

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

UMA COMPARAÇÃO DO COMPORTAMENTO ESTÁTICO E DINÂMICO DE
ATENUADOR DE IMPACTO E DIFERENTES MODELOS DE MATERIAL VIA
MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

por

Gabriel Costa Rodrigues

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, outubro de 2022

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO

Rodrigues, Gabriel Costa
UMA COMPARAÇÃO DO COMPORTAMENTO ESTÁTICO E DINÂMICO
DE ATENUADOR DE IMPACTO E DIFERENTES MODELOS DE
MATERIAL VIA MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS / Gabriel
Costa Rodrigues. -- 2022.

28 f.

Orientador: Rodrigo Rossi.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto
Alegre, BR-RS, 2022.

1. Atenuador de Impacto. 2. Análise explícita. 3.
Método dos elementos finitos. I. Rossi, Rodrigo,
orient. II. Título.

Gabriel Costa Rodrigues

UMA COMPARAÇÃO DO COMPORTAMENTO ESTÁTICO E DINÂMICO DE
ATENUADOR DE IMPACTO E DIFERENTES MODELOS DE MATERIAL VIA
MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Cirilo Seppi Bresolin
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de concentração: Mecânica dos Sólidos

Orientador: Prof. Rodrigo Rossi

Comissão de Avaliação:

Prof. Felipe Tempel Stumpf

Prof. Jakson Manfredini Vassoler

Prof. Rodrigo Rossi

Porto Alegre, outubro de 2022

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família pelo apoio em toda a minha jornada, e por sempre me ajudarem nos momentos mais difíceis.

Agradeço aos meus colegas que trabalharam comigo na equipe e-Power UFRGS, por tudo que fizemos, aprendemos e construímos juntos.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO – 2022

UMA COMPARAÇÃO DO COMPORTAMENTO ESTÁTICO E DINÂMICO
DE ATENUADOR DE IMPACTO E DIFERENTES MODELOS DE
MATERIAL VIA MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

Gabriel Costa Rodrigues
gcrmestre@gmail.com

Resumo. Os atenuadores de impacto para a competição Fórmula SAE fabricados pelas equipes devem seguir algumas regras e podem ser avaliados em ensaio dinâmico ou quase estático. No entanto, não há indicações por parte do regulamento da competição sobre diferenças possíveis nos resultados de um tipo de teste para o outro. O objetivo deste trabalho é, a partir de um conceito de atenuador, proposto para uso pela equipe e-Power UFRGS, estimar-se mudanças no comportamento entre o ensaio dinâmico e o quase estático da peça. O método dos elementos finitos é empregado usando análise explícita para simular cada ensaio com quatro modelos de material. Os resultados indicam, para três dos modelos de materiais, mais de 10% de diferença na distância necessária para absorver e dissipar a energia de impacto. Conclui-se que há diferenças relevantes entre ensaio dinâmico e quase estático, com mudanças no desempenho e no comportamento da deformação ao longo do processo.

Palavras-chave: atenuador de impacto; método de elementos finitos; análise explícita; Fórmula SAE.

A comparison of the static and dynamic behavior of an impact attenuator and different material models via finite elements method

Abstract. The impact attenuators for the Formula SAE competition manufactured by the teams must follow some rules and can be evaluated in dynamic or quasi-static testing. However, there is no indication by the rules about the possible differences of one type of testing to another. The objective of this paper is, with a concept of attenuator, proposed for use by the e-Power UFRGS team, to estimate changes in behavior between the dynamic and quasi-static testing of the part. The finite elements method is employed, using explicit analysis to simulate each testing with four material models. The results appoint, for three of the four material models, more than 10% difference in the distance necessary to absorb and dissipate the impact energy. It is concluded that there are relevant differences between dynamic and quasi-static testing, with changes in performance and behavior of deformation along the process.

Keywords: impact attenuator; finite elements method; explicit analysis; Formula SAE.

NOMENCLATURA

Símbolos

A	Parâmetro do modelo Johnson-Cook	[MPa]
B	Parâmetro do modelo Johnson-Cook	[MPa]
N	Parâmetro do modelo Johnson-Cook	[]
C	Parâmetro do modelo Johnson-Cook	[]
D1	Parâmetro de dano do critério de Johnson-Cook	[]
D2	Parâmetro de dano do critério de Johnson-Cook	[]
D3	Parâmetro de dano do critério de Johnson-Cook	[]
D4	Parâmetro de dano do critério de Johnson-Cook	[]
D5	Parâmetro de dano do critério de Johnson-Cook	[]
p	Tensão hidrostática	[MPa]
q	Tensão equivalente de von Mises	[MPa]
G _f	Energia de fratura	[N/mm]
\bar{u}_f^{pl}	Deslocamento plástico equivalente de fratura	[mm]
p _c	Pressão de contato	[MPa]
E _{total}	Energia total	[J]
E _I	Energia interna	[J]
E _V	Energia dissipada por viscosidade	[J]
E _{FD}	Energia dissipada por fricção	[J]
E _{KE}	Energia cinética	[J]
E _W	Trabalho externo	[J]
E _{PW}	Trabalho externo de penalizações de contato	[J]
E _{AE}	Energia de deformação artificial	[J]
E _{PD}	Energia dissipada por deformação plástica	[J]
E _{SE}	Energia de deformação elástica	[J]
E _{DMD}	Energia dissipada por dano	[J]

Símbolos gregos

$\dot{\epsilon}_0$	Taxa de deformação de referência	[s ⁻¹]
$\bar{\epsilon}^{pl}$	Deformação plástica equivalente de von Mises	[]
$\bar{\epsilon}_D^{pl}$	Deformação plástica equivalente de von Mises de início de dano	[]
$\dot{\bar{\epsilon}}^{pl}$	Taxa de deformação plástica equivalente	[s ⁻¹]
$\hat{\theta}^m$	Temperatura não-dimensional	[]

$\bar{\sigma}$	Tensão de escoamento	[MPa]
σ_{y0}	Tensão de escoamento no início do dano	[MPa]
τ_{crit}	Tensão de cisalhamento crítica de contato	[MPa]
μ	coeficiente de atrito	[]

Abreviaturas e acrônimos

ED	Ensaio dinâmico
EQE	Ensaio quase estático
MJC	Modelo Johnson-Cook
AI	Atenuador de impacto
MB	Modelo Bilinear

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	2
2.1 Análise via método dos elementos finitos	2
2.1.1 Análise estática, análise dinâmica e métodos implícitos e explícitos	3
2.1.2 Elementos de casca e elementos rígidos	3
2.1.3 <i>Mass Scaling</i>	3
2.2 Modelagem do material	4
2.2.1 Modelos de deformação plástica	4
2.2.2 Modelo de dano	4
2.3 Contatos	5
2.4 Balanço energético	6
3. METODOLOGIA	6
3.1 Geometria do problema	6
3.2 Modelo de material	6
3.3 Tipo de análise usado	6
3.4 Configurações dos ensaios	7
3.5 Malha, simetria e contato	7
3.6 Escala de massa para o caso quase estático	8
3.7 Dados analisados de cada ensaio	8
4. RESULTADOS	8
4.1 Convergência de malha	8
4.2 Escolha de fator de escala de massa para o caso EQE	9
4.3 Resultados das simulações	10
4.4 Discussão	14
5. CONCLUSÃO	15
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	16
APÊNDICE	17
ANEXO	20

1. INTRODUÇÃO

Dentre os aspectos da segurança em veículos automotores, deve-se levar em consideração como minimizar danos aos passageiros em caso de acidentes com impactos. O uso de testes e padrões de referência para desempenho nessas situações é uma ação mais recente na história automotiva, com os primeiros testes para carros comercializados feitos nos Estados Unidos em 1978 e aos poucos melhorando e ganhando mais relevância para os fabricantes (HERSHMAN, 2001). Na Europa, a versão local do mesmo programa, o *New Car Assessment Program* ou NCAP, iniciou em 1997 (EURO NCAP; 2017), iniciando uma série de mudanças nos projetos dos automóveis para melhoria da segurança na região. Ele tem ganhado versões em outras regiões do planeta ao longo do século XXI. Um exemplo para carros de corrida, a Fórmula 1 teve os primeiros *crash tests* em 1985, focados apenas no bico e no impacto frontal, mas anos depois novas exigências foram sendo introduzidas, com mais testes sendo realizados e em outras possibilidades de impacto (FIA, 2013).

De acordo com Seward (2014), o princípio em carros de corrida é o mesmo que os de rua quando se trata de proteger quem está dentro: envolver as pessoas em uma célula resistente e ao redor dela, uma zona deformável com materiais dissipadores de energia. Os níveis de aceleração devem estar dentro de um limite aceitável. Os veículos da competição de Fórmula SAE, projetados e fabricados por estudantes, devem conter um componente conectado à parte frontal do chassi chamado atenuador de impacto (AI), que cumpre a função como material deformável e dissipador de energia.

É permitido que as equipes fabriquem seu próprio AI, com grande liberdade a respeito da geometria, material e métodos de fabricação. De acordo com o regulamento SAE International (2022), um ensaio deve ser realizado com uma cópia do componente, usando uma estrutura representativa da parte frontal do chassi do carro, que é onde o componente deve ser fixado (conforme o exemplo do carro da Figura 1(a)).

Há a possibilidade de os estudantes realizarem um Ensaio Dinâmico (ED) ou em Ensaio Quase-Estático (EQE). Contudo, não há indicação de possíveis diferenças de comportamento esperadas entre as duas situações. Fica então uma pergunta: não há uma diferença de comportamento mecânico entre os dois casos que exigiria cuidado ao realizar experimentalmente o EQE apenas, principalmente quando há liberdade no projeto e construção?

Conforme o regulamento, a peça deve ser capaz de cumprir dois requisitos de desempenho principais (que não se relacionam com as condições de teste experimental). O primeiro é de ser capaz de absorver energia suficiente para parar um carro de 300kg a 7m/s. O segundo é ter as acelerações aplicadas durante o impacto à massa citada dentro de uma média de 20 vezes a aceleração da gravidade na superfície da terra (g) com picos de, no máximo, 40 g. Para o EQE, mede-se a força necessária para deformar o material ao longo do tempo, calcula-se a aceleração e se estima a energia com os dados de força e deslocamento. No ED não há restrições quanto à velocidade e massa usadas no processo, mas se deve garantir que a energia do impacto seja igual ou maior que a exigida e deve-se medir a aceleração. Idealmente, o ED é feito com a massa e velocidade próximas às especificadas para desempenho do atenuador.

