

## APLICAÇÃO DE METAMATERIAIS PARA ATENUAÇÃO DE CARGAS DE IMPACTO

Guilherme Lamenha Gonçalves Junior (IC), Jesús Antonio García Sánchez (PQ)<sup>1</sup>  
Universidade Federal de Itajubá

**Palavras-chave:** Análise Dinâmica, Atenuação de Impacto, Metamaterial, Simulação Numérica

### Introdução

Os metamateriais são estruturas projetadas por meio de repetições periódicas de células para constituírem propriedades únicas, demonstrando um potencial de alta aplicabilidade na engenharia. O estudo apresentado neste artigo busca modificar uma estrutura de metamaterial existente na literatura para estudar seu comportamento perante cargas de impacto longitudinais com objetivo de demonstrar a aplicabilidade de uma estrutura metamaterial quiral em dissipação de energia de cargas de impacto longitudinais. Inicialmente foi realizada uma análise com a estrutura adaptada a treliças – denominada estrutura célula quiral – para verificar seu comportamento mecânico perante carga de impacto (CI). Posteriormente, foi proposta uma nova estrutura, denominada aqui como estrutura de célula referência, onde era mantida, em parte, uma equivalência à quiral – mantendo o número de elementos de barra e dimensões, mas eliminando o efeito quiral. Para isso, foi necessário demonstrar, por comparação com a estrutura de referência, como a estrutura quiral se comportava e sua alta capacidade de dissipação de energia por meio da sua deformação de torção em relação ao seu eixo axial. Para esse fim, utilizou-se da ferramenta Explicit Dynamics do ANSYS®, desenvolvendo cenários de impacto com condições de contorno apropriadas.

### Metodologia

O procedimento empregado para a pesquisa se deu a partir da recriação da célula de referência, em princípio foi pensado em validação do artigo de referência de YASUDA, H. et al (2019), entretanto, em meio ao processo se prosseguiu na alteração da estrutura para

treliças, com fim de amplificar as possíveis áreas de atuação e simplificar a construção.

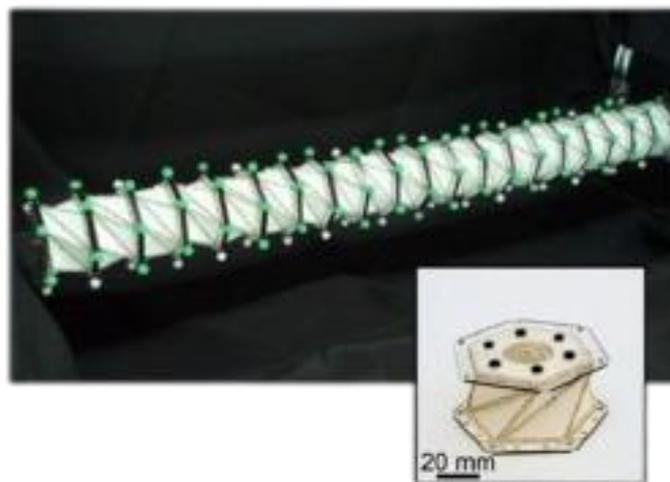


Figura 1 - Estrutura de referência YASUDA (2019)

Desta forma, foi analisado as diretrizes do artigo de referência e os seus métodos empregados para o desenvolvimento da célula, assim como a rotação empregada entre cada célula. A partir disso, foi feita a célula no software *Spaceclaim*® da ANSYS®, O processo se deu com o dimensionamento da estrutura (4 células sobrepostas, cada uma contendo um hexágono de diâmetro 25mm como base inferior e superior, totalizando uma altura de 100mm da estrutura) e definição dos perfis de treliça circular (1mm de raio). Desta forma, foi feita a estrutura célula quiral (ECQ) e estrutura célula referência (ECR), figura (2).

