

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO
SUCKOW DA FONSECA CEFET/RJ**

**Modelagem de uma base de fixação de uma bandeja
de suspensão automotiva com material
Pseudoelástico**

Bruno Diogo Abrahão

João Ricardo Santos Soares

Prof. Orientador: Pedro Manuel Calas Lopes Pacheco

Rio de Janeiro

Junho de 2016

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO
SUCKOW DA FONSECA CEFET/RJ**

**Modelagem de uma base de fixação de uma bandeja
de suspensão automotiva com material
Pseudoelástico**

Bruno Diogo Abrahão

João Ricardo Santos Soares

Projeto Final apresentado em cumprimento das normas do Departamento de Educação Superior do CEFET/RJ como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia mecânica.

Prof. Orientador: Pedro Manuel Calas Lopes Pacheco

Rio de Janeiro

Junho de 2016

Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

A159 Abrahão, Bruno Diogo
Modelagem de uma base de fixação de uma bandeja de
suspensão automotiva com material pseudoelástico / Bruno Diogo
Abrahão, João Ricardo Santos Soares.—2016.
xi, 56f. + apêndices : il. (algumas color.) , grafs. , tabs. ; enc.

Projeto Final (Graduação) Centro Federal de Educação
Tecnológica Celso Suckow da Fonseca , 2016.

Bibliografia : f. 54-56

Orientador : Pedro Manuel Calas Lopes Pacheco

1. Engenharia mecânica. 2. Vibração. 3. Automóveis –
Amortecedores. 4. Ligas com memória de forma. 5. Método dos
elementos finitos. I. Soares, João Ricardo Santos. II. Pacheco,
Pedro Manuel Calas Lopes (Orient.). III. Título.

CDD 621

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a Deus por ter nos capacitado e ter nos dado saúde para fazer o curso de graduação em Engenharia Mecânica industrial.

As nossas famílias que sempre deram o apoio, incentivo, educação e o suporte financeiro necessários para que o sonho da conclusão do curso se realizasse mesmo em meio a tantas dificuldades enfrentadas.

As nossas namoradas que são companheiras pelo: apoio, incentivo, carinho e paciência acreditando em nós.

Ao professor orientador Pedro Manuel Calas Pacheco pelos ensinamentos e orientação durante o Projeto Final.

Agradecemos ao professor Fernando Ribeiro da Silva pela paciência e disponibilidade em nos ajudar com o modelo no pacote computacional Matlab 2015.

Agradecemos a instituição CEFET/RJ por ter nos dado uma base sólida no curso de Engenharia Mecânica Industrial.

RESUMO

Automóveis estão presentes na vida de cidadãos no mundo todo, e com o passar dos anos novas tecnologias são empregadas para melhorar seu desempenho e conforto. O sistema de amortecimento de um veículo é um de seus componentes mais importantes e tem como função atenuar as vibrações mecânicas promovidas por irregularidades na via. As Ligas com Memória de Forma (SMA – *Shape memory alloy*) são consideradas materiais inteligentes que possuem características especiais que têm levantado o interesse para o seu uso em diversos problemas de engenharia. Um dos efeitos presentes nas SMAs é o comportamento pseudoelástico para o qual observa-se a presença de um laço de histerese na curva tensão-deformação, o qual está associado a dissipação de energia. O comportamento histerético tem motivado o desenvolvimento de estudos de aplicações na área de atenuação de vibrações. Este trabalho tem como objetivo analisar o desempenho de um elemento de SMA para reduzir as vibrações mecânicas transmitidas ao chassi de um veículo automotivo. Um elemento de SMA posicionado na base de fixação de uma bandeja de suspensão automotiva é analisado utilizando um modelo baseado no Método de Elementos Finitos. Para estimar um coeficiente de amortecimento equivalente. O comportamento dinâmico do veículo é estudado através de um modelo simplificado do tipo massa-mola-amortecedor, sendo as equações do movimento resolvidas através de código desenvolvido no pacote Matlab. O modelo simplificado desenvolvido considera o elemento SMA utilizado na base de fixação da bandeja como uma viga engastada sofrendo os esforços em operação. Os resultados mostram que a metodologia desenvolvida permite avaliar o desempenho de elementos de SMA na redução de vibrações mecânicas em veículos automotivos.

Palavras Chaves: Ligas com Memória de Forma, Pseudoelasticidade, Amortecimento Histerético, Vibrações, Método de Elementos Finitos

ABSTRACT

Automobiles are present in the life of citizens all over the world, and over the years new technologies have been developed to improve its comfort and performance. The damping system of a vehicle is one of its most important components and it has as function to minimize the mechanical vibrations promoted by track irregularities. Shape Memory Alloys (SMA) are intelligent materials that have special characteristics, which are proving to be interesting for engineering problems. One of the present effects at the SMAs it is the pseudo elastic behavior for which is possible to observe the presence of a hysteresis at the stress-strain curve, associated with the energy dissipation. The hysteretic behavior is motivating the development of studies of applications on the area of mechanical vibration attenuation. This project has as objective to analyze the performance of a SMA element used to reduce the mechanical vibrations transmitted to a vehicle's body. A SMA element positioned at the fixation basis of a vehicle suspension is analyzed using a model based on the Finite Element Method. To assess the equivalent damping coefficient. The dynamic behavior of the vehicle is studied through a simplified mass-spring-damper model, being the equations of movement solved through a code developed Matlab package. The proposed model considers the SMA element at the fixing base from the tray as a clamped beam under the influence of the operation efforts. The results show that the developed methodology allows evaluating the performance of SMA elements on the reduction of mechanical vibrations in vehicles.

Keywords: Shape Memory Alloy, Pseudoelasticity, Hysteretic Damping, Vibrations, Finite Elements Method

SUMÁRIO

Capítulo 1. Introdução.....	1
Capítulo 2. Vibrações e Amortecimento em Sistemas de Suspensão Automotiva.....	3
II.1 Vibrações e Amortecimento.....	3
II.2 Sistema de Suspensão Automotiva.....	4
II.2.1 Tipos de Suspensões.....	4
II.2.1.1 Suspensão Independente Macpherson.....	5
II.2.1.2 Suspensão Independente Duplo A.....	5
II.2.1.3 Suspensão Independente Multilink.....	6
II.2.1.4 Suspensão Traseira com Eixo Rígido.....	7
II.2.1.5 Suspensão Pneumática.....	7
II.2.1.6 Suspensões Horizontais.....	8
II.2.2 Principais Componentes de uma Suspensão.....	9
II.2.2.1 Molas.....	9
II.2.2.2 Amortecedores.....	11
II.2.2.3 Bandeja.....	13
II.2.2.4 Barra Estabilizadora.....	13
Capítulo 3. Ligas com Memória de Forma.....	14
III.1 Comportamento Termomecânico.....	16
III.2 Efeito Pseudoelástico.....	17
III.3 Efeito de Memória de Forma.....	18
III.4 Modelos Constitutivos.....	20
III.5 Aplicações das Ligas SMA.....	21
III.5.1 Controle Vibracional em Estruturas Adaptativas.....	21
III.5.2 Área Aeronáutica.....	21
III.5.3 Área Médica.....	22
III.5.4 Outras Áreas.....	23
III.5.5 Aplicações de materiais inteligentes.....	23

Capítulo 4. Modelo Numérico para a Determinação do Coeficiente de Amortecimento Equivalente.....	24
IV.1 Geometria.....	25
IV.2 Malha e Análise Convergência.....	26
IV.3 Condições de Contorno e Carregamento Mecânico.....	27
IV.4 Simulações Numéricas.....	28
Capítulo 5. Análise do Efeito do Amortecimento no Comportamento Dinâmico.....	32
V.1 Simulação com Velocidade de 2,7 m/s.....	36
V.2 Simulação com Velocidade de 13,8 m/s.....	38
V.3 Simulação com Velocidade de 22,2 m/s.....	40
V.4 Velocidade Vibracional a 2,7 m/s.....	43
V.5 Velocidade Vibracional a 13,8 m/s.....	45
V.6 Velocidade Vibracional a 22,2 m/s.....	47
V.7 Resultados.....	49
Capítulo 6. Conclusões.....	52
VI.1 Sugestões.....	53
Capítulo 7. Referências Bibliográficas.....	54
Apêndice I. Rotina em Ansys.....	57
Apêndice II. Rotina no Matlab.....	65

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: Suspensão automotiva com sustentação para bandeja.....	04
FIGURA 2: Sistema de suspensão Macpherson.....	05
FIGURA 3: Sistema de suspensão do tipo duplo A.....	06
FIGURA 4: Sistema de suspensão Multilink.....	06
FIGURA 5: Suspensão traseira com eixo rígido.....	07
FIGURA 6: Suspensão pneumática.....	08
FIGURA 7: Suspensão horizontal.....	08
FIGURA 8: Feixe de molas.....	09
FIGURA 9: Deslocamento do feixe de molas.....	09
FIGURA 10: Funcionamento do feixe de molas.....	10
FIGURA 11: Mola helicoidal.....	10
FIGURA 12: Amortecedor automotivo.....	11
FIGURA 13: Ciclos do amortecedor.....	12
FIGURA 14: Bandeja de suspensão automotivo.....	13
FIGURA 15: Desenho esquemático de uma barra estabilizadora destacada em vermelho.....	13
FIGURA 16: Transformação martensítica e histerese	15
FIGURA 17: Transformação de fase das ligas SMA.....	16
FIGURA 18: Contraste entre uma liga comum, o efeito memória de forma e o efeito pseudoelástico.....	17
FIGURA 19: Gráfico Tensão x Deformação de um carregamento e descarregamento de uma liga SMA.....	18
FIGURA 20: Efeitos de memória de forma: (a)one –way e (b)two-way.....	19
FIGURA 21: Modelo constitutivo de Aurichio.....	20
FIGURA 22: Mancal com placas de SMA.....	21
FIGURA 23: Conexão com o atuador e fios de SMA nos flaps das asas de aviões.....	21
FIGURA 24: Atuadores para redução de ruídos de motores a jato.....	22
FIGURA 25: Dispositivos endovasculares.....	22

FIGURA 26: Materiais inteligentes: (a) amortecedor com fluido magneto reológicos e (b) placas piezo cerâmicas.....	23
FIGURA 27: Base de fixação de uma bandeja.....	24
FIGURA 28: Modelo de viga engasta com carregamento de flexão pura.....	25
FIGURA 29: Viga engastada em perspectiva.....	25
FIGURA 30: Dimensões da viga.....	26
FIGURA 31: Modelo de malha utilizada.....	26
FIGURA 32: Análise de convergência.....	27
FIGURA 33: Viga com os <i>keypoints</i>	28
FIGURA 34: Distribuição da tensão equivalente de <i>von Mises</i> no valor máximo de carregamento aplicado.....	29
FIGURA 35: Distribuição de tensão equivalente de <i>von Mises</i> para o step anterior ao descarregamento total.....	29
FIGURA 36: Distribuição da fração volumétrica de martensita na peça para o valor máximo de carregamento aplicado.....	30
FIGURA 37: Gráfico Momento x deslocamento.....	30
FIGURA 38: Vibração livre com excitação de base.....	32
FIGURA 39: Diagrama de corpo livre.....	33
FIGURA 40: Carro em pista com obstáculo de elevação y_0	35
FIGURA 41: Oscilação do veículo com o amortecimento de 3380.....	36
FIGURA 42: Oscilação do veículo com o amortecimento de 6761.....	36
FIGURA 43: Oscilação do veículo com o amortecimento de 11291.....	37
FIGURA 44: Oscilação do veículo com o amortecimento de 20282.....	37
FIGURA 45: Oscilação do veículo com o amortecimento de 3380.....	38
FIGURA 46: Oscilação do veículo com o amortecimento de 6761.....	38
FIGURA 47: Oscilação do veículo com o amortecimento de 11291.....	39
FIGURA 48: Oscilação do veículo com o amortecimento de 20282.....	39
FIGURA 49: Oscilação do veículo com o amortecimento de 3380.....	40
FIGURA 50: Oscilação do veículo com o amortecimento de 6761.....	40
FIGURA 51: Oscilação do veículo com o amortecimento de 11291.....	41
FIGURA 52: Oscilação do veículo com o amortecimento de 20282.....	41
FIGURA 53: Velocidade vibracional com amortecimento de 3380.....	43

FIGURA 54: Velocidade vibracional com amortecimento de 6761.....	43
FIGURA 55: Velocidade vibracional com amortecimento de 11291.....	44
FIGURA 56: Velocidade vibracional com amortecimento de 20282.....	44
FIGURA 57: Velocidade vibracional com amortecimento de 3380.....	45
FIGURA 58: Velocidade vibracional com amortecimento de 6761.....	45
FIGURA 59: Velocidade vibracional com amortecimento de 11291.....	46
FIGURA 60: Velocidade vibracional com amortecimento de 20282.....	46
FIGURA 61: Velocidade vibracional com amortecimento de 3380.....	47
FIGURA 62: Velocidade vibracional com amortecimento de 6761.....	47
FIGURA 63: Velocidade vibracional com amortecimento de 11291.....	48
FIGURA 64: Velocidade vibracional com amortecimento de 20282.....	48
FIGURA 65: Modelo com 1 grau de liberdade, desconsiderando o amortecimento e a rigidez dos pneus.....	50

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: Propriedades do material SMA.....	27
TABELA 2: Valores do Fator de Amortecimento para os valores de amortecimento.....	35
TABELA 3: Amplitude de Deslocamento e Tempo de Oscilação – Simulações Numéricas com MATLAB.....	42
TABELA 4: Pico de Velocidade e Número de Oscilações – Simulações Numéricas com MATLAB.....	49

Capítulo 1

Introdução

Com o constante desenvolvimento de novas tecnologias para o setor automotivo, o sistema de suspensão veicular ganhou novas formas e materiais específicos para um melhor conforto interno dos passageiros, maior segurança e redução no consumo de combustíveis.

O sistema de suspensão veicular deixou de ser um simples redutor de vibrações do solo para se tornar um elemento fundamental na escolha de um modelo de automóvel. Nas competições automobilísticas a geometria da suspensão é um elemento de profundos estudos e desenvolvimento para melhor desempenho. Com as constantes melhorias, novos materiais foram sendo incorporados nas suspensões automotivas como, por exemplo, a fibra de carbono, e estudos com novos materiais, como as ligas com memória de forma (SMAs – *Shape Memory Alloys*), vêm sendo desenvolvidos.

O projeto de uma suspensão veicular passou a levar em consideração diversos aspectos técnicos como: condições do terreno, dirigibilidade, esforço na direção, segurança dos passageiros, consumo de combustível, custo do projeto, montagem e manutenção, quilometragem máxima que os elementos da suspensão podem trabalhar com segurança, dimensões da geometria da suspensão, redução de peso, resposta em uma situação de frenagem, equilíbrio e estabilização do veículo em curvas entre outros (BUARQUE, 2004).