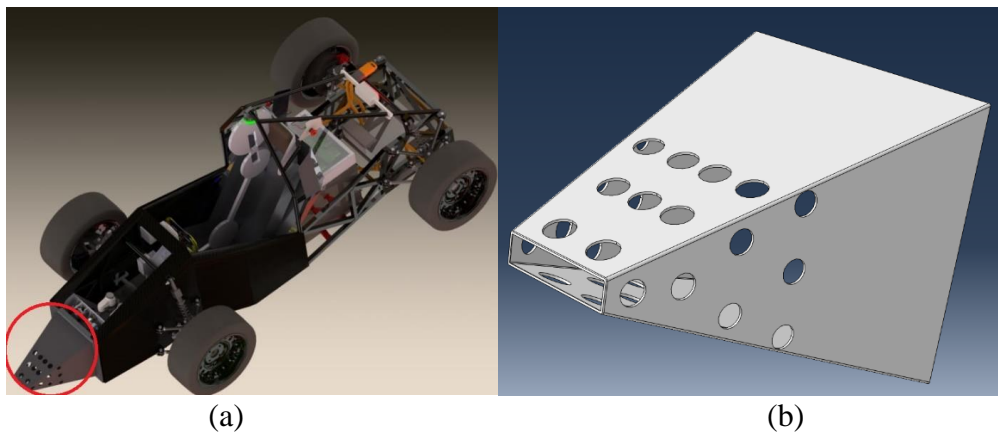
Agrawal et al (2015), realizaram uma revisão bibliográfica de trabalhos a respeito de atenuadores de impacto, incluindo vários relacionados à Fórmula SAE, com exemplos envolvendo testes dinâmicos ou quase estáticos, experimentais e simulados. No entanto, dentre os estudos apresentados, é realizado apenas um tipo de teste ou outro, mas não há exemplo de comparações de comportamento de uma mesma estrutura entre os ensaios dinâmico e quase estático. Geralmente, o foco está em garantir que o desempenho do AI atinja o desejado, ou comparar desempenho de diferentes atenuadores.

No caso da equipe e-Power UFRGS, é viável fazer para seu atenuador de impacto o ensaio quase-estático e não o dinâmico. O primeiro pode ser feito por membros da equipe em um

laboratório da universidade. O outro ensaio requer instrumentação adequada para medir aceleração e deve ser executado por técnico qualificado. Desse modo, o objetivo deste estudo é, usando o método de elementos finitos, estimar diferenças de comportamento (particularmente em acelerações ou forças e energias ao longo do processo) esperadas entre um ED e um EQE para um AI com o conceito que foi proposto para ser usado pelos estudantes da UFRGS, verificando se são relevantes. Também é intuito avaliar como diferentes modelos de material usados podem afetar o resultado. Se houver variações significativas, as informações podem ajudar a fazer futuros projetos de AI melhores quando não há possibilidade de fazer o ensaio experimental dinâmico.

Para essa avaliação, foi usado o *software* Abaqus CAE 2020. Foram simuladas as duas situações de ensaio de cada peça e os resultados foram analisados e comparados. Para realizar o trabalho, o atenuador usado foi o próprio modelo proposto dentro da equipe e-Power UFRGS. A estrutura se constrói a partir de quatro chapas de 2,5mm recortadas em trapézios, soldadas para formar um tronco de pirâmide, conforme a Figura 1(b) ilustra. O material do projeto é alumínio AA 1100 H14. O objeto é soldado na base a uma chapa mais espessa de alumínio que é fixada ao chassi do carro conforme o regulamento da competição de Formula SAE.

Figura 1: Imagem de CAD do carro de Formula SAE da equipe e-Power UFRGS com a localização do atenuador de impacto destacada pelo círculo vermelho (a). CAD do atenuador de impacto proposto pela equipe e-Power (b).



2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Análise via método dos elementos finitos

A principal característica do método de elementos finitos envolve a discretização de um meio contínuo em partes finitas. Surgiu para resolver problemas de tensão em sólidos, mas também encontrou aplicações em diversas outras áreas (COOK et al, 1989). O uso adequado do método dos elementos requer bom julgamento, usando conhecimento e experiência para modelar corretamente um problema considerando as limitações existentes.

2.1.1 Análise estática, análise dinâmica e métodos implícitos e explícitos

São dois tipos de análise considerados aos problemas em mecânica dos sólidos. Uma análise estática pode ser usada quando a energia cinética e as acelerações não são relevantes. A

análise dinâmica é necessária quando a energia cinética e/ou aceleração é significativa no problema avaliado.

Para realizar uma análise estática ou quase estática, pode-se usar métodos implícitos de análise em elementos finitos. Nessa situação, o problema é resolvido com uma equação de equilíbrio entre as forças internas e externa, e requer solução simultânea de sistemas de equações. Para realizar análises dinâmicas, é necessário usar métodos explícitos. Estes consideram a massa e a inércia no problema, integrando a aceleração e a velocidade para obter os deslocamentos, avançando cinematicamente o problema deixando a propagação de ondas ocorrer. Análises quase-estáticas também podem ser feitas com métodos explícitos, mas cuidados devem ser tomados (SIMULIA 2013). Nesse caso, é importante assegurar baixa participação da energia cinética no problema, e que efeitos de propagação de onda não sejam pronunciados.

2.1.2 Elementos de casca e elementos rígidos

Um dos aspectos fundamentais é a escolha dos elementos usados no problema. Há várias opções de elementos tridimensionais, bidimensionais e unidimensionais. Elementos tridimensionais são aplicáveis em casos mais gerais, tendo a desvantagem de usar vários nós por elemento, exigindo maior recurso computacional.

Em problemas tridimensionais, elementos de casca (*shell elements*) podem geralmente ser usadas quando uma das dimensões de uma estrutura é cerca de 1/10 do seu tamanho global típico (SIMULIA, 2013). O uso desse elemento requer a definição da espessura para que se possa levar em consideração as propriedades da seção transversal do elemento no problema. A espessura pode ser calculada durante a análise, de modo que as tensões e deformações que ocorrem na seção transversal sejam levadas em consideração.

Ao estabelecer um corpo como rígido no Abaqus, independente dos elementos usados para descrevê-lo, eles serão parte do corpo rígido. Quando se cria um corpo rígido, se cria um nó de referência. Todas as restrições e cargas são aplicadas ao nó de referência do corpo rígido, mesmo que se use um nó dos elementos para aplicar a condição (SIMULIA, 2013). Não há deformação no corpo, e se não houver rotações todos os pontos transladarão igualmente ao que se aplica ao ponto de referência.

2.1.3 Mass Scaling

A escala de massa (*mass scaling*) é um recurso que pode ser usado para acelerar os cálculos de um problema resolvido em análise dinâmica explícita, sem que seja necessário alterar a taxa de deformação do problema (útil quando a esta é considerada no modelo de material). Ela atua multiplicando a massa dos elementos por um fator definido nas configurações da análise. O princípio relacionado a essa mudança está associado à dependência do tempo de estabilidade (o aumento máximo no valor de tempo por incremento) com a densidade do material (SIMULIA, 2013). Devido aos valores tipicamente baixos de tempo de estabilidade, demoraria muito realizar uma análise que ocorre ao longo de um período de tempo grande. Por mudar a massa, esse recurso só deve ser aplicado ao modelo todo em casos quase-estáticos, em que a energia cinética se mantenha baixa frente às outras energias relevantes ao fenômeno avaliado (tipicamente, a energia interna deve ser comparada à energia cinética). O manual de introdução do Abaqus (SIMULIA, 2013) estabelece que geralmente de 5% a 10% do valor de pico da energia interna é aceitável, mas orienta que problema deve ser avaliado individualmente para garantir o uso de um valor adequado para o fator.

2.2 Modelagem do material

Além do modelo de elasticidade linear isotrópico, outras propriedades dos materiais foram incluídas: modelos para deformação plástica e dano.

2.2.1 Modelos de deformação plástica

O comportamento plástico dos materiais ocorre quando há deformação permanente no sólido, em oposição a ele retornar ao seu estado inicial, como no caso da elasticidade pura. Esse efeito dissipa energia usada para gerá-lo. Nos materiais em que há deformação plástica, ela geralmente vem acompanhada de um nível de encruamento, que significa que a tensão de escoamento aumenta conforme a deformação plástica aumenta. Duas opções de modelo de encruamento isotrópico são usados neste trabalho: modelo bilinear e modelo Johnson Cook.

O modelo bilinear é chamado assim por definir o comportamento elástico e plástico do material em duas retas: uma do próprio regime elástico linear do material, outra reta para definir o encruamento do material, determinando a relação entre o valor da tensão de escoamento e a deformação plástica.

No modelo proposto por Johnson e Cook (1983), o encruamento no regime de deformação plástica com uma equação que é capaz de levar em consideração a taxa de deformação e a temperatura do material, conforme:

$$\bar{\sigma} = [A + B (\bar{\epsilon}^{pl})^N \left[1 + C \cdot \ln \left(\frac{\dot{\bar{\epsilon}}^{pl}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right]] (1 - \hat{\theta}^m) \quad (1)$$

onde A , B , N são parâmetros materiais associados à resposta constitutiva do material sem efeito da taxa, enquanto C e $\dot{\epsilon}_0$ são parâmetros que introduzem a dependência da taxa de deformação. $\bar{\epsilon}^{pl}$ é a deformação plástica acumulada e $\dot{\bar{\epsilon}}^{pl}$ é a sua taxa. Já $\hat{\theta}^m$ é uma função que introduz os efeitos da temperatura, a qual não foi considerada neste trabalho, de modo que $\hat{\theta}^m = 0$.

Com esse modelo, com valores de B e N positivos, a tensão equivalente tende a infinito quando a deformação plástica equivalente tende a infinito. Para considerar um limite para a tensão e a deformação, um modelo de dano ou falha deve ser usado.