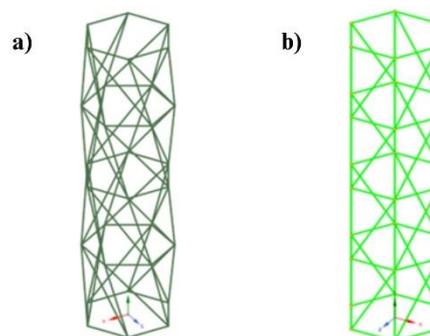


Figura 2 - Estruturas utilizadas: a) ECQ; b) ECR

A necessidade da construção da célula ECR se deu ao pensar em um modelo capaz de ser comparativo à estrutura previamente desenvolvida (ECQ), então se chegou à conclusão de que o modelo mais coerente a ser feito para comparar era uma estrutura de mesmas dimensões, mas com somente um fator adverso à estrutura original, mas também possuindo o mesmo número de treliças, para manter a distribuição de cargas de forma semelhante. Dessa forma, foi feita uma estrutura que somente não apresentasse a rotação entre as células subsequentes, tendo todas direcionadas de forma paralela ao eixo axial.

Após isso, foram feitos testes para verificar se a modelagem estava coerente e apresentando resultados físicos reais como análise modal e estática estrutural. Visto que a análise modal tende a retornar bons resultados quando a modelagem está coerente e bem feita, enquanto a estrutural, por ter seu tempo de análise mais rápido, pode denotar possíveis erros e facilitar o processo.

A partir disso, foi feito um teste com CI sobre cada uma das estruturas, para entender sua forma de deformação, sendo essa esperada a de torção em torno de seu eixo axial – como prevista pelos artigos de referencial teórico. Além de analisar a diferença apresentada entre as forças de reação propostas por cada estrutura, figura (3).

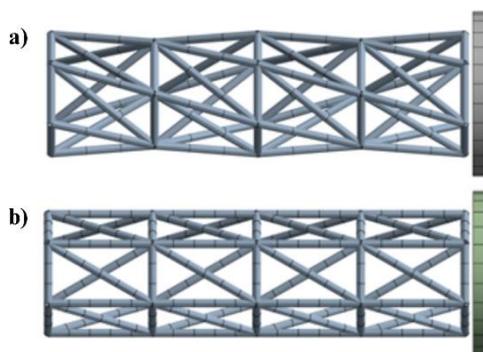


Figura 3 - Estruturas analisadas com carga de impacto: a) ECQ; b) ECR

Como o propósito da pesquisa era o de ampliar as aplicabilidades da estrutura de referência, buscou-se a criação de uma placa sanduíche com chapa superior e com o interior disposto das estruturas. Com isso, chegou-se a uma disposição contendo 503 estruturas (chapa de 1,5m de largura e 0,6m de comprimento, contendo 3mm de espessura). Observando que a disposição entre as células foi feita de forma linear, notou-se a repetibilidade do sistema e a capacidade de simplificação da análise para somente uma pequena parte, pois os custos computacionais de se testar a estrutura como um todo seriam imensos, figura (4).

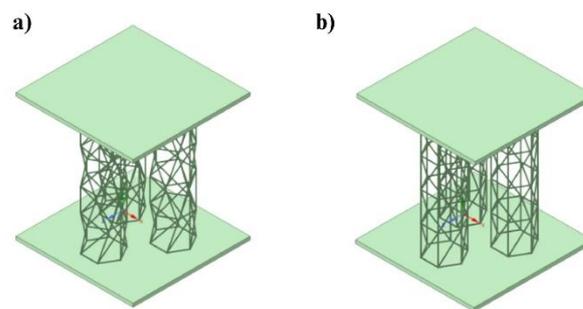


Figura 4- Fração placa sanduíche: a) Fração ECQ; b) Fração ECR

A análise de impacto na fração da placa foi feita de forma parecida com a realizada sobre a estrutura original e a comparativa singularmente, entretanto, CI seria um corpo se impactando em toda a placa, então foi necessário também o corte desse corpo para que se mantivesse a análise sob a fração da placa de forma consistente, as condições de contorno empregadas na análise seguem na figura (5).

