise se deu pela simulação de ruptura com engaste simples juntamente com critério de aleatoriedade, demonstrado na figura (25)

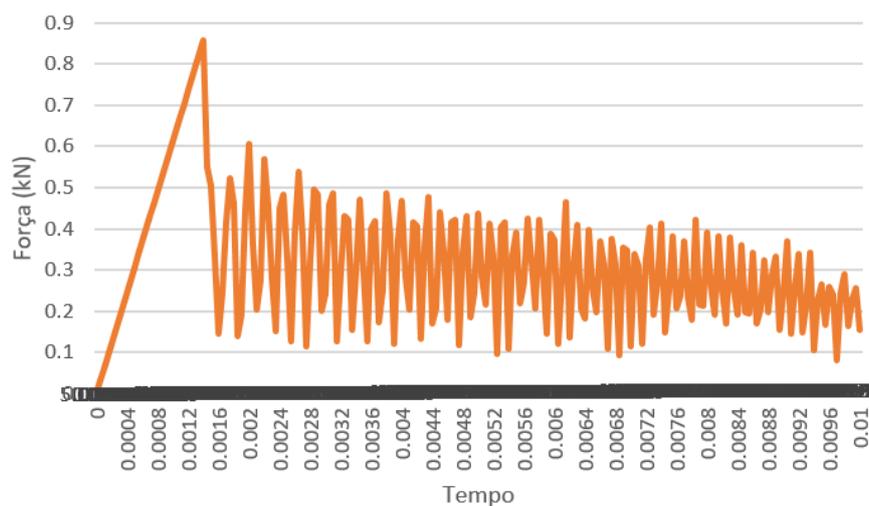
Figura 25 – Demonstração da ruptura por engaste simples vinculado com critério de aleatoriedade



Fonte: Autor

Nota-se que mesmo com a vinculação do critério de aleatoriedade a ruptura aconteceu nos concentradores de tensão. A figura (26) demonstra o gráfico da força resultante da simulação. Pode-se exemplificar, que a força representante para nosso estudo será a máxima do gráfico (tempo:0,0012), visto que após este instante o modelo perde suas característica originais.

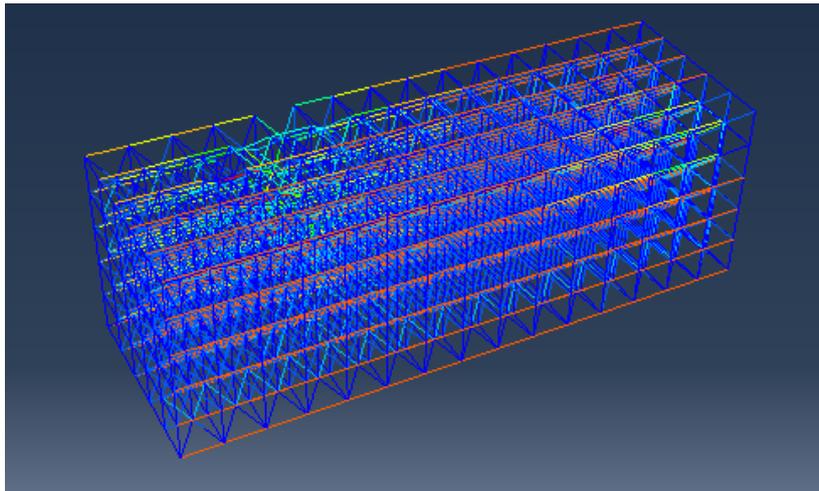
Figura 26 – Gráfico das forças resultantes no engaste simples, vinculado ao critério de aleatoriedade



Fonte: Autor

Como forma de segunda simulação do critério de aleatoriedade, utilizou-se do mesmo bloco padrão, com valores já conhecidos e engaste duplo, em suas duas extremidades e gradiente térmico negativo de 800°C. A figura (27) demonstra a forma com que a ruptura ocorreu.