2.2.2 Modelo de dano

Modelos de dano são usados para incluir falha em uma análise. Para simular a fratura que ocorre em um material por meio de um modelo de dano, é necessário definir um critério de iniciação de dano e um critério de evolução de dano.

Para metais dúcteis, um dos critérios existentes é o critério de fratura de Johnson-Cook (JOHNSON; COOK, 1985) que determina que a deformação plástica equivalente de início do dano é dada por:

$$\bar{\epsilon}_D^{pl} = [D1 + D2 \exp \left(D3 \frac{p}{q} \right) \left[1 + D4 \ln \left(\frac{\dot{\bar{\epsilon}}^{pl}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right]] (1 + D5 \hat{\theta}^m) \quad (2)$$

onde $\bar{\epsilon}_D^{pl}$ é a deformação plástica equivalente em que o material inicia o dano; $D1$, $D2$, $D3$, $D4$ e $D5$ são parâmetros do material que relacionam as outras variáveis a $\bar{\epsilon}_D^{pl}$; p é tensão hidrostática e q é tensão equivalente de von Mises $\bar{\epsilon}^{pl}$, $\dot{\epsilon}_0$ e $\hat{\theta}^m$ são os mesmos da equação 1.

Para critério de evolução do dano no Abaqus, é considerado que após início do dano o material degrada em tensão de escoamento e elasticidade, com diminuição de seus valores até alcançar a deformação plástica equivalente de fratura. Quando um ponto de integração atinge essa condição, o elemento correspondente é removido da malha, simulando uma abertura de fratura. Em função de uma relação entre tensão e deformação causar dependência da malha na fratura do material, formas de relacionar tensão e deslocamento são mais recomendadas (SIMULIA, 2014). O critério de energia de fratura (HILLERBORG *et al*, 1976) permite essa relação conforme:

$$G_f = \frac{\sigma_{y0} \cdot \bar{u}_f^{pl}}{2} \quad (3)$$

onde G_f é a energia de fratura (energia necessária para abrir uma rachadura de área unitária); σ_{y0} é a tensão de escoamento no início do dano (calculada com a deformação da equação 2); \bar{u}_f^{pl} é o deslocamento plástico equivalente em que o material fratura. Com a energia de fratura de um material definida, é calculado \bar{u}_f^{pl} usando o valor de σ_{y0} . No Abaqus, a tensão de escoamento com dano é calculada usando a tensão de escoamento que existiria sem dano, baseada no modelo de deformação plástica (pode-se verificar um esquema no Axexo 1). A evolução do dano até o deslocamento plástico de fratura define o nível de dano, que varia de 0 no início do dano a 1 na fratura. Escolheu-se usar uma evolução linear do dano.

2.3 Contatos

O contato no Abaqus pode ser definido por um algoritmo que garante que todas as superfícies interajam corretamente entre si. As propriedades de contato de todas as superfícies são as mesmas se nenhum contato personalizado entre superfícies for feito.

Ao menos dois aspectos definem o contato: o comportamento normal e o tangencial. Por padrão no Abaqus em análises explícitas, o comportamento normal é um método de penalização. Isso significa que uma força de contato é aplicada conforme uma superfície penetra em outra. Na configuração padrão, o *software* escolhe valores para a força que minimizem efeitos no tempo de estabilidade (SIMULIA, 2013).

O comportamento tangencial pode ser formulado para simular fricção. A maneira mais simples é usar o modelo básico de Coulomb (SIMULIA, 2013), com μ fixo:

$$\tau_{crit} = \mu p_c \quad (4)$$

onde p_c é a pressão de contato, e μ o coeficiente de atrito. Quando a tensão de cisalhamento no contato passar de τ_{crit} , o deslizamento ocorre. Caso contrário, não há deslizamento entre superfícies.

2.4 Balanço energético

Para avaliar a energia do sistema, várias variáveis são definidas no Abaqus (SIMULIA, 2013). O balanço de energia, ignorando os termos térmicos e outros termos que se mantêm zerados devido aos comportamentos de material usados, é definido como:

$$E_{total} = E_I + E_V + E_{FD} + E_{KE} - E_W - E_{PW} \quad (5)$$

$$E_I = E_{AE} + E_{PD} + E_{SE} + E_{DMD} \quad (6)$$

onde E_I é energia interna é E_V é energia dissipada por viscosidade (incluindo viscosidade artificial, que é o único tipo aplicado nos modelos deste trabalho) E_{FD} é energia dissipada por fricção, E_{KE} é energia cinética, E_W é o trabalho aplicado por forças externas, E_{PW} é energia aplicada penalizações de contato. A energia total (E_{total}) se mantém aproximadamente constante ao longo do tempo, mas pequenas variações são esperadas no modelo numérico (SIMULIA 2013). E_{PD} é energia dissipada por deformação plástica, E_{SE} é energia elástica acumulada, E_{DMD} é energia dissipada por dano. A energia de deformação artificial (E_{AE}) é uma energia acumulada na forma de controles artificiais de deformação, tipicamente aplicados a elementos sujeitos a sofrerem modos de deformação aos quais não possuem resistência e não acumulam energia de deformação (como os elementos de integração reduzida). É recomendado que E_{AE} se mantenha em uma fração bem baixa da energia interna para ter um resultado de boa qualidade. Geralmente, malhas mais refinadas tendem a reduzir a energia de deformação artificial em um problema, sendo um dos indicadores da qualidade da malha (SIMULIA 2013).

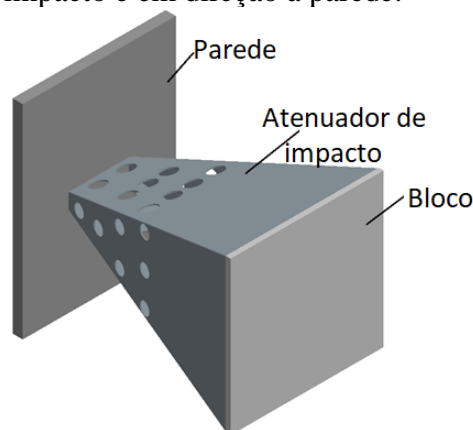
3. METODOLOGIA

3.1 Geometria do problema

Com o modelo geométrico do atenuador definido, na simulação dos ensaios são usados dois blocos como corpos rígidos, um para representar a massa à qual o atenuador está fixado e outro para representar a parede de impacto, conforme se observa na figura 2.

É considerado que não há deformação significativa na parede e no chassi (onde o atenuador se conecta ao carro). Essas suposições são assumidas considerando que os testes são feitos usando estruturas bastante rígidas representando a parede, e que o chassi é projetado baseado no regulamento, que é pensado para prevenir que a estrutura frontal ceda à deformação plástica na faixa de forças em que o atenuador deve atuar.

Figura 2 — Montagem do atenuador de impacto com os blocos usados. O sentido do impacto é em direção à parede.



Nos dois ensaios a função do bloco permanece a mesma e ele fica conectado ao atenuador pela base. No ensaio QE, o bloco tem uma massa de 3 kg. No ED há uma massa pontual aplicada a um dos pontos do bloco para resultar em uma massa total no bloco igual à de referência do regulamento. A parede permanece fixa em ambos os casos, mas no ED ela terá uma pequena distância inicial do atenuador para poder ser estudado o efeito do impacto inicial. No ensaio quase-estático ela inicia em contato com a ponta do atenuador.

3.2 Modelo de material

Para cada um dos dois tipos de teste simulado, serão usados quatro modelos de material: o modelo de encruamento isotrópico bilinear (MB); o modelo de encruamento isotrópico de Johnson-Cook (MJC), incluindo efeitos da taxa de deformação no comportamento; o MJC como o anterior adicionando o critério de dano de Johnson-Cook com o critério de evolução de dano por energia de fratura; o quarto modelo usando MJC mas sem considerar o termo de taxa de deformação e sem incluir dano. Os dados para os modelos são baseados em dados obtidos em literatura para o alumínio AA 1100 H14. Nos quatro modelos, o módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson usados foram 69 GPa e 0,33, respectivamente. A densidade do material foi considerada 2710 kg/m³.

Para o modelo bilinear, maiores desvios foram feitos. Como base, os valores usados no trabalho de Raguraman *et al* (2009), em que os valores de tensão verdadeira do alumínio 1100 H14 são 117 MPa para o escoamento e 149 MPa à 18% de deformação verdadeira. Para este trabalho, no entanto, uma aproximação foi feita e o valor de tensão de escoamento usado foi 115 MPa e para o fim do encruamento o valor usado foi de 285 MPa a 100% de deformação (que deixa o valor de 149 MPa a 20% de deformação). Esse modelo não foi usado com intenção de ser o mais fiel, mas para verificar como ele se diferenciaria em comportamento de outro modelo para deformação plástica. A maneira como o modelo é configurado no *software* faz o comportamento do material para deformações maiores que o último ponto definido (100%) manter a tensão de escoamento constante, em oposição a extrapolar a reta com a mesma inclinação (SIMULIA, 2014). Isso pode causar alguns comportamentos irrealistas em regiões de grande deformação. Outro aspecto que não corresponde ao material real é que o encruamento foi extrapolado para muito além do valor máximo de deformação do alumínio usado.

Para o modelo Johnson-Cook, os valores foram usados tal como os usados por IQBAL *et al* (2012), mas desconsiderando os parâmetros térmicos ($\hat{\theta}^m$ sempre igual a zero), pois não foram incluídos no problema estudado transferência de calor e mudança de temperatura. Os valores podem ser consultados na Tabela 1. Para o MJC com dano, os valores foram retirados da mesma fonte. O dano foi modelado com critério de iniciação de dano de Johnson-Cook e critério de evolução de dano por energia de fratura.

Tabela 1: parâmetros de material para MJC (com e sem o termo para considerar taxa de deformação) e MJC com dano

	A (MPa)	B (MPa)	N	$\dot{\epsilon}_0$ (s ⁻¹)	C	D1	D2	D3	D4	D5	Gf (N/mm)
MJC	102,82	49,79	0,197	1	0,001						
MJC com dano	102,82	49,79	0,197	1	0,001	0,071	1,248	-1,142	0,147	0	105
MJC s/ taxa	102,82	49,79	0,197								

3.3 Tipo de análise usado

Nos eventos simulados, o tipo de análise usado foi a análise explícita. Além de ser o recomendado para um problema dinâmico com grandes deformações, não linearidade material e contato, este tipo de análise pode representar o comportamento quase estático, desde que sejam consideradas condições que limitem a importância da inércia.