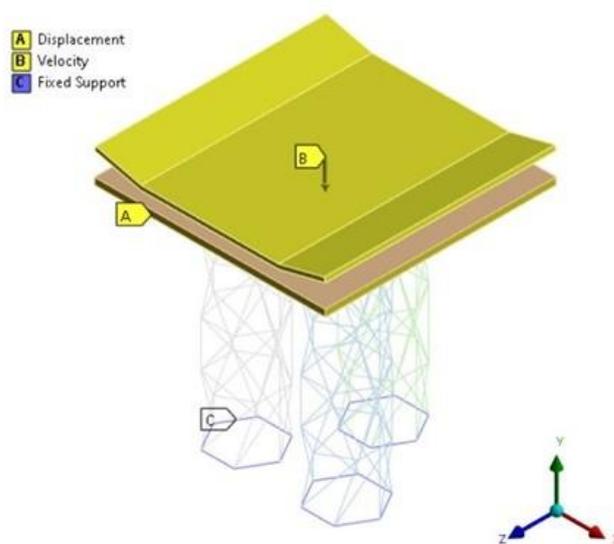


Figura 5- Fração ECQ com condições de contorno empregadas no software

## Resultados e discussão

A partir das simulações apresentadas, obteve-se os resultados tabelados. Com isso, foi possível plotar os gráficos de força de reação, deslocamento de nó e deformação. Tendo como importante ponto do trabalho os gráficos de força de reação e o de deslocamento do nó. Para a análise obtida, leva-se em consideração que as curvas em laranja denotam ECR enquanto as azuis a ECQ. A pesquisa se baseia na iniciativa de diminuição da força de resposta a um impacto, tendo como iniciativa a dissipação da energia, portanto, é necessário que a força

de resposta ao impacto no eixo longitudinal (eixo Y positivo – visto que o corpo de impacto está em direção ao eixo Y negativo) seja a menor possível.

A partir dos dados de impacto gerados pelo software ANSYS®, foi possível plotar o gráfico pertencente à figura (6) que contém a comparação entre a força de reação na direção do longitudinal à CI.

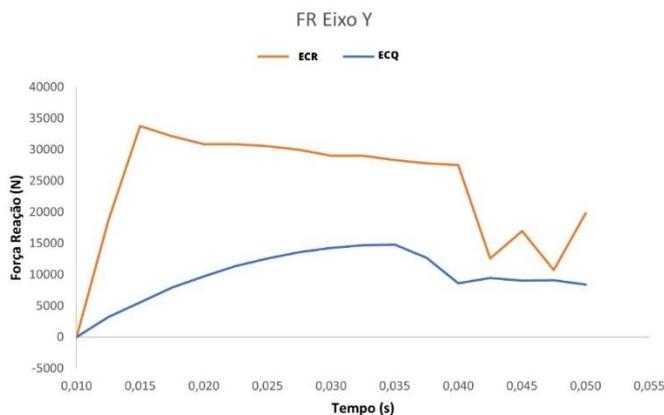


Figura 6- Força de reação comparativa ao impacto, eixo Y

Este gráfico foi gerado a partir da força de reação estipulada como resposta ao impacto no ponto na condição de contorno *Fixed Support* no teste de impacto da estrutura singular, como previsto na (5). É importante se notar como a estrutura ECQ obteve uma resposta máxima ao impacto na direção longitudinal de cerca de 43% comparada com a resposta da ECR. Após os testes de força de reação da célula unitária, seguiu-se para os testes de deslocamento e força de reação da fração da placa sanduíche para ambas as estruturas.