Os estudos com novos materiais para as suspensões vêm sendo desenvolvidos ao longo dos anos e as SMAs vêm sendo estudadas após a crescente utilização em outras áreas como, por exemplo, as áreas aeronáutica, robótica e médica. As SMAs apresentam diversos comportamentos especiais como os efeitos de memória de forma e o pseudoelástico. O comportamento pseudoelástico está associado a um comportamento histerético do material, onde se observa um processo de dissipação de energia, e pode ser utilizado na redução da transmissão de vibrações mecânicas para o chassi de veículos automotivos. A produção desse material também tem sido alvo de diversos estudos (OLIVEIRA, 2010).

Os sistemas de suspensão automotiva utilizadas nos veículos atuais apresentam um elemento de sustentação chamado de bandeja que dá sustentação às rodas e transmite as

vibrações ao chassi, onde esse elemento é fixado. Alguns automóveis utilizam o sistema de bandejas na suspensão dianteira e eixo rígido na traseira onde esses elementos dão a sustentação às rodas. Neste trabalho um elemento de SMA é introduzido em uma base de fixação para a bandeja. O elemento de SMA tem o objetivo de reduzir as vibrações mecânicas que chegam ao chassi através da dissipação de energia promovida por amortecimento histerético, de modo a obter-se uma maior dirigibilidade e conforto no automóvel.

Dois pacotes computacionais de simulação numérica são utilizados neste trabalho: Ansys (ANSYS 2015) e Matlab (MATLAB 2015). A metodologia proposta consiste primeiro, na determinação de um coeficiente de amortecimento histerético do elemento de SMA utilizando-se um modelo de elementos finitos simplificado, desenvolvido com o auxílio do pacote computacional Ansys. O elemento de SMA é modelado através de uma viga pseudoelástica engastada submetida a esforços de flexão pura. Apesar de existirem outros esforços internos presentes na peça, nas análises desenvolvidas consideram-se apenas esforços de flexão. Através da aplicação de um ciclo de carregamento-descarregamento foi gerado um laço de histerese, o qual foi utilizado para estimar um coeficiente de amortecimento histerético. Esse coeficiente foi, em seguida, utilizado em um modelo simplificado massa-mola-amortecedor, cujo comportamento dinâmico foi estudado utilizando o pacote computacional Matlab. O tema escolhido envolve estudos conjuntos de vibrações de sistema mecânicos e modelagem de componentes mecânicos através do método de elementos finitos

A indústria automotiva tem procurado inovações que possam ser um diferencial para seu desenvolvimento, segurança de seus clientes e menor custo dos seus produtos. Assim o estudo com novos materiais tem sido um foco nas pesquisas desse ramo levando a utilização de novos materiais como as SMAs.

Capítulo 2

Vibrações e Amortecimento em Sistemas de Suspensão Automotiva

II.1 Vibrações e Amortecimento

As vibrações mecânicas são movimentos que se repetem durante um determinado intervalo de tempo. O movimento de cordas de um instrumento musical quando dedilhadas é um exemplo de vibração. (Singiresu, Rao, 2009)

Qualquer máquina trabalhando, em condições de operação normais ou não, gera forças e oscilações. Quando essas forças se repetem em intervalos de tempo regulares gera vibrações mecânicas que podem ser prejudiciais ao equipamento ou ao operador, podendo ocasionar acidentes ou paradas de máquinas.

As vibrações podem ser classificadas em vários tipos (Singiresu, Rao, 2009):

Vibrações Livres: permanecem após uma perturbação inicial no sistema, sem a ação de nenhuma força externa.

Vibrações Forçadas: causadas pela influência de uma força externa cíclica aplicada no sistema, as vibrações geradas em máquinas em operação é um exemplo de vibração forçada.

Vibrações Não-Amortecidas: não existe nenhuma forma de dissipação de energia durante a oscilação.

Vibrações Amortecidas: existe dissipação de energia durante o processo oscilatório.

Tanto as vibrações livres quanto as forçadas podem ou não possuir amortecimento. Utiliza-se o amortecimento para impedir ou amenizar os efeitos nocivos que as vibrações podem causar as máquinas ou aos operadores, como por exemplo as vibrações transmitidas ao chassi de um automóvel. Com a criação de amortecedores para suspensões automotivas pode-se então evoluir no conforto, dirigibilidade e confiabilidade dos veículos.

Todo automóvel possui um sistema de suspensão para amenizar o impacto dos desníveis de terreno em seus componentes internos e no motorista. Esse sistema é projetado dependendo do tipo de terreno aonde o carro vai passar, e para que tipo de cargas foi projetado.

II.2 Sistema de Suspensão Automotiva

O sistema de suspensão de um veículo possui as funções de: dar a sustentação necessária ao automóvel, manter a estabilidade do veículo e absorver impactos causados por desníveis e avarias nas pistas por onde o veículo irá passar. Um modelo de suspensão dianteira de um veículo leve é mostrado na Figura 1 com a base de fixação na qual será estudada circulada em vermelho sendo esta peça uma base de sustentação e fixação para a bandeja.

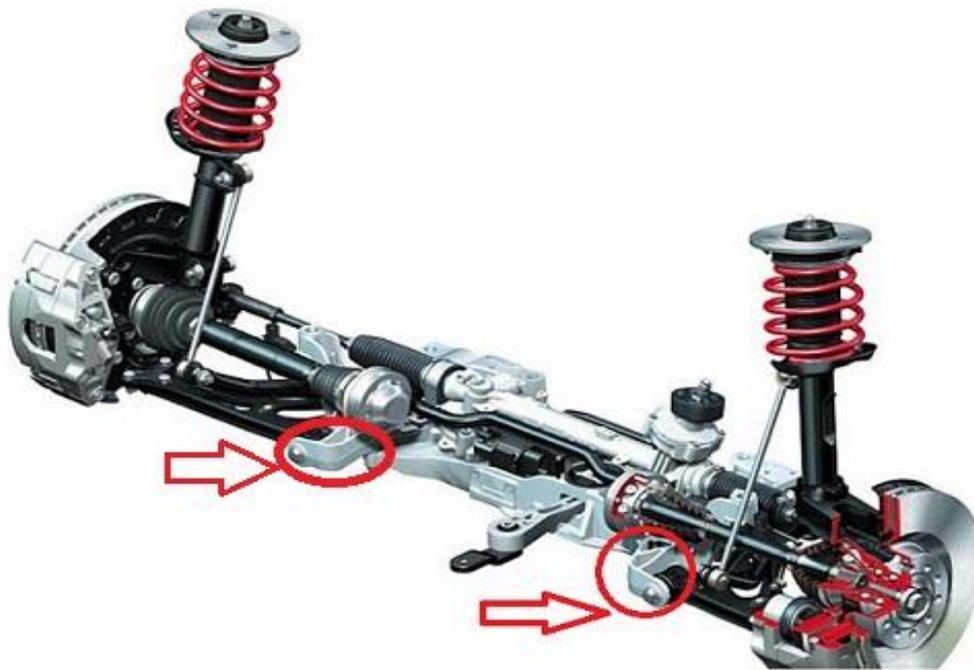


Figura 1: Suspensão automotiva com sustentação para bandeja/(Best cars,2015)

II.2.1 Tipos de Suspensões

Existem diferentes tipos de suspensões automotivas que evoluíram com o passar dos anos. Elas se diferenciam de acordo com: peso do veículo, tipos de veículo, terreno que será utilizado, forma geométrica, como será instalada, nível de conforto que a suspensão trará aos passageiros e nível de segurança e dirigibilidade que está terá para o condutor. A seguir serão citados alguns tipos de suspensões.

II.2.1.1 Suspensão Independente Macpherson

É um tipo de suspensão relativamente simples devido ao pouco número de peças que possui. A suspensão possui uma helicoidal, um amortecedor e um braço de controle para cada roda e geralmente é utilizada em suspensões dianteiras, como mostrado na Figura 2. Esses braços de controle são comumente chamados de bandejas e tem movimentação vertical.



Figura 2: Sistema de suspensão Macpherson (Razão automóvel,2015)

II.2.1.2 Suspensão Independente Duplo A

É um tipo de suspensão onde as rodas são sustentadas por dois triângulos que trabalham como braços onde dão a sustentação para as rodas, juntos com esses braços tem-se uma mola helicoidal e um amortecedor, sendo um conjunto por roda. Esse sistema de braços triangulares tem movimentação vertical e são atrelados ao chassi do automóvel como mostrado a Figura 3.



Figura 3: Sistema de suspensão do tipo duplo A (Quatro rodas, 2010)

II.2.1.3 Suspensão Independente Multilink

Nesse tipo de suspensão as rodas são conectadas ao chassi por vários braços como mostrado na Figura 4, o que possibilita um maior controle do movimento das rodas. Nesse caso tem-se três ou mais braços e um amortecedor e uma mola sendo um conjunto por roda. O sistema possibilita maior conforto e dirigibilidade porém tem um custo alto devido ao maior número de peças, sendo este sistema encontrado apenas em carros com mais luxo.



Figura 4: Sistema de suspensão Multilink (Quatro rodas, 2010)

II.2.1.4 Suspensão Traseira com Eixo Rígido

Os veículos populares utilizam um tipo de suspensão na dianteira e um outro tipo na traseira. Na suspensão dianteira utiliza-se um modelo Macpherson como já foi visto, e na suspensão traseira utiliza-se um sistema com um eixo rígido com as molas e os amortecedores apoiados nesse eixo, como mostrado na Figura 5. Alguns desses sistemas também utilizam uma barra anti torção. Esse sistema torna-se mais barato e simples para utilização em carros populares.

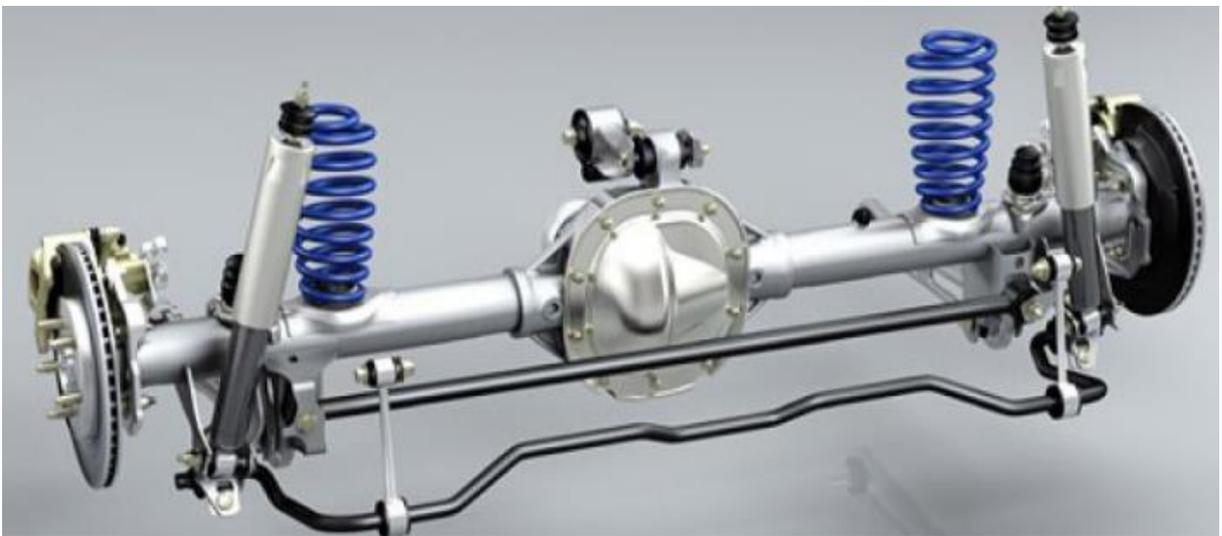


Figura 5: Suspensão traseira com eixo rígido (Circula seguro, 2013)

II.2.1.5 Suspensão Pneumática

As suspensões pneumáticas utilizam uma bolsa de material elastomérico, como mostrado na Figura 6, onde são cheias com ar, em alguns casos são utilizadas junto com as suspensões mecânicas. Quando são utilizadas juntas com as suspensões mecânicas elas substituem as molas pelas bolsas de ar e essas bolsas atuam em conjunto com um amortecedor. Em alguns ônibus o sistema substitui totalmente o sistema mecânico atuando sozinho como mola e amortecedor. As bolsas de ar são infladas por uma fonte externa (compressor) e possuem uma válvula de alívio para controle da pressão interna e ajuste de regulagem conforme peso do

veículo e terreno por onde está trafegando. Apesar do conforto gerado esse tipo de suspensão possui valor alto, necessita de espaço para acomodação das bolsas de ar e há um grande consumo da força gerada pelo motor.



Figura 6: Suspensão pneumática (Cargo Bull 2009)

II.2.1.6 Suspensões Horizontais

Esse tipo de suspensão é utilizado em veículos de competições e com apelo esportivo. As suspensões horizontais, como mostrado na Figura 7, possuem braços que sustentam as rodas e possuem movimento vertical e molas e amortecedores que são posicionados na horizontal sendo um para cada roda. Neste caso consegue-se um modelo de suspensão que proporciona um veículo mais próximo do solo diminuindo assim a quantidade de ar que passa por baixo do veículo, mas nesse caso não se tem o conforto de outros tipos de suspensão.



Figura 7: Suspensão horizontal (Car place, 2012)

II.2.2 Principais Componentes de uma Suspensão

Um sistema de suspensão apresenta diversos componentes que possuem funções específicas. A seguir apresentam-se os principais elementos com uma descrição resumida.

II.2.2.1 Molas

Compõem a função de absorver as irregularidades da pista e trabalha em conjunto com o amortecedor.

Feixe de molas:

Os feixes de molas são um tipo de mola empregado em forma de um jogo de laminas de aço, que geralmente é empregado em caminhões e veículos pesados. É feito pela sobreposição de feixes de comprimentos diferenciados, isso faz com que a carga se distribua de forma igual em toda a extensão da mola. A Figura 8 apresenta um exemplo de feixe de molas e a Figura 9 apresenta um exemplo do deslocamento desse feixe quando solicitado.



Figura 8: Feixe de Molas (Friscar engates, 2008)

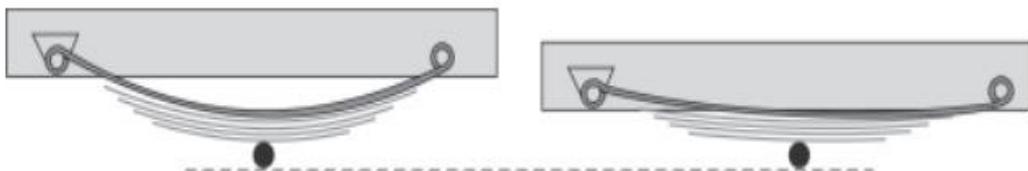


Figura 9: Deslocamento do feixe de molas (VWCCO,2001)

A primeira lâmina do feixe possui, em cada uma de suas extremidades, um olhal enrolado na própria barra que envolve uma bucha de metal e borracha, como mostrado na Figura 10, utilizada como suporte do feixe. A extremidade dianteira tem sua posição fixa, apoiada no quadro do chassi por um suporte, enquanto a outra, traseira, é apoiada em um mancal móvel que dá à mola a liberdade de movimentação durante o deslocamento do veículo com carga, quando ocorre um alongamento da distância entre os olhais dianteiro e traseiro. (VWCCO, 2001).