3.4 Configurações dos ensaios

Para representar o ensaio quase estático foi utilizada uma a representação do ensaio experimental equivalente assumindo os efeitos dinâmicos na análise (o que ocorre devido ao uso de análise explícita), mas para baixas velocidades. Foi feita engastando a parede enquanto

a massa se movimentou, junto ao atenuador, a uma velocidade de 0,03 m/s na direção longitudinal, no sentido à parede, sendo restringido para não deslocar em outras direções. Para minimizar os efeitos de oscilações causadas pelo impacto do primeiro contato entre a parede e o atenuador, foi aplicado o *smooth step*, recurso do Abaqus que suaviza a variação de um valor a outro. A curva gerada para aplicação das condições de contorno (no caso, para a velocidade de avanço do bloco) tem derivadas primeira e segunda também suaves, garantindo que a aplicação cause mínimas oscilações na análise dinâmica, sendo recomendado para análises quase estáticas em métodos explícitos (SIMULIA, 2013). Foram feitos dois passos, de modo que a velocidade vai de zero a um décimo da especificada no primeiro 0,2 segundo para aliviar o impacto, depois sobe para 100% do valor requerido até o tempo de 1 segundo. O gráfico para ilustrar essa variação pode ser encontrado no Apêndice 1. O valor do deslocamento final foi determinado após avaliação dos dados, sendo considerado encerrado no instante em que o valor de energia interna atingiu valor igual ou acima ao necessário. Um ponto de referência foi estabelecido para definir o deslocamento do bloco, de modo que a força longitudinal de reação associada ao movimento do bloco pudesse ser medida nele.

Para o ensaio dinâmico, o bloco que representa a massa e o atenuador tem a velocidade inicial de 7m/s na direção longitudinal no sentido da parede, tendo a energia cinética a ser absorvida pelo sistema (com adicional da energia cinética do próprio AI), sendo restringido no deslocamento em outras direções. A parede foi engastada da mesma maneira que no caso EQE. As simulações ocorreram por tempo suficiente para que a velocidade do bloco da massa seja igual a zero ou em sentido oposto ao inicial. O primeiro instante de tempo registrado nos dados em que isso ocorreu, foi considerado o instante final do processo. Um ponto de referência no bloco foi usado para medir sua aceleração.

3.5 Malha, simetria e contato

Com objetivo de ser mais eficiente no uso de recursos computacionais, foi usado para a discretização do problema o elemento S4R no Abaqus, que é um elemento de casca linear de quatro nós e um ponto de integração. É uma aproximação razoável para usar no atenuador avaliado, considerando que é feito de chapas finas.

Para determinação da malha usada no problema, foram testadas algumas malhas com número de elementos cada vez maiores na simulação do ensaio dinâmico, com encruamento bilinear. Para o problema dinâmico, os valores médios e máximos de aceleração foram comparados, junto ao valor de energia interna e deslocamento no tempo final, o qual foi considerado de 0,065 s. Também foi avaliada a curva de aceleração por tempo de cada malha, para complementar.

Todas as malhas foram geradas de modo que os elementos na ponta do atenuador (mais próximos à parede) são menores, com o tamanho dos elementos gradualmente aumentando até a base (fixada ao bloco). Também foi realizada uma configuração da malha de modo que os elementos maiores são menores na direção longitudinal do que na outra direção, de modo a melhorar a predição para as flexões que as chapas sofrerão.

Em função da geometria do atenuador e o procedimento dos ensaios, com movimento apenas longitudinal, foi assumida a simetria do problema. Há dois planos de simetria no atenuador, permitindo que ele seja dividido em quatro partes. Assim, pode-se calcular para apenas um quarto do atenuador, economizando recursos. As arestas que fazem parte dos planos de simetria foram restringidas em translação para fora do plano e em duas rotações (as que não fossem a perpendicular ao plano). Para se adequar a essa condição, a massa total do bloco no ED foi ajustada para um quarto da massa originalmente necessária (passou para 75 kg). O valor de energia de referência, por consequência, passa a ser 1837,5 J (um quarto da original).

Para o contato entre o atenuador e os outros dois corpos, além do contato do atenuador consigo mesmo, as mesmas propriedades foram aplicadas aos dois ensaios, com o modelo de Coulomb de atrito com coeficiente de atrito de 0,6 e a formulação padrão para o comportamento normal entre superfícies em contato.

3.6 Mass Scaling para o caso quase estático

Em função de o ensaio quase estático ocorrer em um tempo bem maior, isso aumentaria o tempo de processamento proporcionalmente com análise dinâmica explícita. Com o uso da escala de massa (*mass scaling*) o tempo necessário para completar o problema diminui. No entanto, é necessário avaliar até que ponto é possível aumentar a massa sem modificar significativamente o resultado. Com a malha escolhida, foram realizados alguns testes com diferentes valores de escala de massa para escolher o mais adequado entre eles. Com intenção de ser mais eficiente, o período avaliado foi o primeiro segundo do EQE, em que há aceleração até a velocidade de avanço, uma faixa de tempo adequada para verificar influência da inércia. Foram comparadas a energia interna, energia cinética e força de reação de cada valor de escala de massa.

3.7 Dados analisados de cada ensaio

Para se adequar as condições de cada tipo de ensaio, os dados avaliados tiveram algumas diferenças. Em comum, mediram-se os valores energéticos envolvidos no processo, além dos valores de deslocamento do bloco. Também foi realizada uma observação visual da deformação sofrida pelas estruturas, em buscas de diferenças notáveis entre as simulações. No ensaio quase-estático, obteve-se a força de reação ao longo do tempo. Para poder comparar diretamente o desempenho com o ED, a aceleração que a força geraria para uma massa de 75 kg foram calculadas. Para o ED, a aceleração foi obtida diretamente. A distância inicial do atenuador à parede no ED foi descontada nos dados para que tornar os valores de deslocamento comparáveis entre cada ensaio. As curvas de aceleração por deslocamento foram geradas e comparadas.

4. RESULTADOS

4.1 Convergência de malha

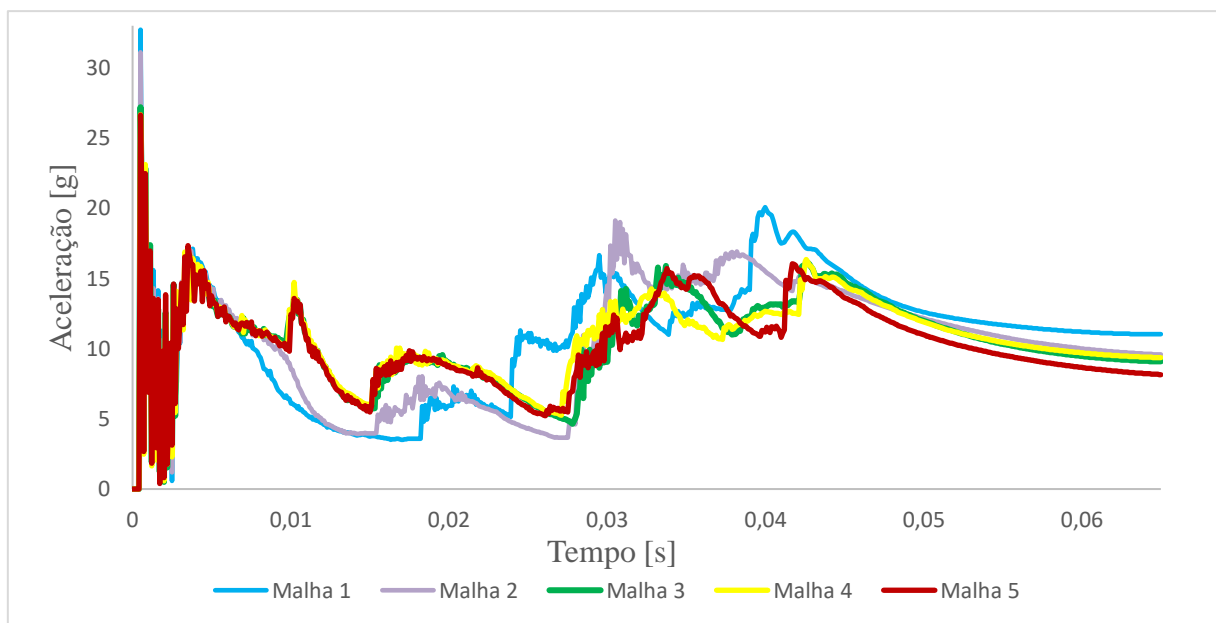
Um total de cinco malhas foram avaliadas para verificar a convergência no ED com MB. Essa combinação de ensaio e modelo de material gerava resultados com menor tempo de cálculo que outras, por isso foi escolhida. Com o comportamento das diferentes malhas em uma única simulação foi possível estimar a qualidade da escolhida. De acordo com a complexidade do problema, foram avaliados os próprios parâmetros principais que também são usados para avaliar o desempenho e comportamento do atenuador de impacto. Os resultados de cada malha estão organizados na Tabela 2. Para a aceleração a Figura 3 apresenta o gráfico com curvas para todas as malhas testadas.

Os valores obtidos na tabela demonstram pouca variação entre si. Porém, não demonstram uma tendência tão clara de convergência (ainda há oscilações), exceto pela aceleração máxima. Isso indica que ainda é necessária uma melhoria na malha até que os resultados possam ser mais exatos. É importante ressaltar que a aceleração máxima é muito dependente da deformação inicial do corpo, o que foi observado ocorrer justamente onde a malha está mais refinada, comparativamente à parte que fica mais próxima ao bloco de massa.

Tabela 2: valores de alguns parâmetros importantes para cada malha. Cada malha foi numerada para facilitar a referência a elas.