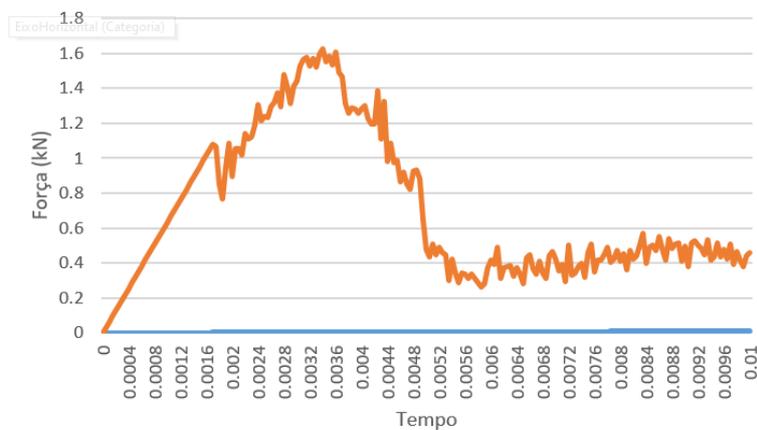
Figura 27 – Demonstração da ruptura por engaste duplo, vinculado com critério de aleatoriedade



Fonte: Autor

A figura (28) demonstra o gráfico sobre a força resultante do elemento. Pode-se exemplificar, que a força representante para nosso estudo será a máxima do gráfico (tempo:0,0016), visto que após este instante o modelo perde suas características originais.

Figura 28 – Gráfico das forças resultantes no engaste duplo vinculado ao critério de aleatoriedade



Fonte: Autor

4.2 Transferência de calor

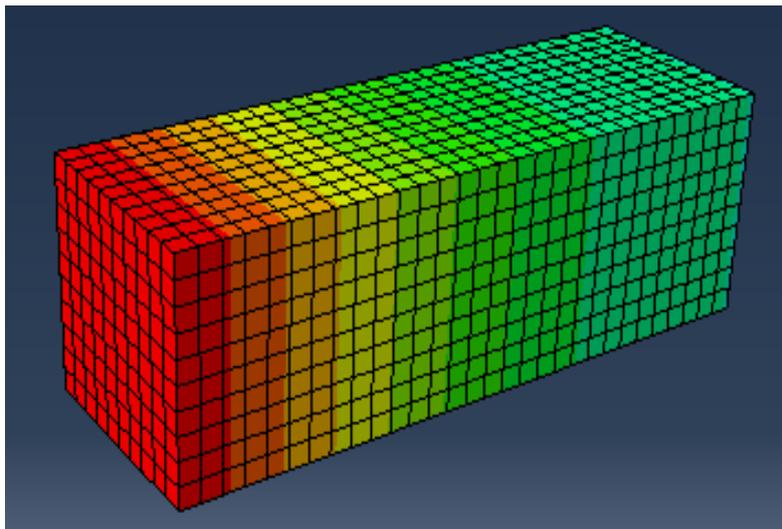
Em busca de um maior entendimento sobre a metodologia do Abaqus na transferência de calor, buscou-se inicialmente pela realização de simulações de carácter simples e comprovatório. Neste capítulo será realizado a simulação de nosso bloco padrão através de FEM e LDEM, todos estes em busca da comparação dos métodos.

4.2.1 Transferência de calor na amostra padrão através do FEM

Buscou-se a realização de simulações a quais envolvam a transferência de calor em nosso bloco padrão. A simulação da transferência de calor ocorreu utilizando-se do FEM, em validação de futuros estudos empregando o LDEM, e como forma de conhecimento do método, a simulação ocorreu com as características da integração standart.

Utilizou-se do FEM juntamente com uma integração standart de transferência de calor, bem como um elemento cúbico vinculado ao deslocamento de temperatura. Simulou-se por um período de $3E^5$, adicionando temperatura por um coeficiente convectivo de amplitude 800°C em uma das faces laterais, onde se registou a temperatura do elemento em distâncias de 50mm, 100mm e 150mm e mostrou na figura (30).