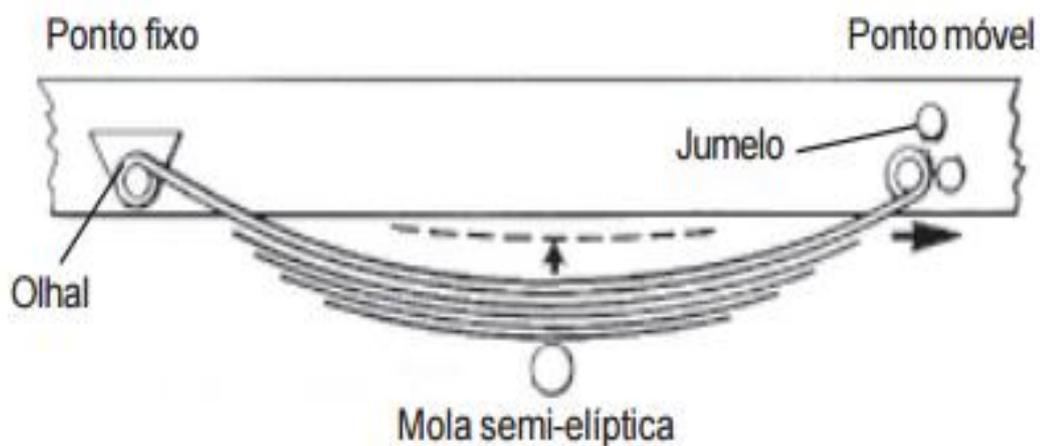


Figura 10: Funcionamento do feixe de molas (VWCCO, 2001)

Molas Helicoidais:

As molas helicoidais, como mostrado na Figura 11, são o tipo mais comum de mola utilizado em sistemas de amortecimento. Geralmente são aplicadas em veículos leves. Consistem geralmente de uma barra de aço enrolada em torno de um eixo.



Figura 11: Mola Helicoidal / (VWCCO, 2001)

Molas helicoidais apresentam a característica de grande coeficiente de elasticidade em função de seu projeto de construção. São amplamente aplicadas em veículos de passeio ou comerciais leves, pois a condição de transporte do “volume” prevalece sobre o “peso” da carga. É construída por um arame de aço enrolado em forma de espiral. (VWCCO, 2001).

II.2.2.2 Amortecedores

A parte mais importante do sistema de amortecimento de um veículo, não é a mola mas sim o amortecedor, mostrado na Figura 12. “A não ser que haja um dispositivo de amortecimento, a mola de um carro aumentará e dissipará a energia absorvida em um impacto de maneira descontrolada”. (Carros uol, 2013).

Sem o amortecedor, a mola continuaria oscilando em sua frequência natural até que sua energia fosse dissipada naturalmente e ela parasse. Esse comportamento faria o carro oscilar muito, tornando impossível o controle do mesmo.



Figura 12: Amortecedor automotivo. (Torezzan pneus, 2000)

O amortecedor tem a capacidade de absorver as vibrações que são causadas nas molas pelos buracos ou discontinuidades na pista, transformando energia cinética em energia térmica através do fluido hidráulico que se encontra dentro dele.

O amortecedor é praticamente uma bomba de óleo. O mais comum é o amortecedor de dois tubos que possui dois tubos dentro de si, um interno e um externo e um pistão. O tubo interno é conhecido como tubo de pressão, já o externo é destinado a armazenar o excesso de fluido hidráulico.

Os amortecedores trabalham em dois ciclos, um de compressão e um de distensão como mostrado na Figura 13. O ciclo de compressão ocorre quando o pistão comprime o fluido hidráulico de baixo, enquanto que o ciclo de distensão ocorre quando o pistão sobe e comprime o fluido na câmara de cima.



Figura 13: Ciclos do amortecedor (Carros uol, 2013)

II.2.2.3 Bandeja

A bandeja faz parte do sistema de suspensão ligando a roda ao chassi do automóvel. Esse elemento se encontra o mais próximo do solo e por isso é o primeiro a receber o impacto sofrido pela suspensão. A bandeja além de permitir os movimentos verticais da suspensão determina o alinhamento das rodas e suporta forças laterais nas curvas e controla os movimentos das rodas nas frenagens e arranques. A Figura 14 apresenta um exemplo de uma bandeja automotiva.



Figura 14: Bandeja de suspensão automotiva (Jocar, 2015)

II.2.2.4 Barra estabilizadora

As barras estabilizadoras também são conhecidas como barras anti-giro ou anti-balanço. Sua função é unir os dois lados da suspensão e limitar o movimento lateral do veículo em torno de seu próprio eixo longitudinal. Esse elemento gera o equilíbrio da suspensão em movimentos verticais e em curvas. Um desenho esquemático de uma barra estabilizadora é apresentado na Figura 15.

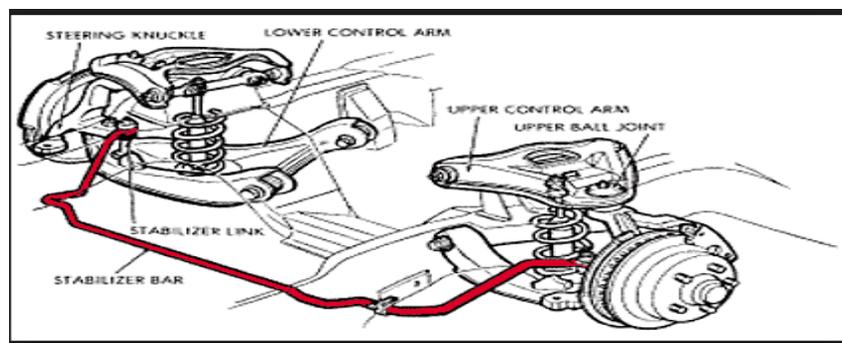


Figura 15: Desenho esquemático de uma barra estabilizadora destacada em vermelho (Auto entusiastas, 2000)

Capítulo 3

Ligas com memória de forma

As ligas com memória de forma (*Shape Memory Alloys – SMA*) pertencem ao grupo de materiais inteligentes e apresentam duas fases: a martensita e a austenita. Os primeiros escritos da descoberta do efeito memória de forma ocorreram na década de 1930. Posteriormente novas pesquisas foram desenvolvidas e as ligas foram sendo aplicadas em diversas áreas. A área de engenharia começou a avançar na utilização das SMAs quando foi descoberta a liga de níquel-titânio (NiTi) em 1963. O avanço se deu pois foi percebido que as propriedades mecânicas da liga eram comparáveis às ligas metálicas de engenharia e, além disso, o material apresentava características especiais como o desenvolvimento de grandes deformações recuperáveis, a presença de dissipação histerética e a geração de grandes forças, quando submetidos a carregamentos termomecânicos apropriados.

Nas SMAs pode-se observar a presença de duas estruturas cristalinas que dependem da temperatura, são elas: martensita (presente em baixas temperaturas) e austenita (presente em altas temperaturas). A Figura 16 ilustra o processo de transformação de fase associado à aplicação de um ciclo de carregamento-descarregamento térmico. Através da transformação de fase, as ligas SMA apresentam o fenômeno da absorção/dissipação de energia pelo amortecimento histerético. Em alguns materiais pode se observar que o amortecimento não depende da frequência de oscilação e sim de um amortecimento interno do material que é chamado amortecimento histerético.

A liga de NiTi apresenta a fase martensítica para uma condição livre de tensão e a baixa temperatura. Ao ser aquecida inicia-se o processo de transformação em austenita. Como pode se ver na Figura 16, a temperatura A_i é aquela onde há o início da transformação de fase, durante o aquecimento, da martensita para austenita, sendo que a transformação se completa para uma temperatura A_f . Quando ocorre a redução da temperatura até ao valor M_i , a austenita começa a se transformar em martensita. A transformação se completa, ou seja, quando volta a ter martensita na temperatura M_f . Essas temperaturas podem ser alteradas por tratamentos químicos e por variações na composição química das ligas com memória de forma. A diferença existente

entre as temperaturas de transição promove um comportamento de histerese. A temperatura M_d é aquela onde se tem o limite que a martensita pode ser induzida por deformação.

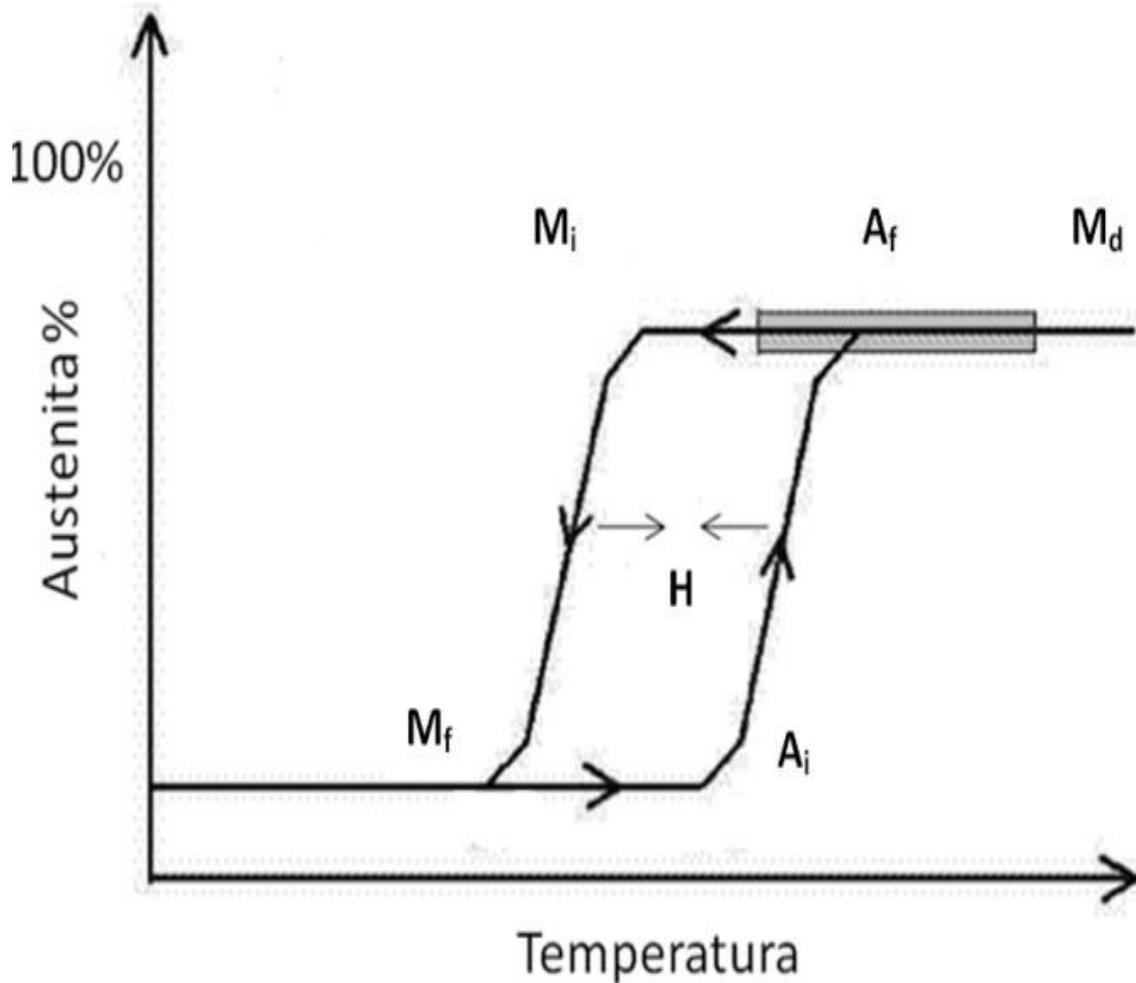


Figura 16: Transformação martensítica e histerese - (GALENO,2010)

As SMA possuem dois efeitos que se destacam: memória de forma e pseudoelasticidade. Os comportamentos termomecânicos das SMA são complexos e estão associados a fenômenos de transformação de fase que podem se desenvolver por variação de temperatura ou por variação de carregamento mecânico.

A Figura 17 ilustra esquematicamente o processo de transformação da fase induzida por carregamento ou por variação de temperatura.

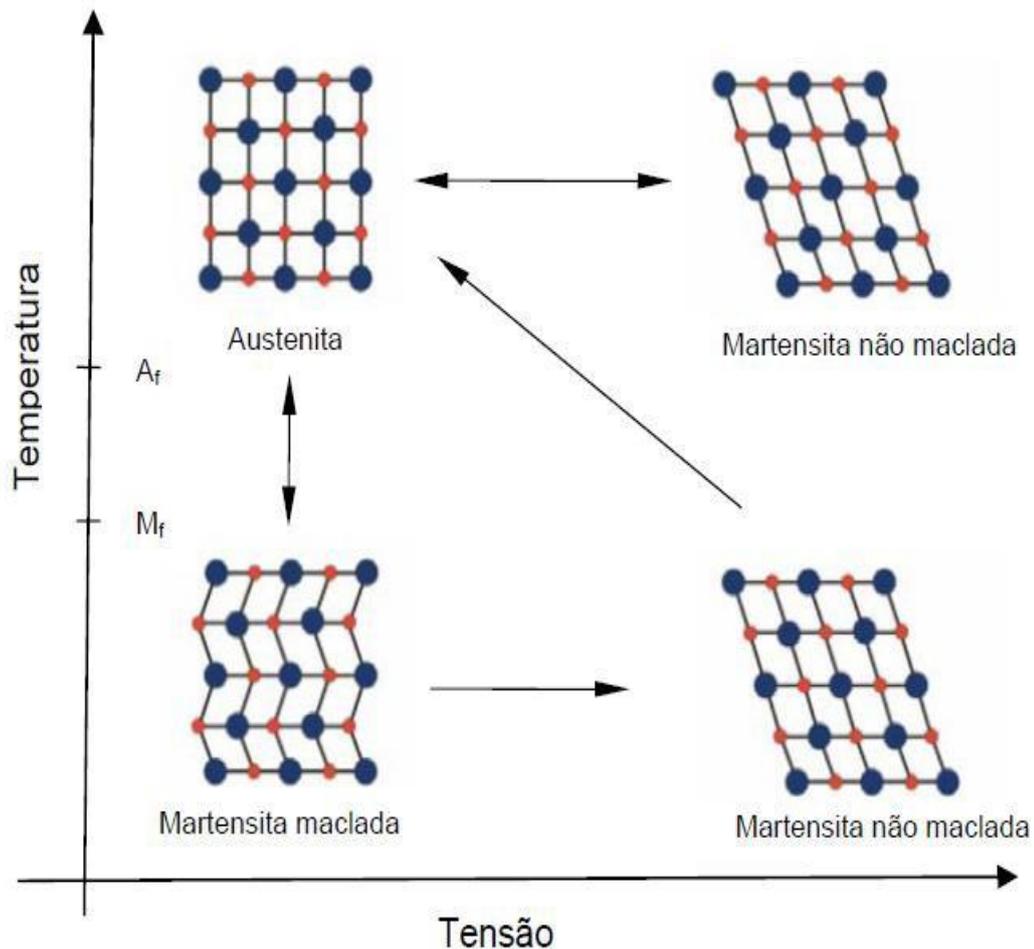


Figura 17: Transformação de fase de ligas SMA (AGUIAR, 2011)

III.1 Comportamento Termomecânico

As ligas com memória de forma sofrem forte influência em suas propriedades mecânicas quando há uma variação na temperatura. Na Figura18 observa-se o comportamento termomecânico para uma liga NiTi em ensaios tensão-deformação para diversas temperaturas. A curva (a) ilustra um ensaio para uma liga metálica comum, como um aço e a não linearidade da curva está associada a deformações plásticas. A curva (b) ilustra um comportamento de memória de forma, o qual ocorre para temperatura mais baixas, abaixo da temperatura M_f . A linha tracejada ilustra um processo de recuperação da deformação residual induzido pelo aumento da temperatura acima de A_f . Finalmente a curva (c) está associada a um comportamento

pseudoelástico que se desenvolve para uma temperatura acima de A_f (CAVA, 1999). As ligas NiTi possuem temperaturas de histerese próxima à temperatura ambiente (30°C) o que possibilita a sua utilização em diversas aplicações pois não necessita de outro equipamento para leva-la a sua temperatura de transformação.