Malha	Nº de elementos	Acel. média	Acel. máx.	Energia Interna	Deslocamento ao final
1	2713	10,95	32,72	1824,53	249,5
2	4087	10,49	31,11	1810,48	252,4
3	8700	10,60	27,20	1814,04	241,2
4	14002	10,67	26,67	1812,09	239,2
5	19536	10,30	26,64	1808,02	243,5

Figura 3: curvas de aceleração por tempo para as diferentes malhas avaliadas para ED.



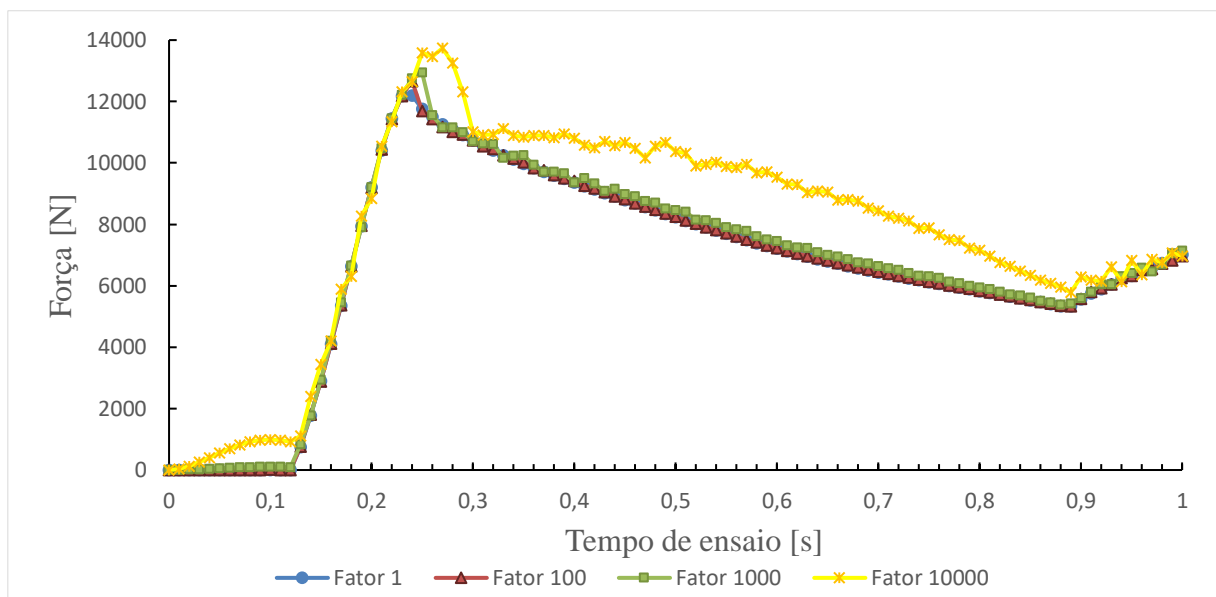
A estrutura sofre grandes deformações primeiramente na região mais próxima à parede, com deformações progressivamente ocorrendo cada vez mais para trás (no sentido da base do AI), conforme o avanço do bloco em direção à parede. Isso significa que a malha pode estar adequada na parte em que se deforma no começo, enquanto pode estar ainda insuficientemente refinada a partir de algum ponto de distância da parede. Aparentemente, as regiões com malha mais grosseira (mesmo na malha de maior número de elementos) são aquelas que causam a discordância vista no gráfico da Figura 3 do instante 0,03 segundo até o final. Portanto, para um resultado de melhor qualidade, uma malha mais refinada, particularmente nas regiões mais próximas à base do atenuador, seria recomendada.

No entanto, devido às elevadas necessidades de recursos computacionais que uma malha mais refinada teria e ao fato de que o foco não é reproduzir os casos reais com exatidão, a malha 5 foi escolhida para ser usada no estudo. A diferença percentual dos parâmetros de desempenho (da Tabela 2) foi baixa entre as malhas, demonstrando proximidade entre o uso das mesmas, a malha 5 foi julgada satisfatória para o uso desejado. Uma imagem da malha 5 pode ser encontrada no Apêndice 2.

4.2 Escolha de fator de escala de massa para o caso EQE

Os testes com diferentes valores de escala de massa foram feitos com os valores 1, 100, 1000 e 10000. Foram avaliados os valores de força de reação no bloco e energia interna do atenuador ao final. Os resultados de energia interna no tempo de 1 segundo são: 86,38 J para fator 1; 86,46 J para fator 100; 86,53 J para fator 1000; 87,42 J para o fator 10 000. Para avaliar o comportamento da força de reação, foi gerado o gráfico na Figura 4.

Figura 4: gráfico de força de reação no bloco em função do tempo de ensaio do EQE para diferentes valores de fator de escala de massa.



Percebe-se que os valores se mantêm muito parecidos exceto pelo fator de 10000. Como a massa aumenta com o aumento da escala, isso pode causar aumento da força necessária para acelerar e manter o avanço da massa empurrando o atenuador contra a parede. Devido à maneira como a velocidade foi ajustada, há aceleração nos momentos em que a diferença é notada no gráfico. Percebe-se assim, que o fator de 10000 é alto o suficiente para afetar significativamente um dos parâmetros avaliados. Isso é reforçado pelo valor de energia cinética no instante final: 15,87 J, indicando muita relevância nesta faixa de tempo avaliada. O fator de 10000 deixaria a simulação do EQE ocorrer em tempo semelhante à do ED, mas com a variação percebida nos resultados não é adequado usá-lo.

Ainda há um pouco de diferença na força de reação no primeiro pico do gráfico para os outros fatores, que provavelmente está associado com a aceleração da massa até a velocidade do ensaio. Com a estabilização da velocidade após o tempo de 1 segundo esse efeito diminuirá. Mesmo com influência do efeito da inércia no primeiro pico do gráfico, rapidamente há retorno aos valores próximos do original por parte dos fatores 100 e 1000, mesmo durante aceleração do bloco, em que o efeito tende a acontecer. Também é notada a baixa energia cinética: pico de 1,6 J no tempo de um segundo, o que deixa energia cinética pouco importante na faixa de tempo avaliada. Essa energia cinética se manterá próxima desse valor no resto do tempo nas simulações. O fator de 1000 possibilitou uma redução no tempo de cálculo em cerca de 31 vezes, o que já tornava o tempo de cálculo viável. Assim, foi concluído que fator de 1000 é adequado para se usar para a simulação do ensaio EQE.

4.3 Resultados das simulações

Dentre os dados analisados, com os critérios de fim de processo já aplicados, em todos as situações avaliadas as energias mais importantes são a E_I e E_{PD} . Também há valores significativos de E_{AE} e deformação elástica E_{SE} . No ED a energia cinética E_{KE} foi relevante, afinal ela define a energia inicial do sistema nesse ensaio, igual à energia total E_{total} inicial do sistema. O valor de E_{total} teve variação desprezível no ensaio dinâmico com os quatro modelos. No EQE, a energia inicial do sistema é zero e a E_{KE} é desprezível comparado com E_{PD} , mas há trabalho externo E_w gerado pela força que mantém o bloco se deslocando na velocidade desejada contra a parede. E_{FD} também tem um valor significativo. Outras formas de energia tiveram valores muito baixos em comparação à E_{PD} (bem menos de 1% desta), inclusive de E_{DMD} quando usado. É mais difícil estabelecer diferenças entre os processos avaliando as curvas de energia, comparado com as curvas de aceleração ou força. Consequentemente, nesta subseção serão apresentados apenas os valores finais de E_I , E_{PD} , E_{AE} e E_w para os EQE. Os valores de E_{FD} e E_{SE} finais podem ser aproximados com muita precisão com as equações 5 e 6, desprezando outras formas de energia (valor inicial da energia cinética para ED: 1848,58 J). Os principais resultados usando os quatro modelos para cada ensaio estão organizados na tabela 3.

Tabela 3: valores para cada ensaio. Há quatro energias relevantes nos ensaios, aceleração média e máxima ao longo do processo e deslocamento no encerramento do ensaio.

Ensaio/Modelo	E_I (J)	E_{PD} (J)	E_w (J)	E_{AE} (J)	Acel. Média (g)	Acel. Máx. (g)	Desloc. Final (mm)
ED MB	1814,85	1757,61	0	38,92	10,12	26,64	241,8
ED MJC s/ taxa	1821,61	1756,13	0	48,82	10,43	26,48	236,1
ED MJC	1822,80	1758,61	0	47,48	10,47	26,51	236,3
ED MJC com dano	1820,92	1758,89	0	45,41	10,52	26,51	238,8
EQE MB	1838,90	1784,35	1862,90	38,30	9,95	26,82	251,4
EQE MJC s/ taxa	1839,49	1781,33	1871,80	41,28	9,49	24,18	267,6
EQE MJC	1839,62	1781,41	1872,06	41,34	9,49	24,17	267,6
EQE MJC com dano	1838,18	1776,74	1864,35	44,51	9,46	23,84	267,3

Na tabela percebe-se que para os quatro modelos houve diferença significativa no comportamento. A diferença entre os resultados de aceleração e deslocamento final de ED foi mais baixa, enquanto nos resultados de EQE foi maior (particularmente o deslocamento e aceleração máxima). Nota-se que para EQE houve uma menor aceleração média e menor absorção de energia por deslocamento ao aplicar o modelo Johnson-Cook em comparação ao MB. O deslocamento no encerramento do processo apresenta 6,44% de diferença entre os resultados maior e menor no EQE; esse valor é de 2,41% (entre maior e menor) no ED. Entre os ensaios, a maior diferença é percebida com o uso do MJC sem termo de taxa de deformação e sem modelo de dano, resultando em 13,34% de diferença em relação ao menor valor. A menor diferença desse tipo é entre os testes com MB (modelo que neste estudo foi usado com valores bastante irrealistas), de 3,96%. Entre os casos usando MJC com modelo de dano, a diferença foi de 11,92%. Para MJC com o termo de taxa de deformação e sem dano, a diferença é 13,26%.

Na questão energética, as variações de energia interna e de deformação plástica entre modelos no mesmo ensaio são menores que 1%, mudando para um pouco mais que isso entre mesmo modelo de material com ensaios diferentes. Essa diferença maior provavelmente está associada à diferença existente entre os critérios para considerar fim do processo.