Após a solução dada pelo solver, foi analisada o deslocamento da fração placa para ambas as estruturas, ECQ e ECR, notando que a deformação da ECQ ocorreu de uma forma mais controlada por meio da torção, enquanto houve flambagem na ECR. Entretanto a ECR, como previsto, tem uma amplitude de deslocamento menor. Após a resolução do solver acerca da CI apresentada à estrutura simplificada (fração parede), foi seguido o procedimento de análise das deformações, forças de reação e deslocamento dos nós. Acerca da força de reação, foi plotado um gráfico comparativo, assim como a figura (6), entre a força de reação da ECR e da ECQ, obtendo-se a figura (7).

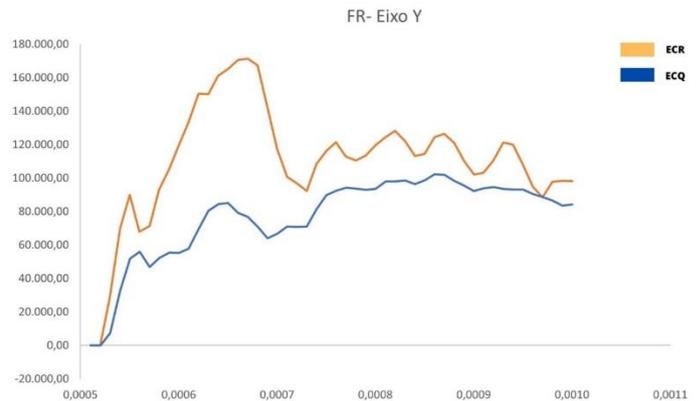


Figura 7- Força de reação comparativa ao impacto na fração parede, eixo Y

Após isso, é possível notar como houve uma diminuição da resposta longitudinal ao impacto na ECQ, sendo ela cerca de 60% da resposta dada pela ECR – considerando a resposta máxima apresentada entre a ECR e a ECQ.

Buscou-se analisar o movimento de um nó em específico da estrutura, entre a primeira célula a receber o impacto e a segunda, para se ter uma análise da onda solitária de rarefação e ver se ela ocorreu durante o processo de deformação da estrutura. Com isso, foi captado os pontos de deslocamento do nó e plotado os gráficos de deslocamento nos eixos X e Y das células 1 e 2 que compõem cada estrutura, sendo a célula 1 a primeira a receber o impacto e a 2 a seguinte à célula 1. A partir da análise foi observado que a ECQ deforma de uma maneira mais linear no eixo Y na primeira célula por conta da sua contração, entretanto na direção do eixo X ela rotaciona e apresenta um retorno posterior, devido à presença da onda solitária de rarefação que propagou o impacto após a torção. Enquanto a alta variação apresentada no eixo X pela ECR, isso se deve ao fato de a estrutura, quando comprimida, expandiu e contraiu, gerando o sinal de picos e vales consecutivos. O deslocamento apresentado pela segunda célula da ECQ é de menor intensidade do que o da primeira célula, isso se deve ao fato da dissipação de energia exercida pela rotação da estrutura. Enquanto isso, a ECR continua a apresentar efeitos de expansão e contração com o impacto, mas desta vez de forma menos acentuada no eixo X e mantendo a sua deformação próxima à apresentada pela primeira célula no eixo Y.

Foi observado que havia o potencial de que a estrutura, quando soldada em ambas as superfícies, apresentasse a perda do seu efeito quiral por conta da impossibilidade de rotação. Com isso, buscou-se analisar essa teoria utilizando a estrutura da figura (4) nas análises ao invés da figura (5) – Alterou-se portanto que o ponto *fixed support* da estrutura foi a placa inferior e não mais

a base da ECQ. Após a apresentação de dados do solver foi possível plotar o seguinte gráfico comparativo entre as diferentes estruturas:

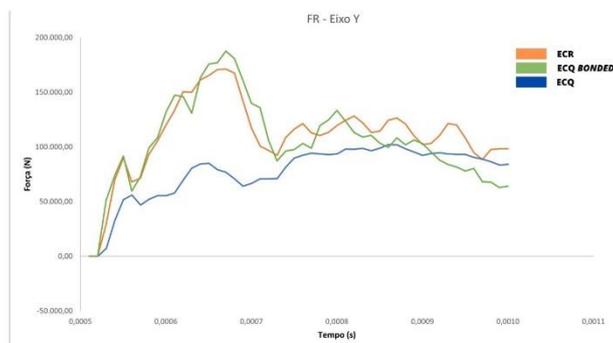


Figura 8- Força de reação comparativa ao impacto na fração parede de todas as estruturas - eixo y

É notório que a hipótese anteriormente citada se demonstrou correta, a resposta apresentada pela estrutura sem extremidades livres, denominada de ECQ Bonded (curva verde da figura (8)), apresentou o mesmo grau de resposta da ECR, tornando-se assim ineficiente em dissipar energia do impacto.

### Conclusões

Este artigo em questão analisou a capacidade da estrutura quiral em absorção de impactos, utilizando-se de métodos numéricos por meio de uma geometria tridimensional adaptada de referência. O presente artigo foi sucinto em demonstrar a capacidade da estrutura quiral em absorver energia devido ao seu comportamento de deformação único de rotação em torno de seu eixo axial ao ser comprimido, convertendo uma força unidimensional em uma resposta tridimensional. Entretanto, essa capacidade gera uma deformação plástica mais acentuada na estrutura, mas com benefícios amplos. Um resumo do que foi observado e encontrado na pesquisa:

- i. O painel sanduíche proposto de célula rotacionada, quiral, exibe uma deformação mais acentuada, mas com respostas de reação muito menores quando se comparado a uma estrutura parecida, mas não quiral.
- ii. A análise de deslocamento de um nó da estrutura foi capaz de comprovar a rotação da estrutura e o seu efeito de criação de ondas solitárias de rarefação.
- iii. A estrutura de referência não foi capaz de atenuar a carga de impacto na direção longitudinal, isso é observado analisando o deslocamento de nós entre cada célula, notando-se que não há diminuição desse deslocamento, portanto, não houve diminuição na resposta entre cada célula.

iv. A estrutura de célula quiral foi considerada ineficiente soldada em ambas as superfícies, apresentando a perda do seu efeito quiral por conta da impossibilidade de rotação em torno de seu eixo axial, com isso, incapaz de dissipar energia. Assim, reforçando o fato de que a quiralidade é um fator crucial.

Com isso, espera-se que a aplicação desta configuração para obtenção de estruturas leves, absorvedoras de energia e capazes de suporte de alta carga, como painéis multifuncionais, escudos resistentes a impactos e camadas de amortecimento. Entretanto, observa-se que ainda há muito o que ser analisado e esta pesquisa deixa muitas dúvidas que são complexas de serem respondidas, pois demandam muita pesquisa, análise matemática, física e experimental, tais como: carga máxima suportada por essa estrutura; tensões em seus nós; conceito de fadiga – por conta de seu efeito torcional, pode estar mais sujeita à fadiga; possível otimização da estrutura para aplicação em painéis sanduíches, visto que ela obteve melhores resultados como analisada sua capacidade singular de amortecimento.

### Agradecimentos

Dedico este agradecimento a todos que tornaram possível esta pesquisa, primordialmente à instituição UNIFEI que me destinou uma bolsa de auxílio à pesquisa, mas principalmente ao meu coordenador, Jesús Antonio García Sánchez, e ao seu grupo de pesquisa e estudos MSU – Metamaterial Structures UNIFEI – que me engrandeceram como estudante e ampliaram minhas perspectivas.

### Referências

YASUDA, H. et al. Origami-based impact mitigation via rarefaction solitary wave creation. *Science Advances*, v. 5, n. 5, p. eaau2835, maio 2019.