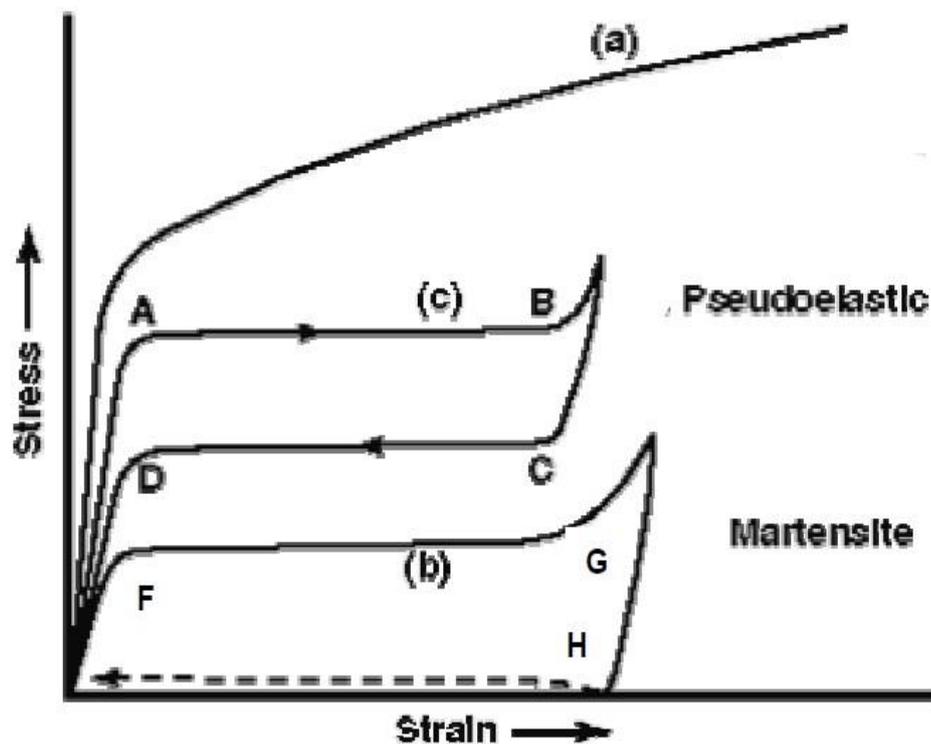


Figura 18: Contraste entre uma liga metálica comum, o efeito memória de forma e o efeito pseudoelástico.(LA CAVA,1999)

III.2 Efeito Pseudoelástico

No efeito pseudoelástico o material livre de tensões encontra-se no estado austenítico. Com a aplicação de um carregamento mecânico, o material apresenta um comportamento linear elástico até um determinado ponto, semelhante ao que se observa em ligas metálicas comuns. A partir desse ponto, o aumento da carga induz a formação de martensita, sendo formada até um determinado ponto limite. Para tensões superiores a esse ponto limite, o comportamento volta a

ser linear. O descarregamento do material promove um efeito inverso, pois a martensita se torna instável e o material volta a ser austenítico. O processo descrito por ser observado na Figura 19.

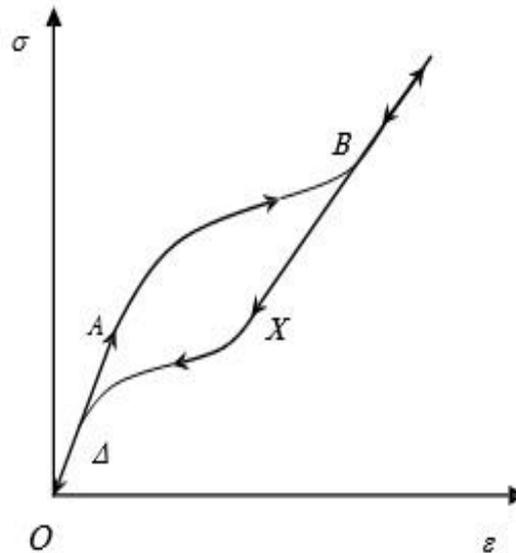


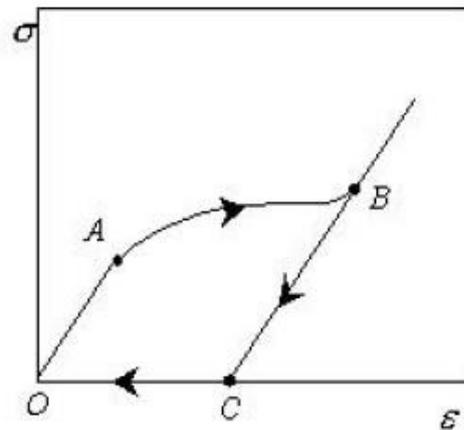
Figura 19: Gráfico tensão x deformação de um carregamento e descarregamento de um liga SMA (BANDEIRA, 2009).

A pseudoelasticidade promove uma área entre as curvas de carregamento e descarregamento, sendo que essa área recebe o nome de laço de histerese. Esse laço de histerese está associado a efeitos de dissipação de energia.

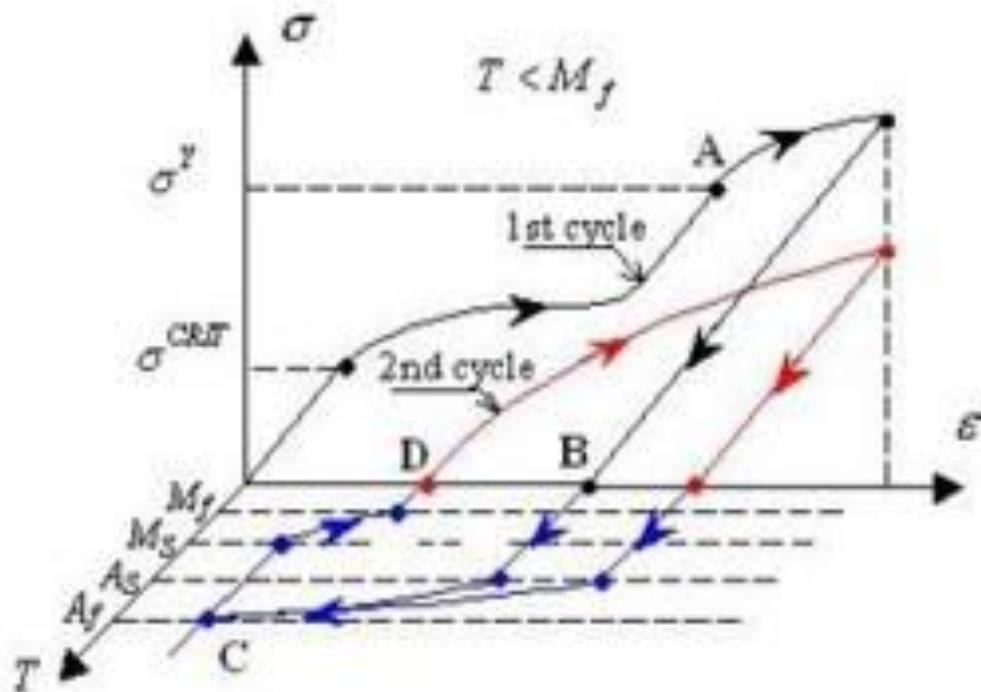
III.3 Efeito de Memória de Forma

A Figura 20 apresenta o efeito de memória de forma para o qual a deformação residual induzida pelo carregamento mecânico pode ser recuperada através da aplicação de um carregamento térmico, elevando-se a temperatura acima de A_f . O efeito memória de forma induzido pela tensão pode ser do tipo *one-way* ou *two-way*. O efeito *one-way* é quando tem se temperaturas menores do que as de formação da martensita. Assim, a martensita induzida por temperatura (maclada) sofre uma reorientação promovida por uma tensão aplicada, se transformando em martensita não-maclada (ADEODATO,2014). Para retomar a forma original,

e recuperar a deformação residual, é necessário aquecer a liga até a temperatura de austenitização, resfriando-a em seguida e retornando para a martensita induzida por temperatura (maclada) (BANDEIRA, 2005). Já no efeito two-way a mudança de fase ocorre no aquecimento e no resfriamento. Para exemplificar melhor, a Figura 20 ilustra o processo one-way e two-way.



(a)



(b)

Figura 20: Efeitos de memória de forma: (a)one-way e (b)two-way (LA CAVA,1999).

III.4 Modelos Constitutivos

A literatura apresenta diversos modelos que representam os diversos comportamentos das SMAs. Para representar o comportamento pseudoelástico, o pacote comercial de elementos finitos ANSYS (ANSYS, 2015) utiliza um modelo constitutivo proposto por Auricchio (1997), cuja curva tensão-deformação é mostrada na Figura 21. Este modelo considera duas fases macroscópicas presentes: austenita (A) e martensita (M). As quatro tensões críticas previstas apresentam os subscritos “ s ” de início e “ f ” de final das transformações de fase e os sobrescritos “ AM ” para a transformação de austenita para martensita e “ MA ” para a transformação de martensita para austenita. No ANSYS, ao se escolher a opção de material com pseudoelasticidade, o pacote atribui a uma variável interna de “deformação plástica equivalente” (NLEPEQ), a fração volumétrica de martensita não-maclada.

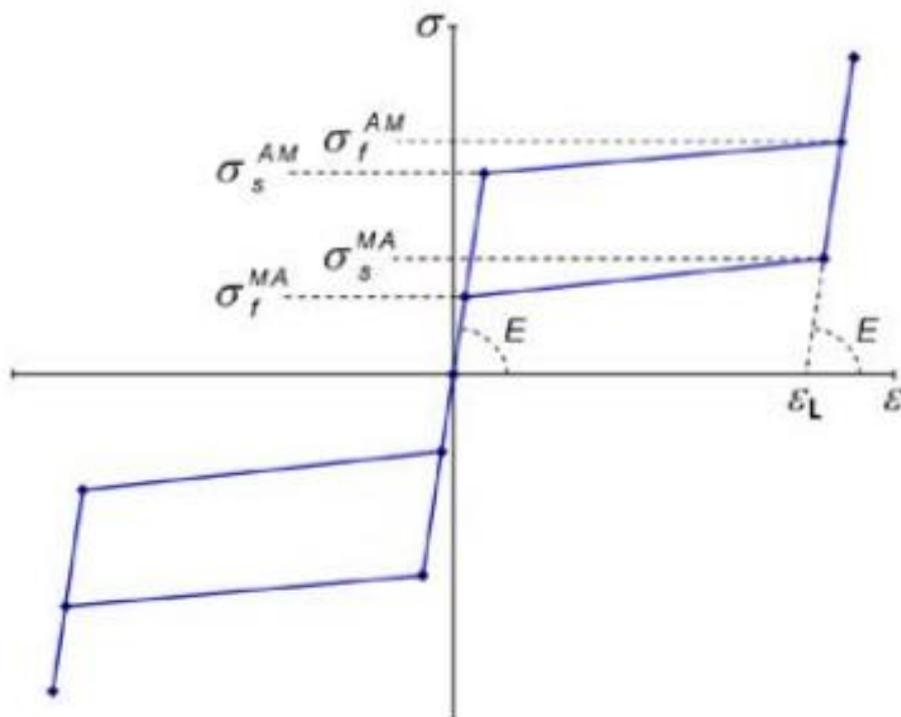


Figura 21: Modelo constitutivo de Aurichio (1997).

III.5 Aplicações dos materiais inteligentes e das ligas com memória de forma.

Quando os materiais inteligentes e as SMAs foram descobertos, eles não eram muito utilizados. Porém com o avanço dos estudos, esses materiais se difundiram na engenharia e em outras áreas. Os absorvedores de vibrações são uma das áreas de estudo e de aplicações na engenharia para esse grupo de materiais.

III.5.1 Controle Vibracional em Estruturas Adaptativas

Foram desenvolvidos rotores com dois mancais onde um deles apresenta em sua composição liga com memória de forma, o que possibilitou reduzir as velocidades críticas abaixo de valores nominais. A Figura 22 mostra um modelo com placas de SMA.

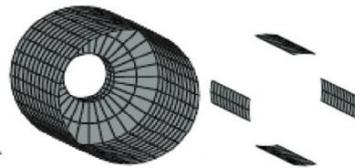


Figura 22: Mancal com placas de SMAs (CASTILHO e SILVA, 2011).

III.5.2 Área Aeronáutica

Na área aeronáutica, as SMAa estão presentes no acionamento dos flaps através de fios de SMA. O sistema de acionamento hidráulico pode ser substituído por atuadores compostos de fios de SMA que são acionados através da aplicação de uma corrente elétrica. Os fios de SMA aquecem por efeito Joule e se contraem voltando a forma original. O novo sistema é mais leve e simples, sendo uma ótima opção para substituir os sistemas hidráulicos. A Figura 23 mostra o exemplo de atuadores utilizando fios de SMA.

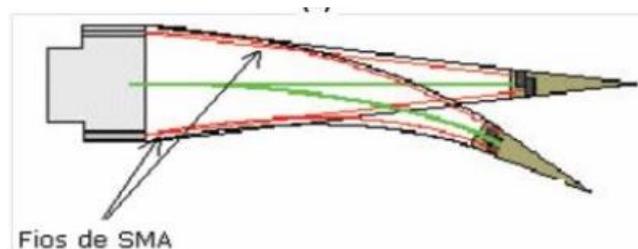


Figura 23: Conexão com o atuador e fios de SMA nos flaps das asas de aviões (Pereira 2009).