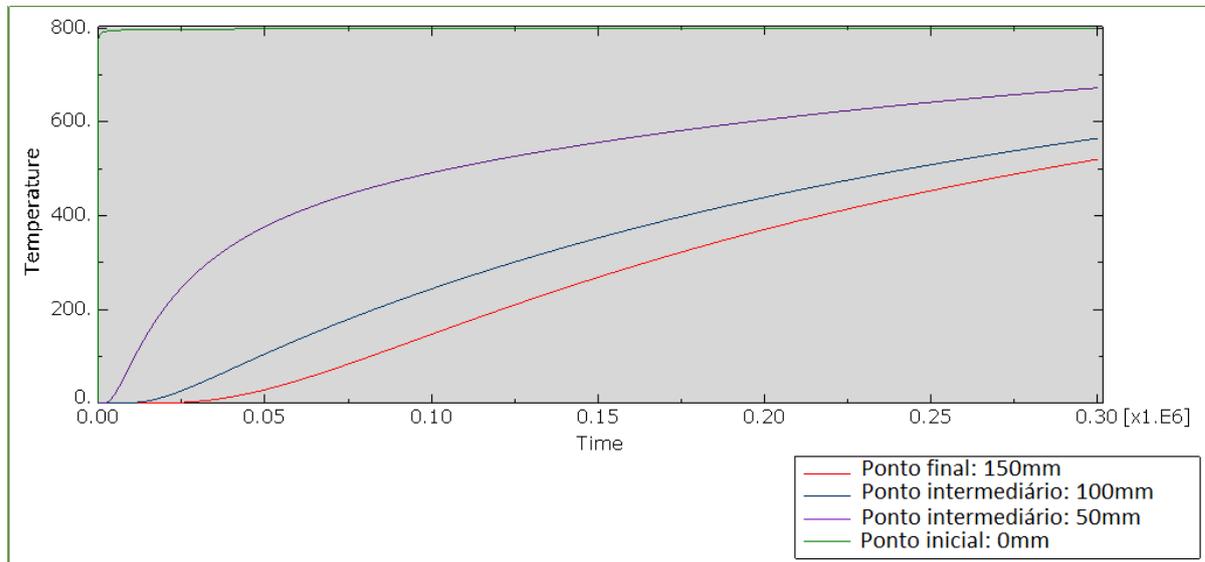
Figura 29 – Transferência de calor no Bloco padrão, FEM standart



Fonte: Autor

Apresenta-se na figura (30) o crescimento da temperatura aliado ao tempo, nos pontos padrões anteriormente definidos.

Figura 30 – Gráfico da transferência de calor no Bloco padrão, FEM standart



Fonte: Autor

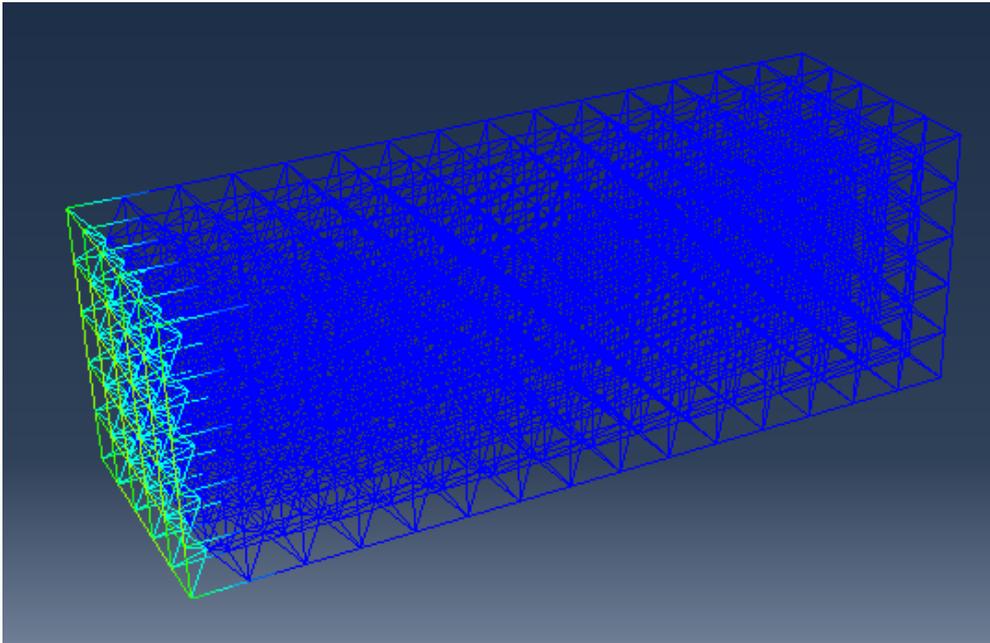
4.2.2 Transferência de calor no LDEM Abaqus/explicit