Para ajudar a compreender o que acontece, é interessante comentar sobre a parte qualitativa. Um dos aspectos avaliados é a forma do corpo deformado. É percebido que há

diferença no início do processo entre ED e EQE (para todos os modelos usados), em que o impacto dinâmico provoca uma das chapas a se dobrar de modo a encostar a parte de fora na parede, em comparação ao processo suave quase-estático em que a mesma chapa encosta a parte de dentro na parede. Essa diferença parece afetar bastante os próximos instantes de cada processo. Imagens para ilustrar o histórico de deformações de cada podem ser vistas nos apêndices 3 e 4.

Outra avaliação a ser feita é a diferença nos gráficos de aceleração por deslocamento. As curvas das seis simulações podem ser vistas nas figuras 5 e 6.

Figura 5: curvas de aceleração (acel. calculada para os EQE) por deslocamento do bloco.

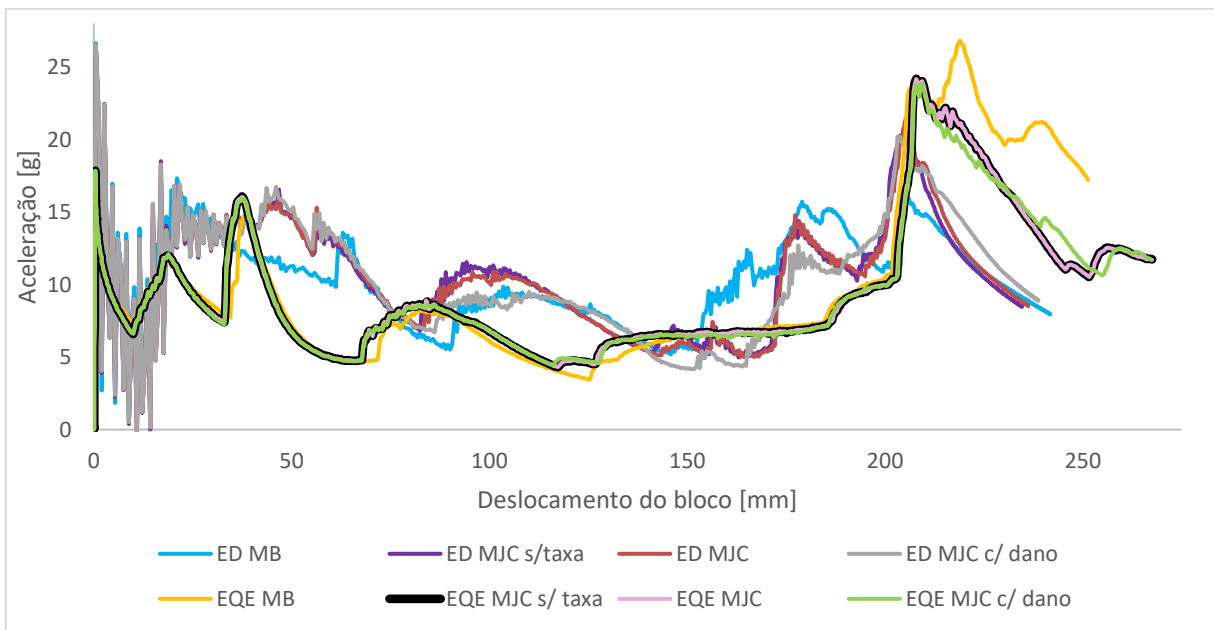
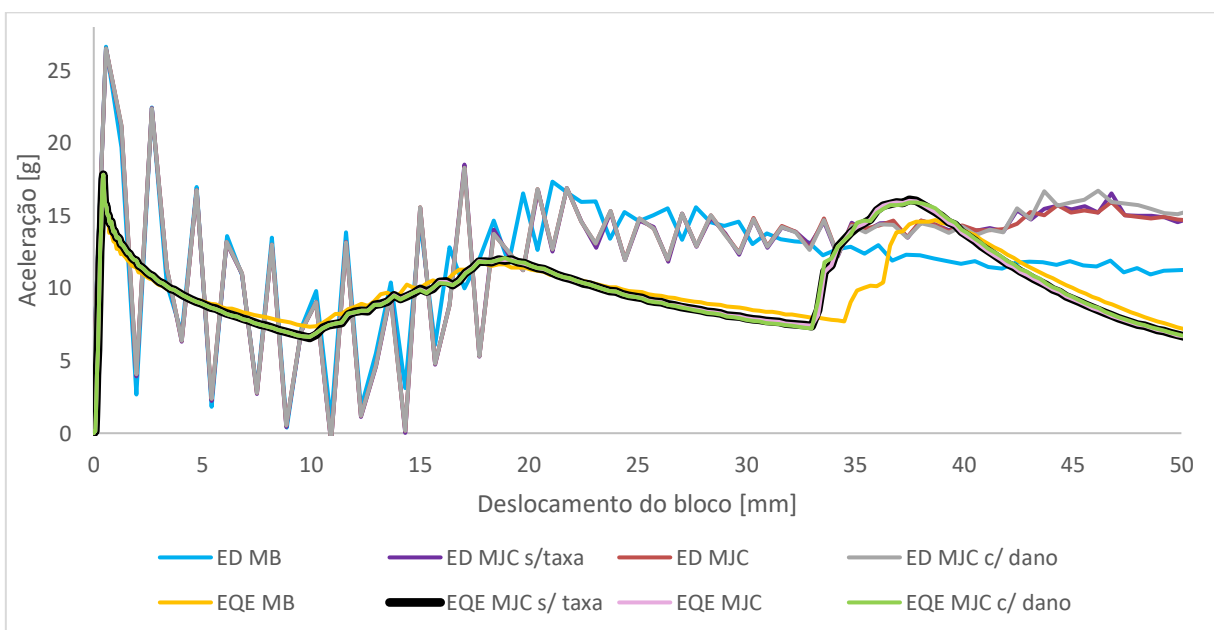


Figura 6: O mesmo gráfico da figura 7, ampliado para os primeiros 50 mm de deslocamento.



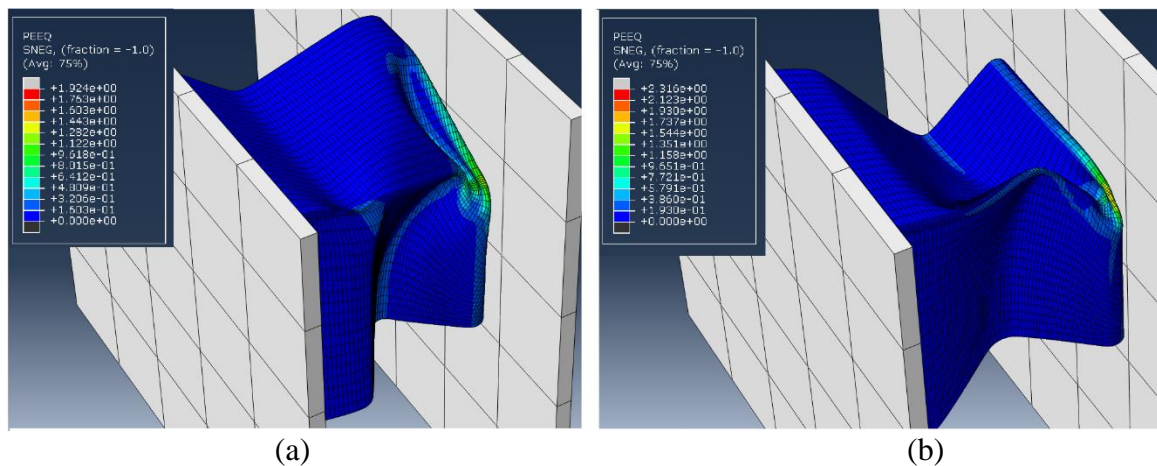
Os pontos obtidos para o caso dinâmico exibem as oscilações esperadas nos resultados. O efeito é mais forte no começo, logo após o primeiro contato, e diminui bastante após aproximadamente 50mm de deslocamento pós impacto. Na figura 6 esse efeito pode ser mais bem observado. Os valores de aceleração tendem a se manter parecidos no começo do ED entre os diferentes modelos de material, com aumento a diferença ao longo do processo (mesmo com as oscilações na situação dinâmica, os valores são muito próximos nos primeiros 20 mm). No EQE, os quatro modelos são próximos, com o modelo bilinear tendo maior diferença em relação aos outros, particularmente no final, com valores muito superiores de aceleração calculada.

4.4 Discussão

Há muitos fatores que influenciam o fenômeno estudado, e as diferenças entre os resultados evidenciam alguns deles. Avaliando a aceleração, diferenças significativas surgem particularmente entre o modelo de encruamento bilinear e de Johnson-Cook. No ED há a diferença distribuída ao longo do processo e menor influência na energia absorvida. No EQE a diferença é mais acentuada ao final do processo, mas afeta bastante a energia absorvida por deslocamento, sendo necessário a massa percorrer maior distância para atingir a energia interna requerida no caso do MJC.

Os valores usados no modelo simples de plasticidade, em conjunto com a limitação do modelo (sem dano) permitem que um elemento ou região do corpo absorva muita energia e se deforme bem acima do que seria realista. Na figura 7 há imagens de ambos os modelos comparando um instante de tempo em que se percebe que a deformação plástica equivalente está bem maior que o possível no material real.

Figura 7: condição do atenuador para o MB (a) e o MJC (sem modelo de dano) (b) no EQE no instante de 8,94 s (deslocamento no bloco equivalente a 251,7 mm)



Na Figura 7(b), o MJC tem encruamento bem menos intenso que o modelo da Figura 7(a), mas sempre crescente. Esses fatores parecem afetar o comportamento de deformação próximo à região indicada na figura 7(a) ou (b). A diferença nesse instante afeta o resto do processo.

Quanto às diferenças entre ED e EQE, a diferença geométrica da deformação existe desde o começo até o fim de cada ensaio. A deformação inicial é consistente para os quatro modelos de material usados nos dois ensaios, indicando que os efeitos dinâmicos são muito influentes naquele instante de tempo.