Os motores a jato também têm recebido as SMAs para redução de ruídos através de atuadores com geometria variável. A Figura 24 mostra esse exemplo.



Figura 24: Atuadores para redução de ruídos de motores a jato (AGUIAR,2011)

III.5.3 Área Médica

A área médica tem desenvolvido diversos estudos com as ligas com memória de forma. A principal aplicação tem sido nas cirurgias de coração onde foram desenvolvidos dispositivos endovasculares que trabalham para desentupimento de artérias. Este dispositivo tem sido muito útil para pacientes que precisam fazer cirurgias para deixar o tamanho da artéria normal novamente. A Figura 25 mostra um exemplo de aplicação.

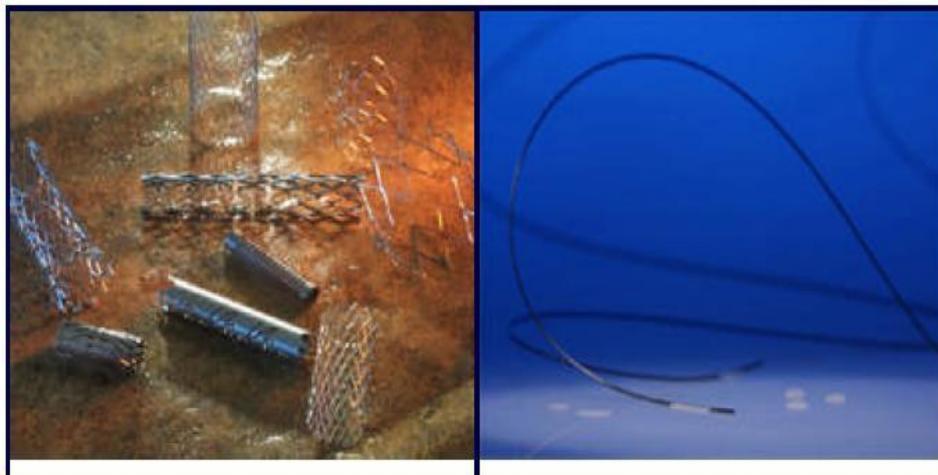


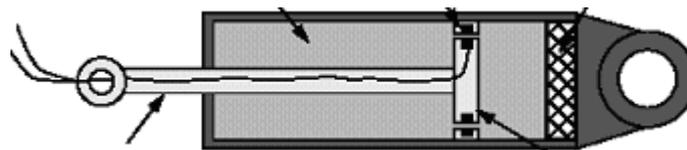
Figura 25: Dispositivos endovasculares (PEREIRA, 2009).

III.5.5 Outras Áreas

Outras áreas também fazem uso das SMAs. Na área odontológica, os aparelhos dentários recebem fios de SMA que exploram o efeito de pseudoelasticidade para manter uma tensão aproximadamente constante, mesmo quando ocorrem deformações elevadas. Na área automobilística existem aplicações para as quais acoplamentos de tubos são feitos com luvas de SMA, para os quais o processo de união seria mais difícil por métodos tradicionais.

III.5.6 Aplicações de materiais inteligentes

A área automotiva tem desenvolvido mecanismos de redução de vibrações para conforto e segurança dos passageiros com materiais inteligentes. Os amortecedores para suspensões automotivas com fluido magneto reológico, vêm sendo utilizados em alguns modelos mais luxuosos após pesquisas comprovarem que o sistema magneto reológico se faz mais eficaz do que os sistemas mecânicos. Além dos amortecedores para as suspensões automotivas os materiais inteligentes também vêm sendo utilizados para redução de vibrações nos rolamentos através da inclusão de esferas construídas de piezo cerâmica que são controladas eletronicamente. A Figura 26 (a) mostra um exemplo de amortecedor com fluido magneto reológico, (b) mostra um exemplo de placas de piezo cerâmica.



(a)



(b)

Figura 26: Materiais inteligentes (a) amortecedor com fluido magneto reológico; (b) placas piezo cerâmicas (SciELO, 2010)

Capítulo 4

Modelo Numérico para Determinação do Coeficiente de Amortecimento Equivalente

O pacote computacional ANSYS (ANSYS, 2015) é utilizado para simular o comportamento de um elemento de SMA de geometria simplificada. Este elemento serviu para desenvolver um estudo inicial com o objetivo de avaliar o comportamento do material e não representa os carregamentos, as dimensões e formas reais. Em uma suspensão real uma bandeja é fixada diretamente no chassi, conforme mostrado na Figura 27 circulado em azul, levando-se assim a trincas no chassi devido as vibrações transmitidas.



Figura 27: Base de fixação de uma bandeja (Suspensão automotiva, 2014)

Sabe-se que o elemento em estudo pode ser submetido aos esforços internos de: esforço cortante e flexão. Para simplificação do estudo desenvolvido utiliza-se apenas o carregamento de flexão pura. O carregamento de flexão pura promove uma distribuição homogênea da transformação de fase ao longo das fibras da viga, enquanto que com a aplicação de um carregamento vertical não ocorreria uma distribuição homogênea e a transformação de fase estaria concentrada no engaste.

Neste trabalho propõe-se a adição de um elemento com amortecimento histerético que será fixado ao chassi e será a base de fixação da bandeja para que através desse amortecimento não haja trincas nos chassis. Na análise considera-se que o elemento está submetido a um esforço de flexão pura promovida pela bandeja da suspensão de um veículo de passeio leve. O

estudo considera a análise de $\frac{1}{4}$ de suspensão e que a base é modelada simplificada como sendo uma viga engastada. O carregamento de momento fletor puro é obtido através de um binário de forças aplicada na extremidade livre da viga composto por 2 pares de forças, conforme mostrado na Figura 28 através das setas vermelhas (rotina do Ansys no apêndice I).

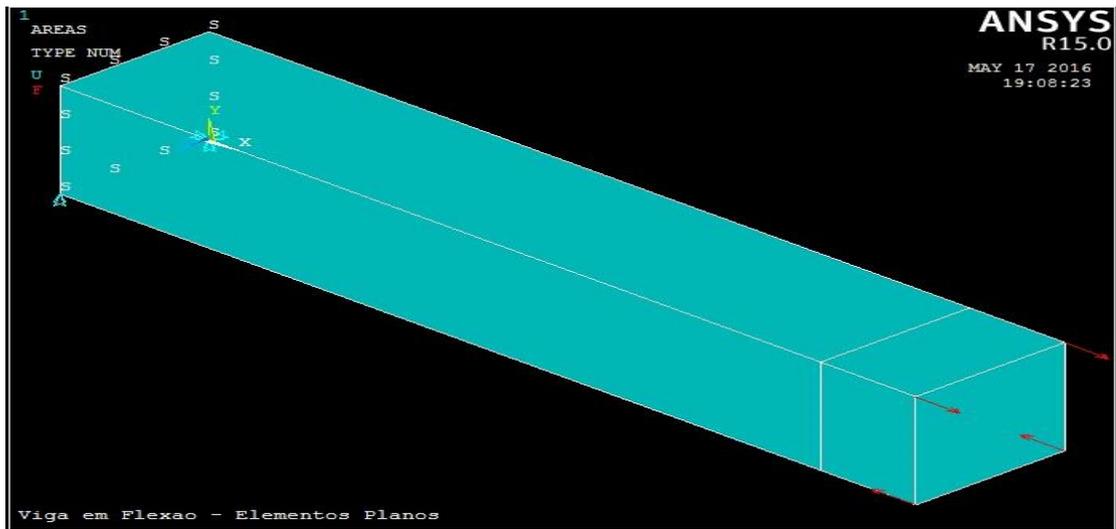


Figura 28: Modelo de viga engastada com carregamento de flexão pura

Nesta etapa do estudo, o objetivo é obter a curva momento x deslocamento para um carregamento envolvendo uma etapa de carregamento seguida de uma etapa de descarregamento. Com essa curva é possível estimar a dissipação promovida pelo elemento e que está associada à área do laço de histerese que se desenvolve.

IV.1 Geometria

Para início do estudo é necessário definir a geometria da viga e para isso foi feito um modelo utilizando o pacote computacional Solidworks 2015 (Solidworks, 2015) como mostrado na Figura 29.

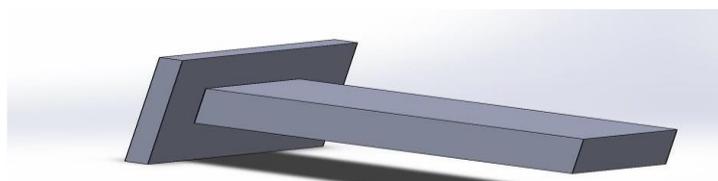


Figura 29: Viga engastada em perspectiva

Para que a carga não fosse distribuída de forma pontual na peça, foi acrescentada uma massa com módulo de elasticidade maior na ponta, com dimensões de 64x100mm. Isso fez com que a carga ficasse distribuída uniformemente. As dimensões da viga estão mostradas na Figura 30.

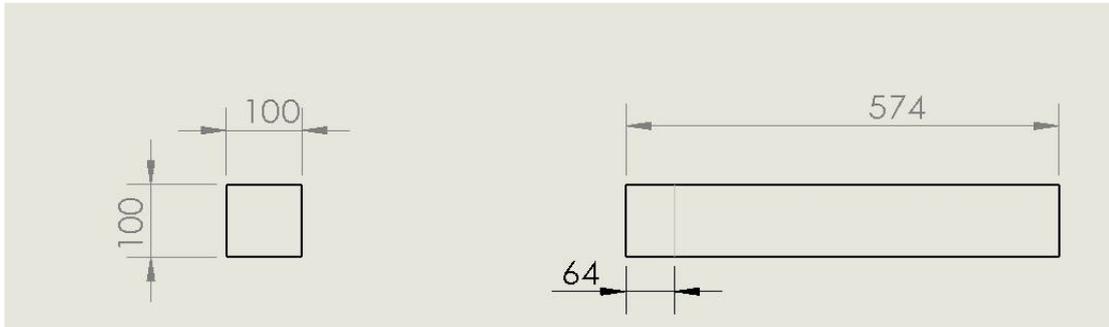


Figura 30: Dimensões da viga

IV.2 Malha e Análise de Convergência

Figura 31 apresenta a malha de elementos finitos utilizada nas simulações numéricas. A malha foi obtida após uma análise de convergência.

As propriedades do material SMA utilizadas nas simulações estão mostradas na Tabela 1. A análise de convergência foi desenvolvida acompanhando o gráfico deslocamento x força, como mostra a Figura 32. A variável utilizada no processo de convergência, denominada de fator, está associada ao tamanho dos elementos. Um fator 4 representa uma discretização para a qual 8 elementos são utilizados na aresta da seção transversal da viga, enquanto que para um fator 1 são utilizados 2 elementos. Para as simulações numéricas desenvolvidas utilizou-se um fator 4.

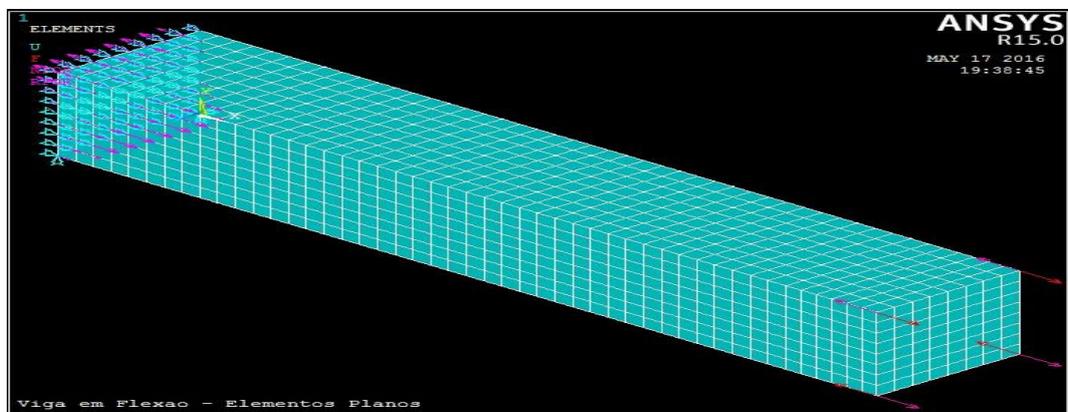
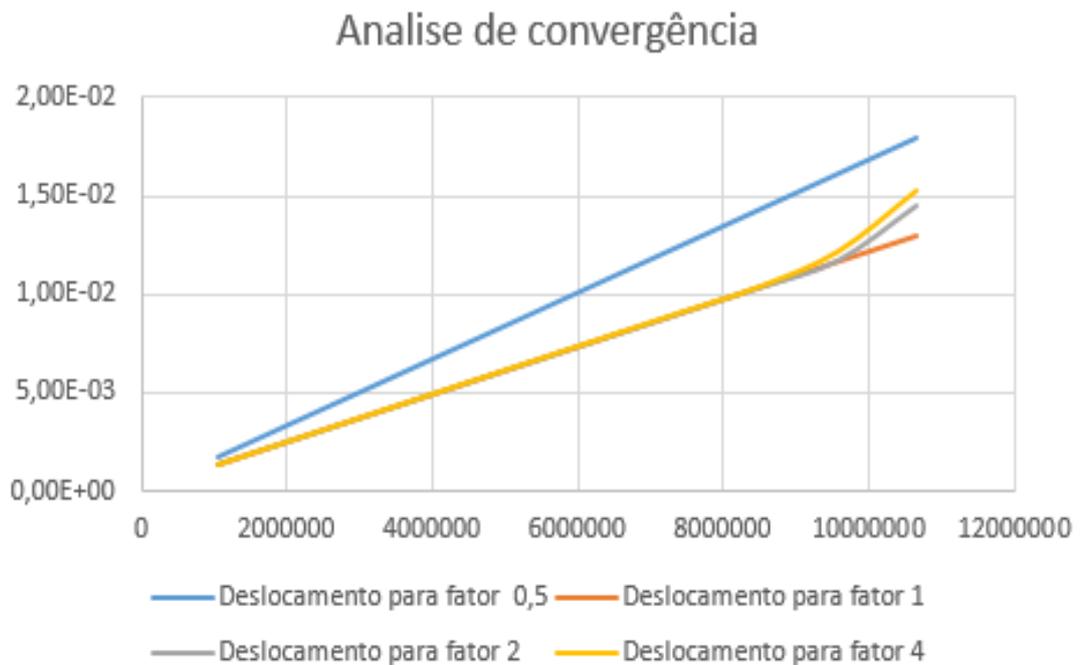


Figura 31: Modelo de malha utilizada.