Tendo em vista a metodologia e característica a qual o LDEM foi criado, se deu por necessário realizar modificações. Para simulações que desejam envolver a transferência de calor é necessário a modificação do tipo de elemento, devemos então passar de um elemento originalmente utilizado pelo método de T3D2 para T3D2T.

Esta modificação não se dá possível nos objetivos aos quais o LDEM foi designado (entender de melhor forma a ruptura de um material), tendo em vista que a simulação com o acoplamento de deslocamento de energia térmica no elemento Truss é possível somente em uma simulação do Abaqus/Standart. Não é possível prever a ruptura do material envolvendo a transferência de calor por nossa metodologia.

Na figura (31) mostra a forma com que a simulação comporta-se no momento que se adiciona uma transferência de calor interna no elemento T3D2, não ocorre a transferência de energia entre elementos.

Figura 31 – Tentativa de transferência de calor no LDEM com elemento T3D2



Fonte: Autor

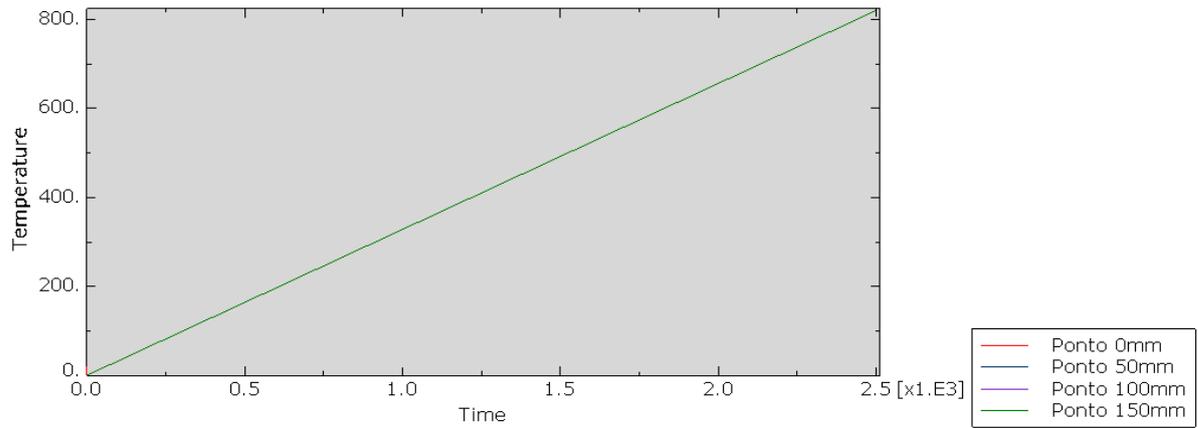
4.2.3 Transferência de Calor no LDEM Abaqus/standart

Com o fracasso da metodologia no capítulo anterior, buscamos de qualquer forma prever qual será a transferência de calor na estrutura de barras do LDEM, usando uma integração standart.

Simulou-se a mesma amostra padrão dos exercícios anteriores, desta vez se propôs a simulação por uma integração no Abaqus/standart de "Heat Transfer" e gradiente térmico de 800°C convectivo em uma das faces do modelo.

Nesta simulação com o Abaqus/standart acreditou-se ser possível a transferência de calor, porém em estudos se notou uma estranha característica do LDEM, conforme demonstra a o gráfico da figura (32). O crescimento de temperatura nas distâncias pré-determinadas de 50mm, 100mm e 150mm aconteceram de forma totalmente linear e instantânea.