Percebe-se que todas as diferenças mais significativas entre acelerações de cada simulação são acompanhadas de mudanças no histórico de deformação do objeto estudado.

Cada modelo de material influencia o processo, mas não diretamente: é associado a como ele muda o modo de deformação.

Destaca-se que a estrutura do atenuador não tem uma maneira previsível de se deformar plasticamente. Isso gera uma instabilidade no processo, de modo que fica suscetível às diferenças, menores ou maiores, entre cada situação. Além das variações vistas com o uso de métodos computacionais, outras causas podem surgir quando se considera efeitos do mundo real. Um teste experimental do mesmo atenuador poderia ser influenciado por imperfeições de fabricação da chapa, ou pela soldagem feita entre as chapas. Irregularidades desse tipo também podem causar assimetria na deformação. Consequentemente, é possível que um resultado real teria substancial diferença do que é previsto em métodos computacionais, já que o histórico de deformação tem probabilidade de ser alterado.

5. CONCLUSÃO

Com a avaliação feita dos resultados, algumas conclusões podem ser feitas relacionadas aos métodos usados. A malha poderia ser melhorada, o que custaria mais recursos computacionais, mas ela está mais adequada no início do fenômeno estudado, diminuindo o impacto sobre seu histórico. Foi possível usar um fator de escala de massa que permitisse diminuir consideravelmente o tempo do EQE para computar os resultados em tempo mais curto mantendo o erro baixo. Há diferença entre os modelos de material usado. Em alguns casos, a variação na deformação é bem significativa, evidenciando a importância de usar um modelo adequado para um resultado mais confiável.

As maiores mudanças nos resultados vêm acompanhadas de mudanças mais intensas na geometria do corpo deformado. Entre modelos de materiais isso ocorre e entre os ensaios fica ainda mais evidente, com diferença notável desde o começo do processo. Desse modo, o aspecto que mais determina o desempenho é a geometria da estrutura. O atenuador avaliado possui várias possibilidades para iniciar deformação plástica, não sendo possível prever como ela ocorrerá. Essa observação implica que um corpo ajustado para ter deformação mais previsível usando o mesmo material poderia ter resultados mais próximos entre ensaios.

Em relação à dúvida que se buscava resolver no estudo, conclui-se que o atenuador avaliado, do jeito como está projetado, tende a ter diferenças significativas entre um ensaio quase estático e um dinâmico. Desse modo, percebe-se que há de se cuidar durante o projeto e desenvolvimento de estruturas com essa função para que realmente desempenhem dentro do que é desejado, não somente para Fórmula SAE, mas para todas as aplicações semelhantes.

Todos as simulações indicam resultados que seriam aprovados conforme o regulamento. Mesmo com a variação entre ensaios, os valores para acelerações média e máxima estão bem abaixo dos limites. No entanto, se o atenuador tivesse um desempenho que resultasse em valores mais próximo dos limites, a diferença poderia causar alguns resultados a não cumprirem o regulamento em um dos ensaios. Nesse sentido, ensaios quase-estáticos de atenuador de impacto devem se manter dentro da faixa de desempenho requerida enquanto levam em consideração uma margem de segurança.

Sobram dúvidas a respeito de como seria a diferença entre os casos com outros materiais (principalmente os mais influenciados por taxas de deformação) e outras geometrias de atenuador (uma estrutura com deformações mais previsíveis poderia ser mais semelhante entre teste dinâmico e estático?). Nessa linha, trabalhos futuros poderiam fazer a mesma avaliação feita aqui, tanto com métodos computacionais quanto experimentalmente, mas investigando outras combinações de material e geometria. Também seria interessante observar como o comportamento muda para atenuadores em diferentes velocidades de ensaio dinâmico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGRAWAL, N.; RAJ, J. SAXENA, G. **Design and Analysis of Impact Attenuator: A Review**. SSRG International Journal of Mechanical Engineering. Volume 2, ed. 12. Dez. 2015

COOK, R. D.; MALKUS, D. S.; PLESHA, M. E. **Concepts and applications of finite element analysis**. 3ª ed. EUA: John Wiley & Sons, 1989.

EURO NCAP Marks 20th Anniversary Of Life-Saving Crash Tests. **Global NCAP**, 2017. Disponível em: <https://www.globalncap.org/news/euro-ncap-marks-20th-anniversary-of-life-saving-crash-tests>. Acesso em 11/04/2022.

FIA. Breaking the Barriers of safety. **Auto Magazine**. 2013. Disponível em: <https://www.fia.com/news/breaking-barriers-safety> Acesso em: 12/09/2022

HERSHMAN, Lawrence L.. **The U.S. New Car Assessment Program (Ncap): Past, Present And Future**. National Highway Traffic Safety Administration. Paper number 390, 2001.

HILLERBORG, A., MODEER, M. e PETERSSON, P. E. **Analysis of Crack Formation and Crack Growth in Concrete by Means of Fracture Mechanics and Finite Elements**, Cement and Concrete Research, vol. 6, pp. 773–782, 1976

IQBAL, M. KHAN, S. ANSARI, R. GUPTA, N. **Experimental and numerical studies of double-nosed projectile impact on aluminum plates**. International Journal of Impact Engineering, Vol. 54, 2013 p. 232-245

JOHNSON, G.R.; COOK, W.H. **A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures**. Proc. 7th Int. Symp. on Ballistics, The Hague, The Netherlands Abril, 1983, pp. 541-547

JOHNSON, G.R.; COOK W.H. **Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures, and pressures**. Eng Fract Mechanics, 21 (1). 1985, pp. 31-48

RAGURAMAN, M; DEB, A.; JAGADEESH, G. **A numerical study of projectile impact on thin aluminium plates**. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C: Journal of Mechanical Engineering Science 1989-1996 (vols 203-210), Nov. 2009

SAE INTERNATIONAL. **Formula SAE: Rules 2022**. Disponível em: <https://www.fsaeonline.com/cdsweb/gen/DocumentResources.aspx>. Acesso em 15/01/2022.

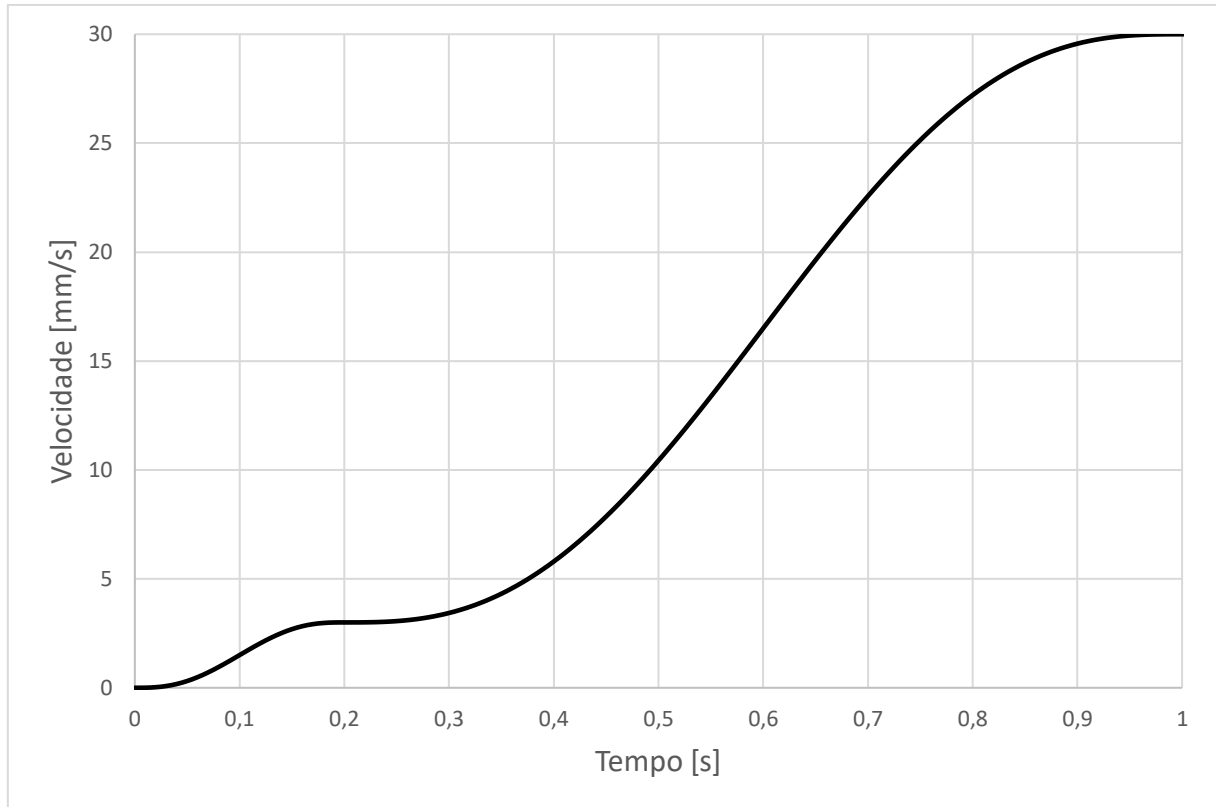
SEWARD, D. **Race Car Design**. Reino Unido: Palgrave, 2014.