Tabela 1: Propriedades do material SMA

Módulo de Elasticidade (E)	200 GPa
Coefficiente de Poisson (ν)	0,29
Tensão de início de transformação de fase (σ_s^{AM})	620 MPa
Tensão final de transformação de fase (σ_f^{AM})	750 MPa
Tensão de início da inversão da transformação de fase (σ_s^{MA})	400 MPa
Tensão final da inversão da transformação de fase (σ_f^{MA})	133 MPa

**Figura 32:** Análise de convergência.

IV.3 Condições de Contorno e Carregamento Mecânico

A Figura 33 mostra a geometria do modelo utilizado na análise. Pode-se observar um volume na extremidade direita que foi introduzido com o objetivo de acomodar o carregamento aplicado. Nessa região considera-se um material linear-elástico e com um módulo de elasticidade 100 vezes superior. Os *keypoints* são elementos utilizados pelo pacote

computacional para definir a geometria e que podem ser utilizados para a aplicação de carregamentos e condições de contorno, sendo mostrados na figura através de números posicionados nas arestas. Para a análise desenvolvida prescreveu-se deslocamento nulo na direção x para a área da seção transversal da extremidade direita (coordenada $x = 0$). Além disso, adotou-se deslocamento nulo prescrito em todas as direções para o *keypoint* 1 e deslocamento nulo na direção vertical prescrito para o *keypoint* 7. Estas 2 condições de contorno são necessárias para não permitir movimento de corpo rígido. O carregamento de flexão pura é aplicado através de dois binários aplicados, respectivamente, nos *keypoints* 3 e 4 e 14 e 15. O carregamento e as condições de contorno também podem ser observadas nas Figuras 28 e 31.

O carregamento mecânico é efetuado mediante a aplicação de uma etapa de carregamento seguida de uma etapa de descarregamento, para que se possa obter o laço de histerese. Cada uma das duas etapas foi dividida em 20 passos de aplicação (*steps*) com o objetivo de auxiliar no processo de convergência e de permitir acompanhar a evolução das variáveis envolvidas.

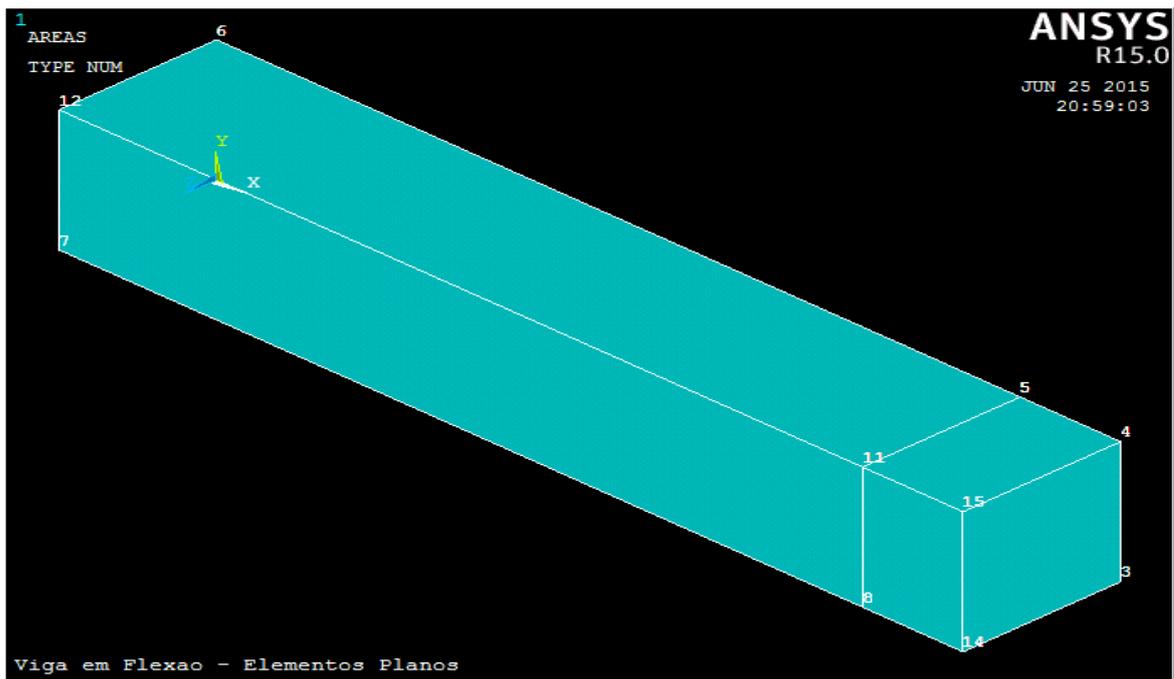


Figura 33: Viga com os *keypoints*

IV.4 Simulações Numéricas

Após a conclusão da etapa inicial de definição da geometria, medidas, esforços, desenvolveram-se as simulações numéricas do carregamento e descarregamento da viga, com

o objetivo de gerar os valores de força e deslocamento e, como consequência, o gráfico força x deslocamento. Na Figura 34 observa-se o instante associado ao maior valor de carregamento (*step* 20), no qual obtém-se uma tensão equivalente de *von Mises* máxima de 630 MPa nas fibras superior e inferior da viga.

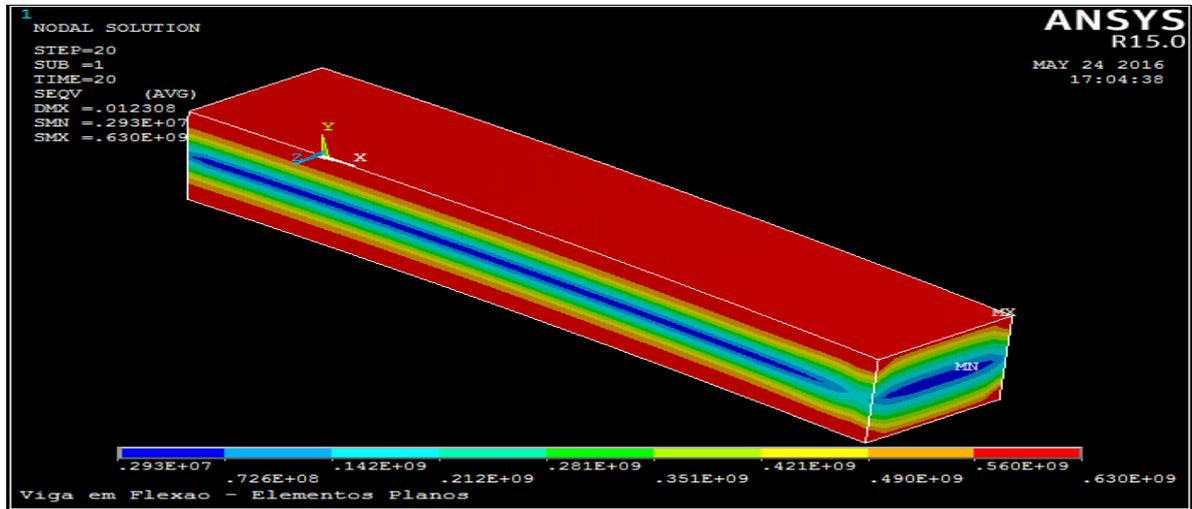


Figura 34: Distribuição da tensão equivalente de *von Mises* no valor máximo de carregamento aplicado.

Após o carregamento a viga é descarregada e no penúltimo *step* (39) antes de ser totalmente descarregada, apresenta uma faixa superior e uma inferior de tensão equivalente de *von Mises* máxima de 40 MPa como mostrado na Figura 35.

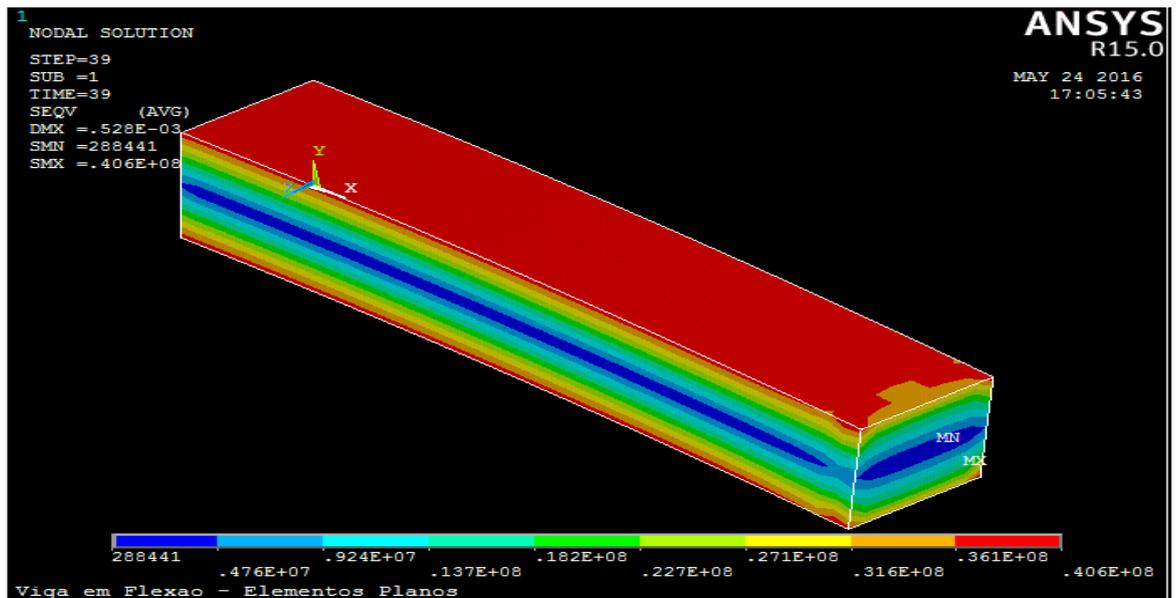


Figura 35: Distribuição da tensão equivalente de *von Mises* para o *step* anterior ao descarregamento total.

No instante associado ao carregamento máximo (step 20), observa-se a distribuição de fração volumétrica de martensita na peça mostrada na Figura 36.

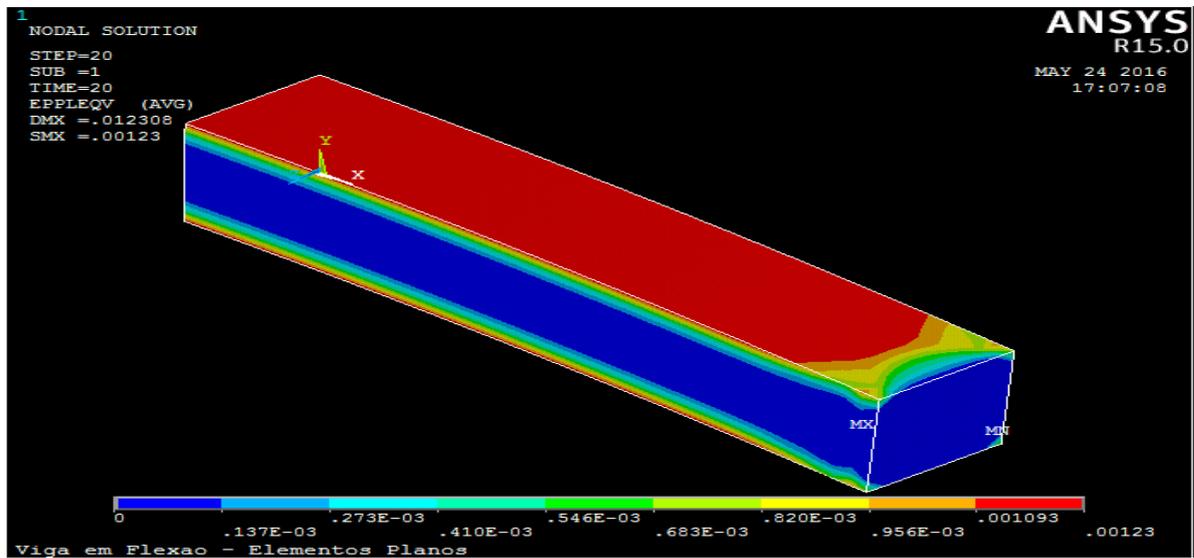


Figura 36: Distribuição da fração volumétrica de martensita na peça para o valor máximo de carregamento aplicado.

Após o carregamento e descarregamento da viga, foi gerado o gráfico de momento x deslocamento utilizando o pacote Origin Pro 8, conforme mostrado na Figura 37. Através deste gráfico é possível obter-se a área associada ao laço de histerese.

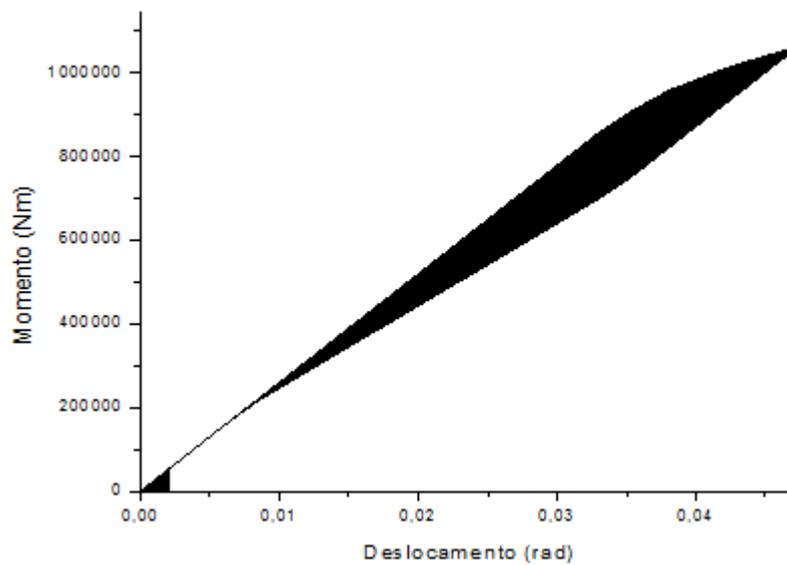


Figura 37: Gráfico Momento x Deslocamento

Através do pacote Origin obteve-se uma área de histerese de aproximadamente 53 kJ. A densidade volumétrica pode ser obtida dividindo-se o valor da área obtida pelo volume, sendo é igual 10,4 MJ/m³. BLANDON (2004) apresentou uma metodologia que associa a dissipação histerética a amortecimentos viscosos. Para o caso estático, é possível estimar um fator de amortecimento equivalente, através da seguinte equação (BLANDON, 2004):

(1)

$$\zeta_{HIST} = \frac{Area_{HIST}}{2\pi \cdot F_0 u_0}$$

A partir da equação (1), é possível obter-se uma estimativa para a variável constante de amortecimento (c) através da equação (BLANDON, 2004):

(2)

$$\zeta = \frac{c}{2m\omega_n}$$

Logo tem-se que:

$$\zeta = 0,167$$

(3)

Observa-se que o resultado caracteriza um amortecimento subcrítico, que é utilizado na construção dos veículos.