Figura 32 – Transferência de calor no Bloco padrão FEM standart



Fonte: Autor

Esta característica mostrada na figura (32) demonstra que a metodologia falhou mais uma vez. A amostra comportou-se sem nenhuma resistência a transferência de calor, em diferença dos resultados que eram esperados e obtidos no capítulo (4.2.1) e figura (30)

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente capítulo resume-se as principais conclusões as quais foram possíveis se obter neste estudo, a partir dos objetivos propostos. Por finalização marcam-se possíveis novos estudos os quais ficaram em aberto ou foram detectados neste trabalho.

5.1 Conclusões

Neste trabalho apresentou-se a utilização do LDEM no ambiente Abaqus, em aplicações juntamente com cargas térmicas e buscou-se entender sua aplicabilidade.

Refutou-se as hipóteses iniciais, as quais previam o funcionamento do LDEM na transferência de calor, se mostrou que o software limita a execução da simulação de um elemento "truss" acoplado a transferência de energia no Abaqus/explicit. Porém pode-se demonstrar certa hipótese da correta dilatação térmica, como demonstrado no capítulo (2.2.1)

Através do transcurso deste estudo pode-se notar inicialmente uma falsa perspectiva de correta funcionalidade do método, porém por conta de uma limitação do software utilizado em nossa metodologia o estudo se limitou em uma simples análise da dilatação térmica com carga homogênea. Por conta da não possibilidade de se simular através do Abaqus/explicit o elemento T3D2T foi limitada a simulação da ruptura do material através de uma carga térmica homogênea, porém foi possível se obter diferentes simulações e contribuições desta abordagem. Confirmou-se na retirada de uma grande contribuição por conta deste estudo:

- Tratando-se o LDEM de um método aplicado o qual as características do material sofrem de grandes alterações, atribuindo sua massa nas extremidades e alterações na estrutura para barras, obter uma correta dilatação térmica linear em nossa amostra padrão representa uma grande contribuição para o estudo, ter-se vinculado estes dados a tensão e ruptura térmica são resultados que trazem esperança ao método, estes resultados demonstrados no capítulo (2.2.1)

Em uma situação hipotética, de uma carga térmica totalmente homogênea e instantânea torna-se possível a simulação de ruptura da amostra.

5.2 Trabalhos futuros

No decorrer deste trabalho pode-se notar a carência de alguns estudos, os quais abrangem nossos objetivos, como forma de incentivo a pesquisa e continuação desta, cita-se alguns:

- Entende-se que é interessante uma análise com diferentes materiais, bem como uma análise com diferentes tamanhos de elementos. Desta forma pode-se traçar de melhor forma o comportamento e precisão do método.
- A mudança e adequação da metodologia com normas e leis existentes sobre incêndios, desta forma constituirá-se um trabalho sobre o entendimento do colapso de estrutura por incêndios.
- A mudança do software ou então forma de simulação a um ponto que seja possível acoplar o deslocamento de temperatura com elementos de treliça, a limitação que impossibilitou a validação total de nossas hipóteses e foi discriminada em nossos resultados, possivelmente não será um impeditivo com a utilização de outra metodologia.
- A possível aplicação da geometria padrão e propriedades em uma análise por códigos computacionais, o DEM se iniciou em análises do Fortran, e nesta metodologia não se localiza dificuldade em relação a terminologia.

Finalmente a proposição de futuras pesquisas é algo amplo, na qual podemos criar a expectativa de novos estudos, bem como o prosseguimento sobre este estudo. Pode também ocorrer a adição de maiores variáveis, superfícies de contato, ou resistências térmicas.