SIMULIA. **Getting Started with Abaqus: Interactive Edition**. 2013

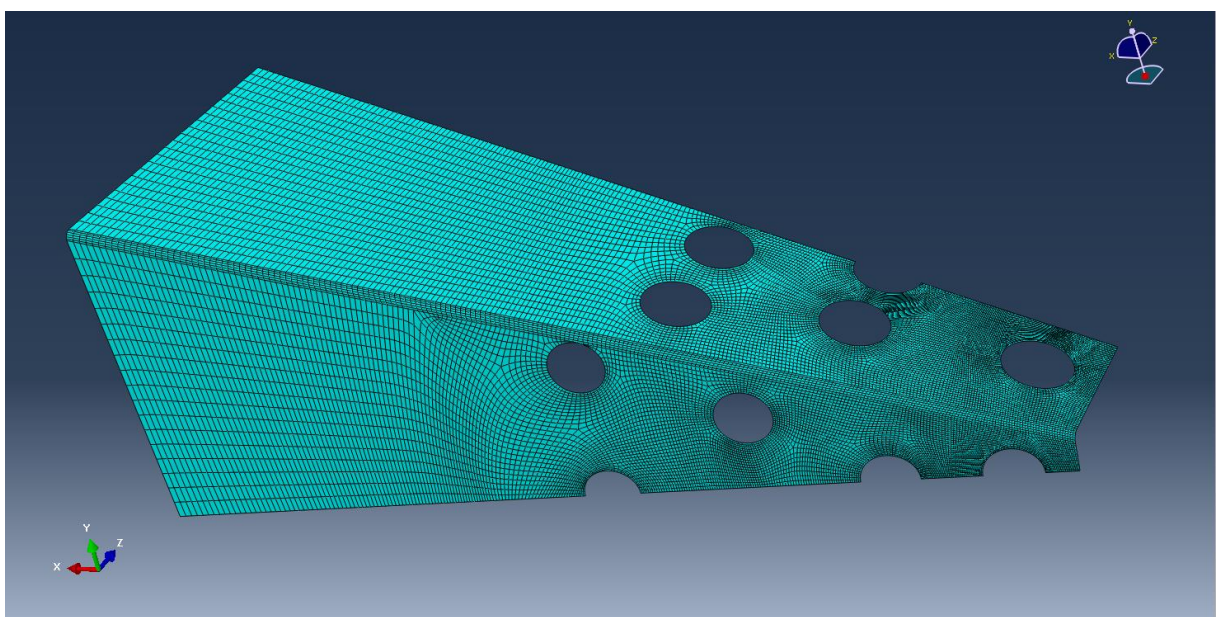
SIMULIA. **Abaqus Analysis User Guide**. 2014

APÊNDICE

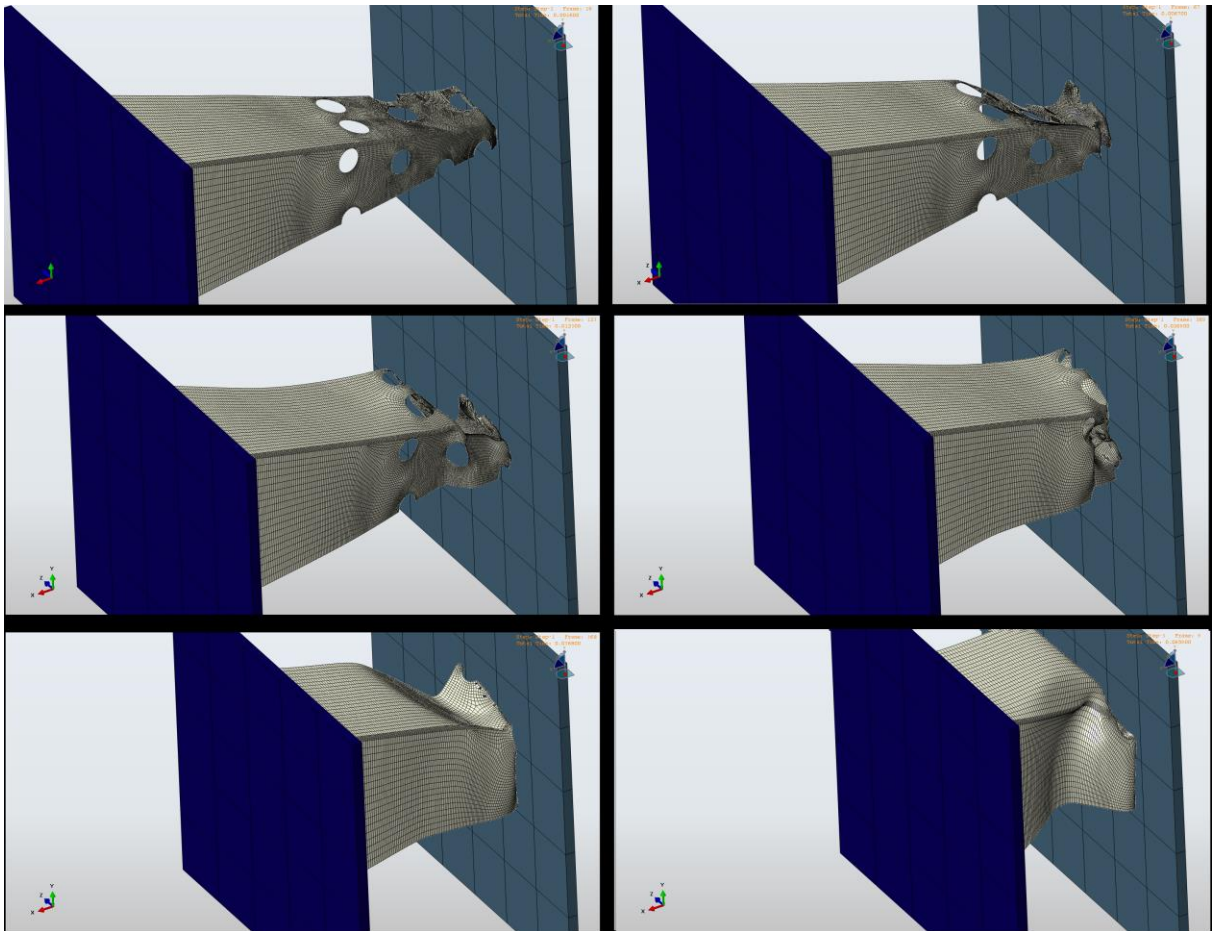
Apêndice 1: gráfico mostrando como a velocidade varia de zero a 1s de tempo no ensaio QE simulado.



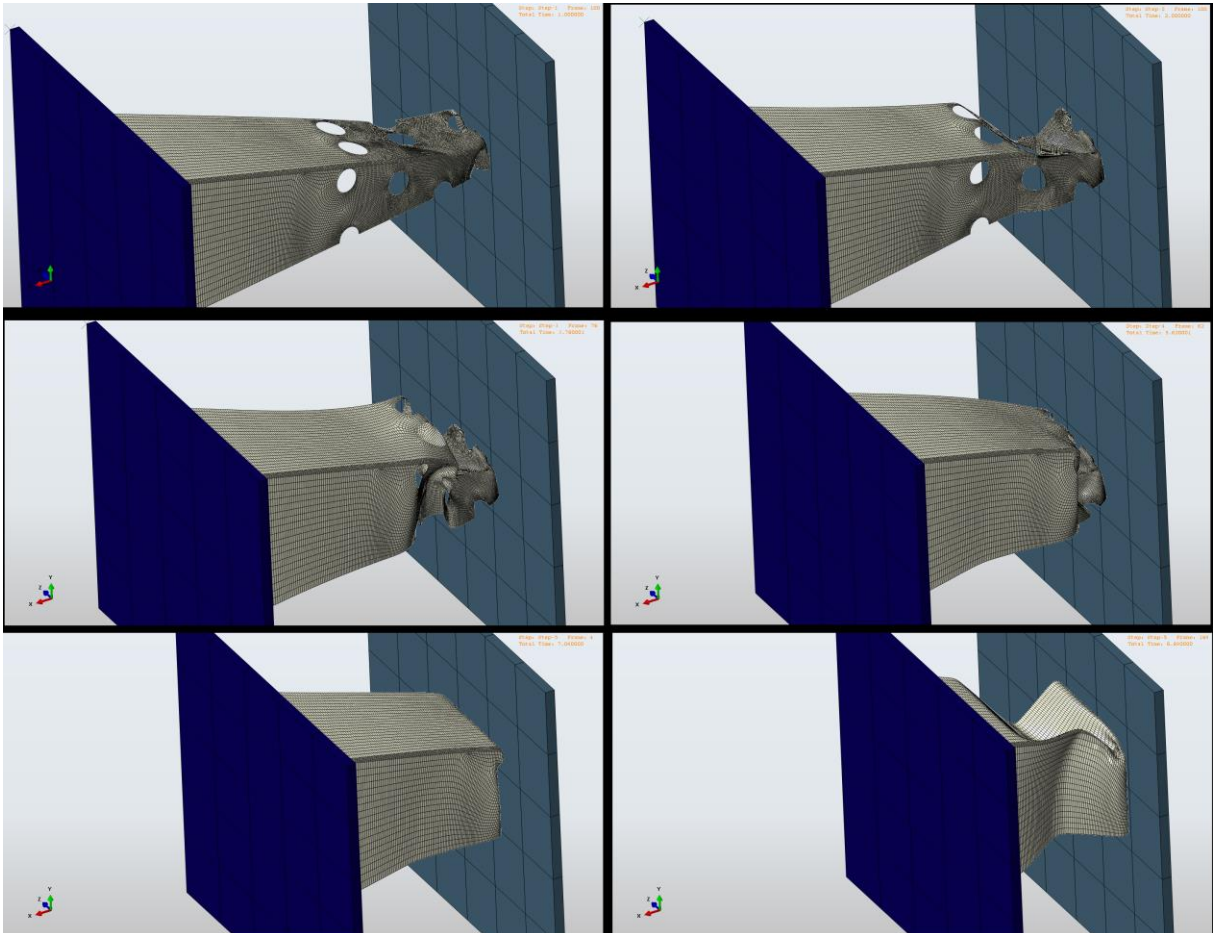
Apêndice 2: uma imagem da malha 5, que possui 20230 nós e 19536 elementos.



Apêndice 3: seis imagens mostrando a evolução da deformação no ED com MB, do início até o fim (ordem da esquerda para direita e de cima para baixo). O uso dos outros dois modelos gera um histórico de deformações semelhante visualmente.



Apêndice 4: seis imagens mostrando a deformação do EQE do início ao fim (ordem da esquerda para direita e de cima para baixo), usando o MJC com termo de taxa de deformação e sem considerar dano, que se deforma muito parecido com os outros que usam MJC; e até o momento da quinta imagem, é parecido com a deformação empregando MB. A grande diferença ocorrida após o instante da quinta imagem é mostrada na Figura 7.



ANEXO

Anexo 1: figura com representação esquemática de como o dano afeta a rigidez e tensão de escoamento do material no Abaqus. $\bar{\sigma}$ neste caso representa a tensão se não houvesse dano.

Fonte: (SIMULIA, 2014)