Para obtenção do coeficiente de amortecimento pode-se utilizar a seguinte equação (BLANDON,2004):

$$c = \zeta \cdot 2m\omega_n$$

(4)

Logo através do estudo feito no pacote computacional ANSYS (ANSYS, 2015) e considerando-se $m = 1080\text{kg}$ e $\omega_n = 31,30 \text{ rad/s}$, é possível obter-se uma estimativa para o coeficiente de amortecimento $c = 11291 \text{ N.m/s}$ que será utilizado no estudo do comportamento dinâmico de um sistema massa-mola-amortecedor, apresentado no próximo capítulo.

Capítulo 5

Análise do Efeito do Amortecimento no Comportamento Dinâmico

Com o passar do tempo e o desenvolvimento da tecnologia, novas ferramentas foram sendo criadas para auxiliar na análise de modelos de engenharia. A seguir será mostrado o estudo de um sistema com vibração livre e um grau de liberdade com o auxílio do pacote computacional MATLAB R15 (MATLAB,2015). O objetivo com essa análise é mostrar a resposta de um veículo ao passar por um obstáculo com vários coeficientes de amortecimentos diferentes, sendo um deles o coeficiente de amortecimento estimado no estudo desenvolvido no capítulo anterior para um elemento de SMA (valores em amarelo nas tabelas a seguir neste capítulo). É importante destacar que o modelo utilizado não representa as forças que foram utilizadas na viga com SMA pois a suspensão do veículo não sofre apenas esforços de flexão pura. Para uma simulação real o modelo deve conter mais de um grau de liberdade simulando o amortecimento dos pneus e bancos.

Através do pacote computacional MATLAB (MATLAB, 2015), desenvolve-se uma análise numérica utilizando o método de Runge Kutta de quarta ordem para solução das equações do movimento. Considera-se um modelo de vibração livre com um grau de liberdade com uma excitação de base para simular os desníveis existentes nas pistas por onde o automóvel circula (rotina do Matlab 2015 no apêndice II). A Figura 38 ilustra o modelo utilizado.

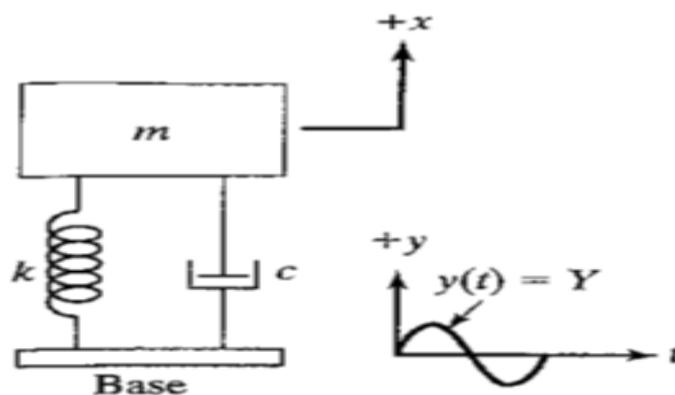


Figura 38: Vibração Livre com excitação de base (Singiresu, Rao,2009)

O sistema é governado pela equação diferencial:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = c\dot{y} + ky \quad (5)$$

onde $y(t)$ representa o valor da excitação de base causada pelo terreno no amortecedor, e é representado pela seguinte equação:

$$y(t) = \frac{Y_0}{2} (1 - \cos wt) \quad (6)$$

onde w depende da velocidade em que se encontra o veículo e t é o instante de tempo que definido no intervalo de t_1 até t_2 , para o qual o carro é submetido a uma irregularidade na pista que tem início no instante t_1 e termina no instante t_2 .

A disposição mostrada na Figura 38 resulta no diagrama de corpo livre na Figura 39.

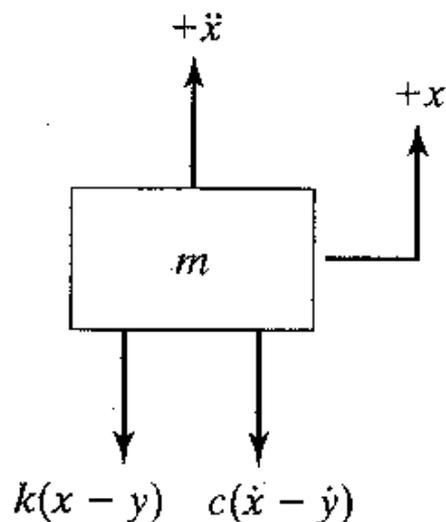


Figura 39: Diagrama de Corpo Livre (Singiresu, Rao,2009)

Para problema estudado, as condições de contorno são:

$$x(0) = 0 \text{ m/s}$$

$$v(0) = 0 \text{ m/s}$$

Sendo que:

$y(t)$ = excitação de base

$Y_0 = 0,10$ m - amplitude da excitação de base

$k = 1058400$ N/m – rigidez da mola

$d_0 = 0,3$ m – comprimento do obstáculo

$d = 20$ m – distância do obstáculo

$c = (3380; 6761; 11291; 20282)$ – coeficiente de amortecimento viscoso

$m = 1080$ kg – massa do veículo

ξ = Fator de Amortecimento

ω = Frequência de Oscilação

ω_n = Frequência Natural de Oscilação

A frequência natural do sistema é dado por:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{1058400}{1080}} = 31,30 \frac{rad}{s} \quad (7)$$

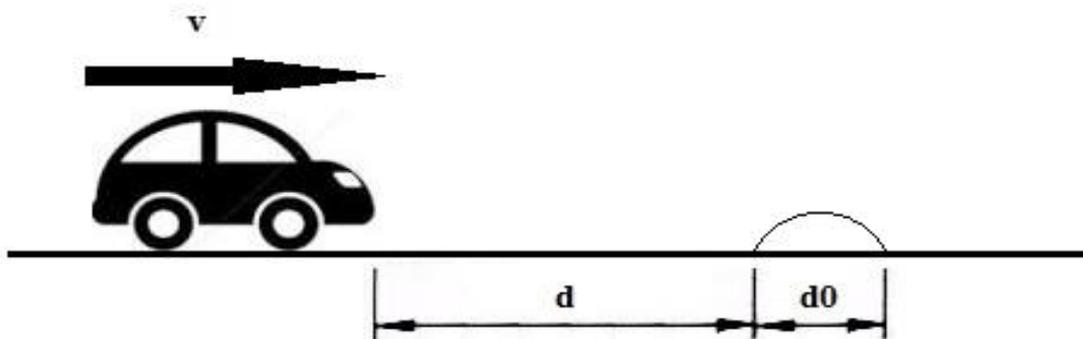
O objetivo é utilizar o valor do coeficiente de amortecimento viscoso (c , com os valores destacados em amarelo nas tabelas a seguir) encontrado através da dissipação de energia por histerese no elemento de SMA e aplicá-lo a um sistema com um grau de liberdade. Após obter-se o gráfico deslocamento x tempo para esse coeficiente, compara-se o desempenho do elemento de SMA com outros coeficientes. Para a comparação toma-se como base três valores de fator de amortecimento (ξ): 0,05, 0,1 e 0,3 (ADEODATO, 2014), todos dentro da faixa de amortecimento subcrítico.

$$\xi = \frac{c}{c_c} = \frac{c}{2m\omega_n} \quad (8)$$

Tabela 2: Valores do Fator de Amortecimento para os Valores de Amortecimento

c (N.s/m)	ξ
3380	0,05
6761	0,1
11291	0,167
20282	0,3

A Figura 40 ilustra a situação à qual o veículo será submetido para avaliar o desempenho do sistema.

**Figura 40:** Carro em pista com obstáculo de elevação y_0

O veículo começará parado e irá acelerando até atingir uma velocidade v , e passar por cima do obstáculo (do tipo quebra-molas) que possui uma amplitude (altura) y_0 . A distância escolhida até o obstáculo é de $d = 20$ m e o comprimento da elevação é de $d_0 = 0,3$ m.

Com esses dados foram elaborados gráficos no MATLAB que representam o deslocamento do veículo em função de irregularidade na pista com 100 mm de altura. Para comparar os deslocamentos em diferentes situações, foram gerados gráficos para três casos distintos. No primeiro caso o carro passará sobre a irregularidade na pista a 2,7 m/s (10 km/h), no segundo caso passará a 13,8 m/s (50km/h) e no terceiro caso passará a 22,2 m/s (80 km/h). O objetivo é de simular situações cotidianas encontradas por um veículo.

V.1 Simulação com Velocidade de 2,7 m/s

As Figuras: 41,42,43 e 44 apresentam os gráficos para simulação de um veículo passando a 2,7 m/s em um obstáculo de 0,10 m de altura.