REFERÊNCIAS

- ABSI, E. Théorie des equivalences-determination de quelques éléments types. **institut Technique Du Balument el des Travau Publics**, 281, p. 83–86, 1971.
- BEER, F. .; JOHNSTON, J. E. R. **Resistência dos materiais 3ª edição**. [S.l.]: Pearson, 1992.
- BOLINA, F. e. a. Análise numérico-experimental de paredes de alvenaria de bloco cerâmico com diferentes espessuras em altas temperaturas. **ALCONPAT**, 10, 2020.
- BRANCO, C. M. **FADIGA DE ESTRUTURAS SOLDADAS**. [S.l.]: Fundação calouste gulbenkian, 1999.
- DUÓ, D. **Análise experimental e numérica do ensaio de compressão diametral sob diferentes configurações**. Dissertação (Mestrado Acadêmico em Engenharia) — Universidade Federal do Pampa, Alegrete, Brasil, 2021.
- EUROCODE. **Actions on structures – Part 1-2: General actions – Actions on structures exposed to fire**. [S.l.: s.n.], 2002.
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKE, J. **Gravitação ondas e termodinamica vol:2 10ª edição**. [S.l.]: LTC, 2016.
- HILLERBORG, A. **A Model for Fracture Analysis**. [S.l.]: Cod LUTVDG/TV BM-3005/1-8, 1978.
- HRENNIKOF, A. solution of problems of elasticity by the framework method. **Journal of Applied Mechanics**, 12, p. 169–175, 1941.
- INCROPERA, F. P. et al. **Fundamentos de transferência de calor e massa - 6ª Edição**. [S.l.]: LTC, 2008.
- KHAN N. IQBAL, H. A. S. A. J.; TARAR, W. A. Development of material model for assessment of brittle cracking behavior of plexiglas. **14th International Symposium on Advanced Materials**, 2016.
- KOSTESKI, L. **Aplicaciones del Método de Elementos Discretos en Mecánica de Fractura Estática y Dinámica**. Dissertação (Tese (Mestre) Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil) — Facultad de Ingeniería Universidad Nacional del Nordeste, Resistencia, Argentina, 2008.
- KOSTESKI, L. **Aplicação do Método dos Elementos Discretos Formado por Barras no Estudo do Colapso de Estruturas**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2012.
- KOSTESKI L.E. PINTO.O. ITURRIOZ, I. Combinação entre o metodo dos elementos discretos compostos por barras e o metodo dos elementos finitos no ambiente abaqus. **Asociación Argentina de Mecánica Computacional – Mecánica Computacional**, 29, p. 5259–5283, 2010.

KUPFER H.B. E GERSTLE, K. Behavior of concrete under biaxial stresses. **Journal of the Engineering Mechanics Division, American Society of Civil Engineers**, 99, p. 653–670, 1973.

MALISKA, C. R. **Transferência de Calor e Mecânica Dos Fluidos Computacional - 2ª Edição**. [S.l.]: LTC, 2012.

NAYFEH A.H.AND HEFZY, M. Continuum modeling of three-dimensional truss-like space structures. **AIAA Journal**, 16, p. 779–787, 1978.

P.A, K.; D.R.J, S. E. O. Discrete fracture in quasi-brittle materials. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, 193, p. 3035–3056, 2004.

R.C.HIBBELER. **Resistência dos materiais 7ª edição**. [S.l.]: Pearson, 2009.

RIERA J.D.; ITURRIOZ, I. Discrete element dynamic-response of elastoplastic shells subjected to impulsive. **Numerical Methods in Engineering, Wiley Sons**, 11, p. 417–426, 1995.

RUSSO S.; SCIARRETTA, F. Experimental and theoretical investigation on masonry after high temperature exposure. **Experimental Mechanics**, 52, p. 341–358, 2012.

SEITO A. I.; GILL, A. A. P. F. D. O. R. S. S. B. D. C. U. S. V. P. **Segurança contra incêndio no Brasil**. [S.l.]: Projeto Editora, 2008.

SIMULIA. **Abaqus Analysis User's Manual**. <<http://130.149.89.49:2080/v6.10ef/books/usb/default.htm?startat=pt06ch26s02alm06.html>>. Acesso em: 7 Dezembro. 2022.

SIMULIA. **ABAQUS UNIFIED FEA COMPLETE SOLUTIONS FOR REALISTIC SIMULATION**. <<https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/abaqus/>>. Acesso em: 17 Julho. 2022.

ÇENGEL, T. A.; CIMBALA, J. M. **Mecânica dos fluidos - 3ª Edição**. [S.l.]: Grupo A, 2015.