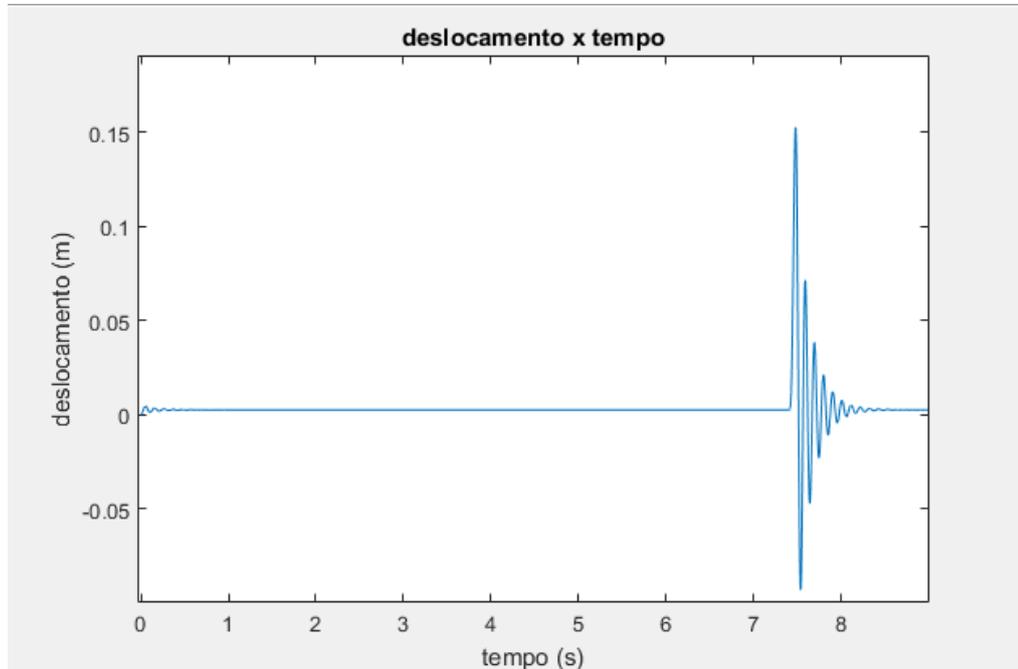


Figura 41: Oscilação do veículo com o amortecimento de 3380

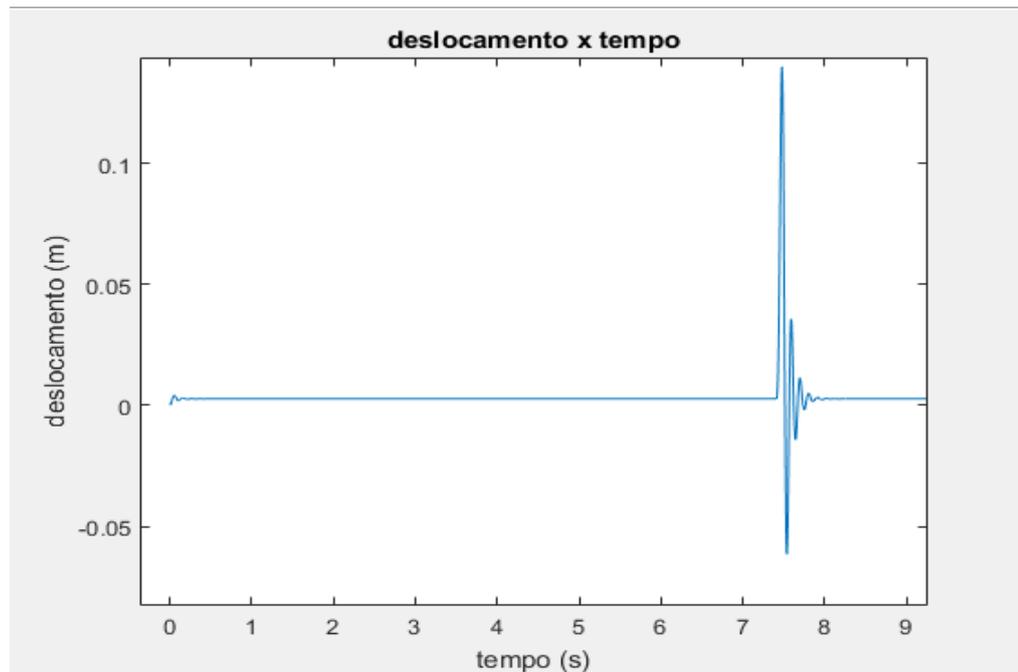


Figura 42: Oscilação do veículo com o amortecimento de 6761

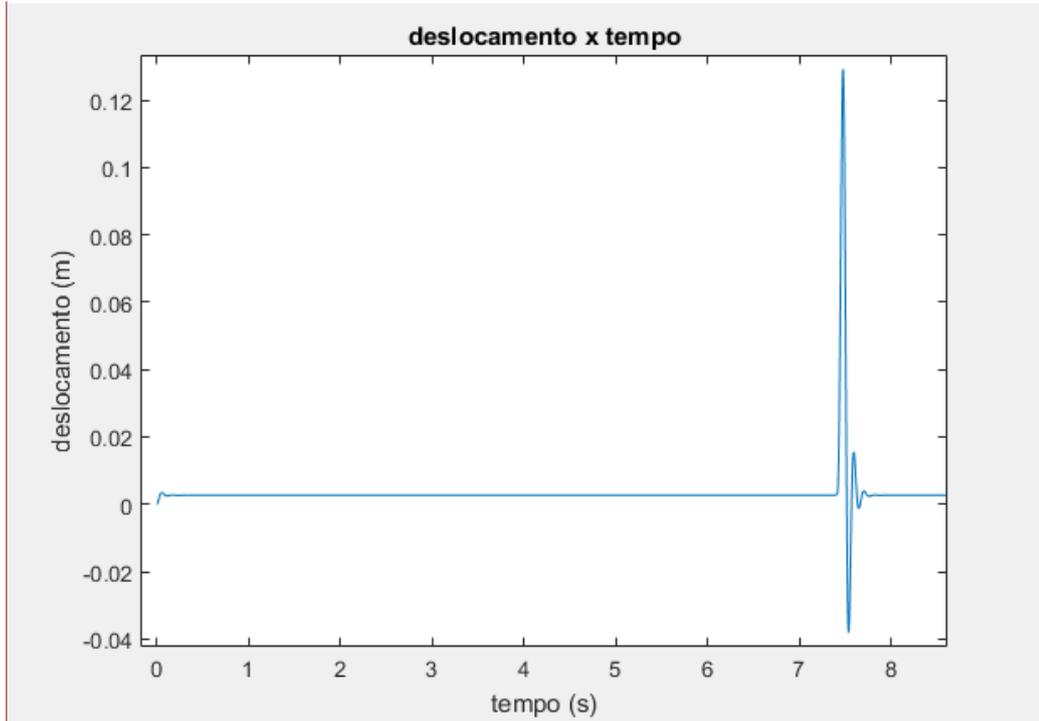


Figura 43: Oscilação do veículo com o amortecimento de 11291

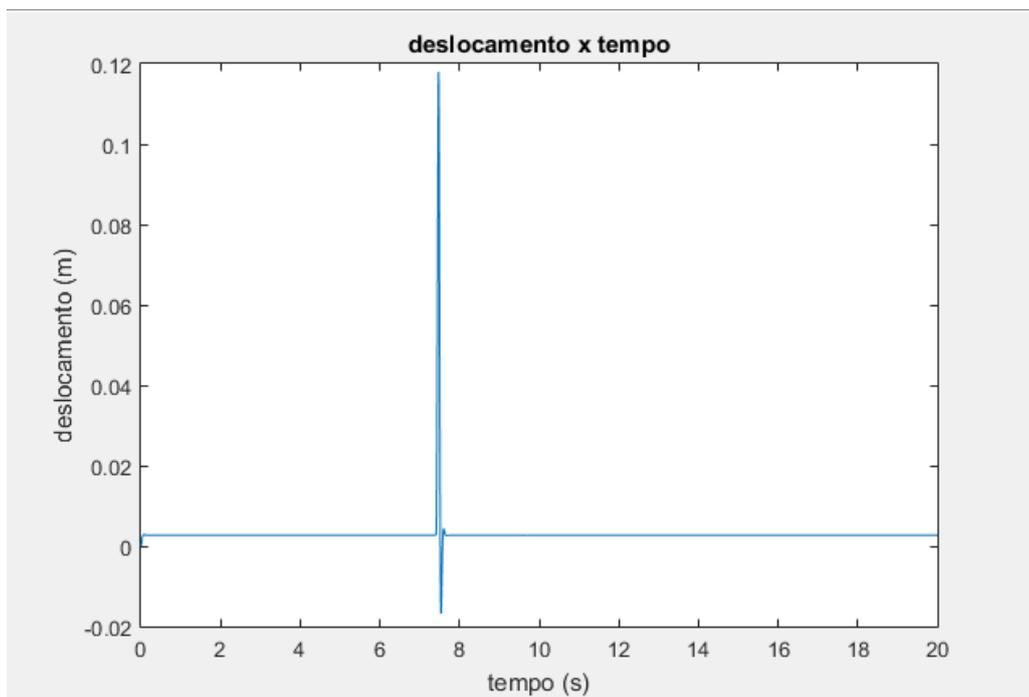


Figura 44: Oscilação do veículo com o amortecimento de 20282

V.2 Simulação com Velocidade de 13,8 m/s

As Figuras: 45,46,47 e 48 apresentam os gráficos para simulação de um veículo passando a 13,8 m/s em um obstáculo de 0,10 m de altura.

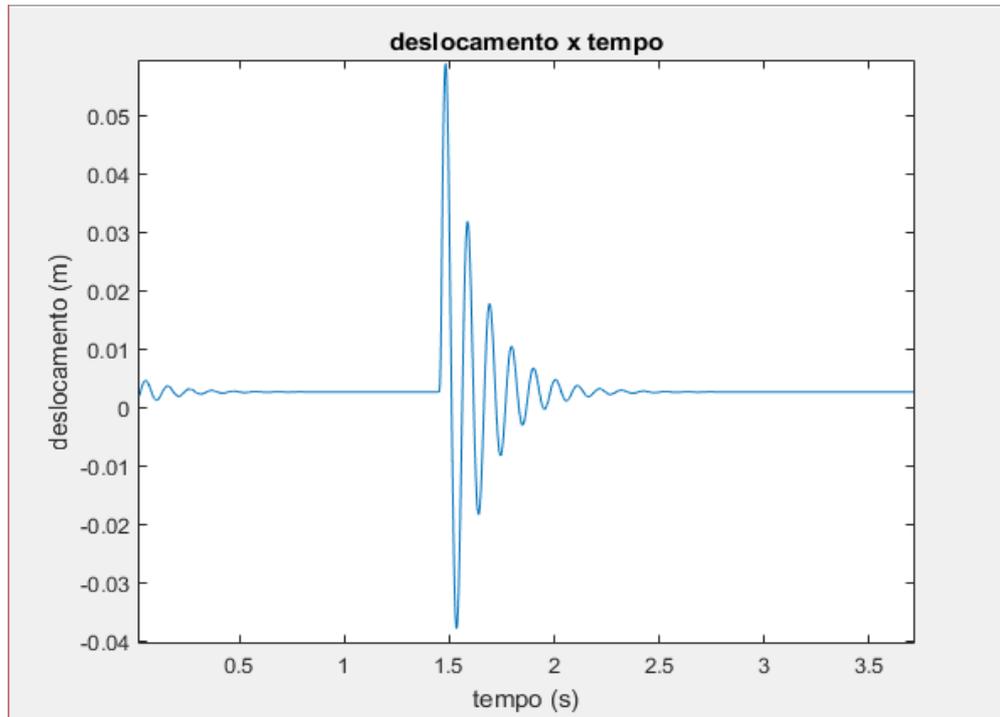


Figura 45: Oscilação do veículo com o amortecimento de 3380

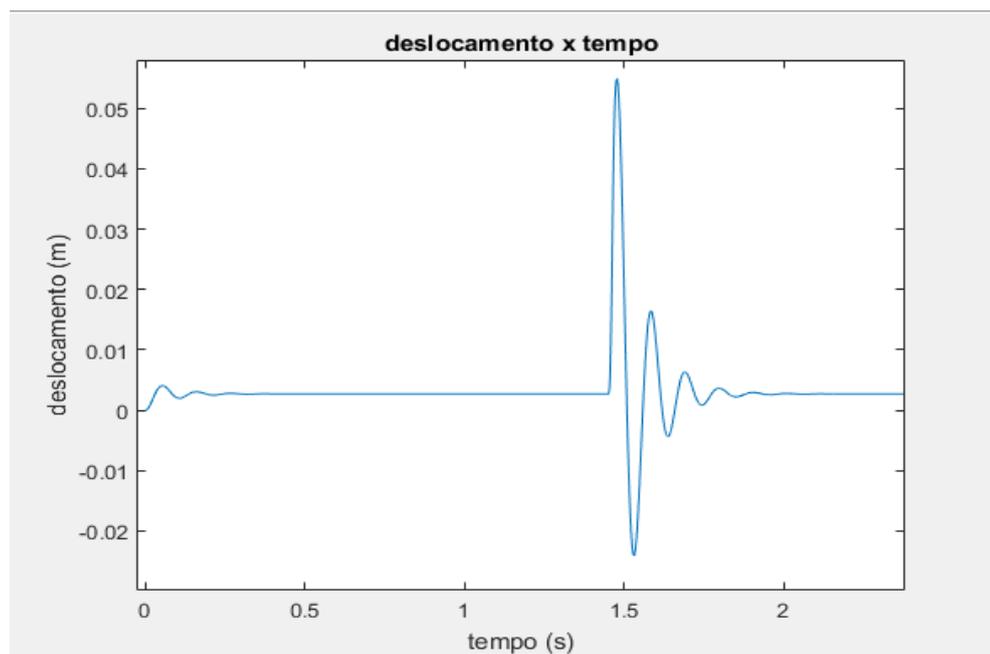


Figura 46: Oscilação do veículo com o amortecimento de 6761

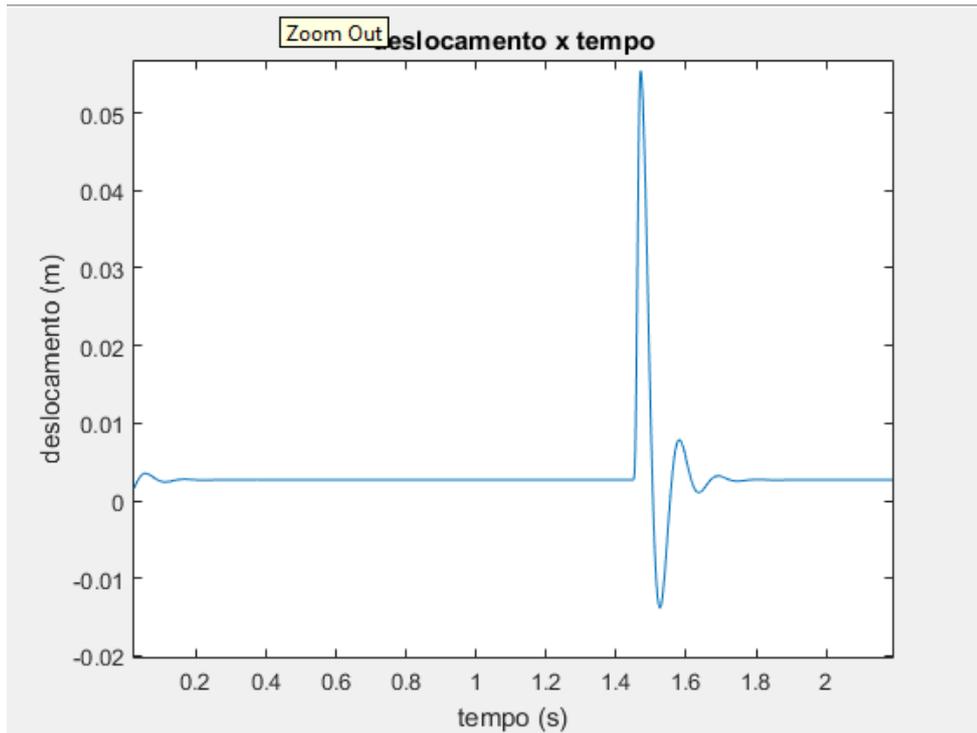


Figura 47: Oscilação do veículo com o amortecimento de 11291

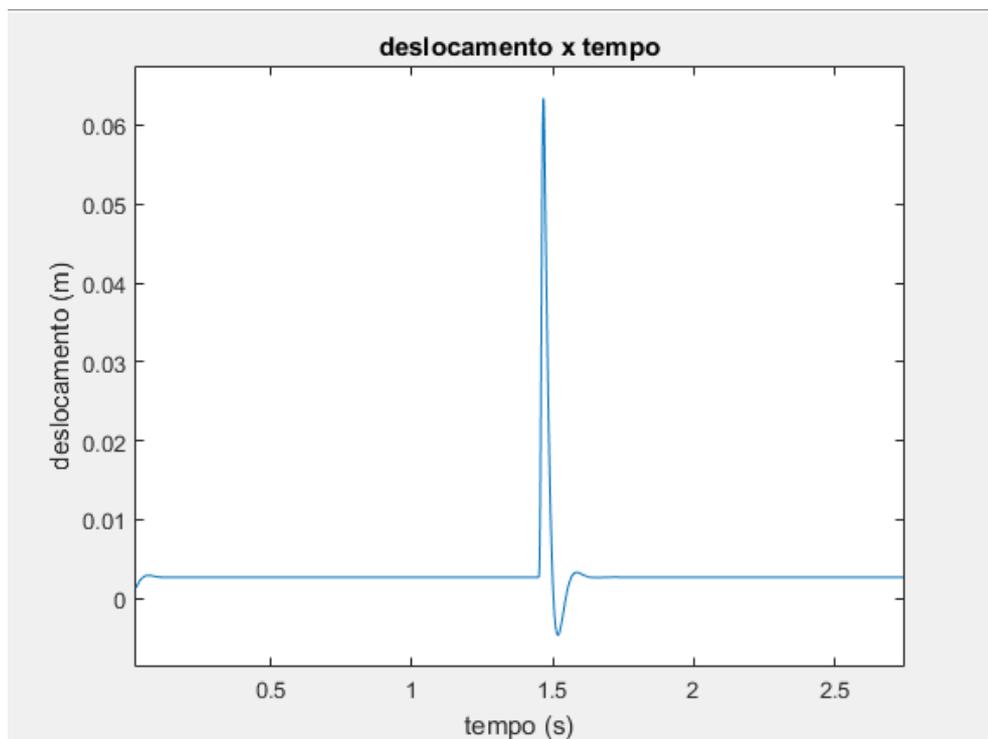


Figura 48: Oscilação do veículo com o amortecimento de 20282

V.3 Simulação com Velocidade de 22,2 m/s

As Figuras: 49,50,51 e 52 apresentam os gráficos para simulação de um veículo passando a 22,2 m/s em um obstáculo de 0,10 m de altura.

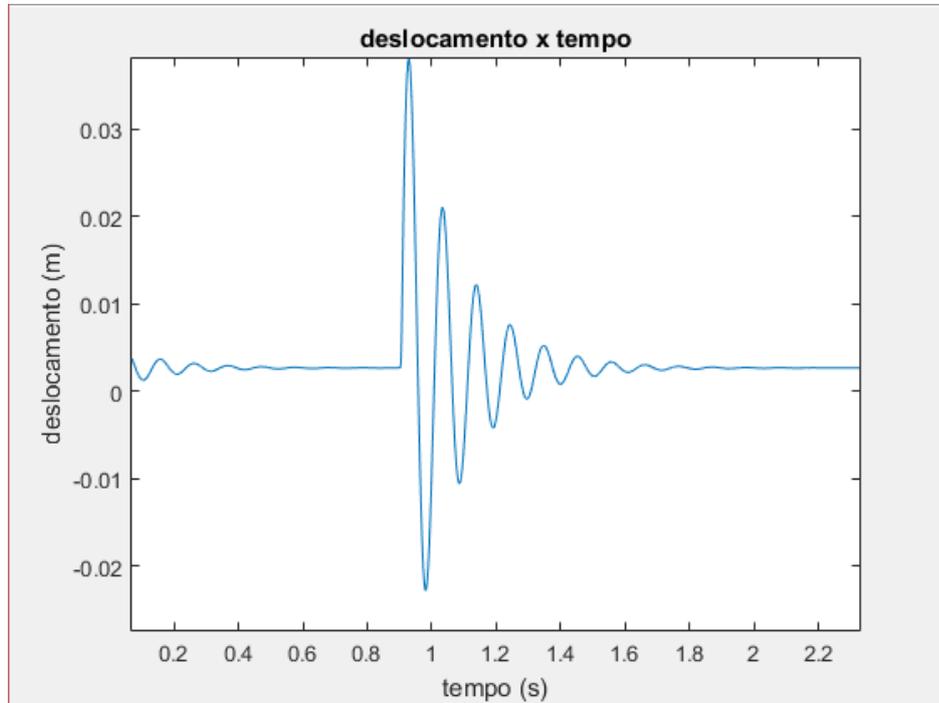


Figura 49: Oscilação do veículo com o amortecimento de 3380

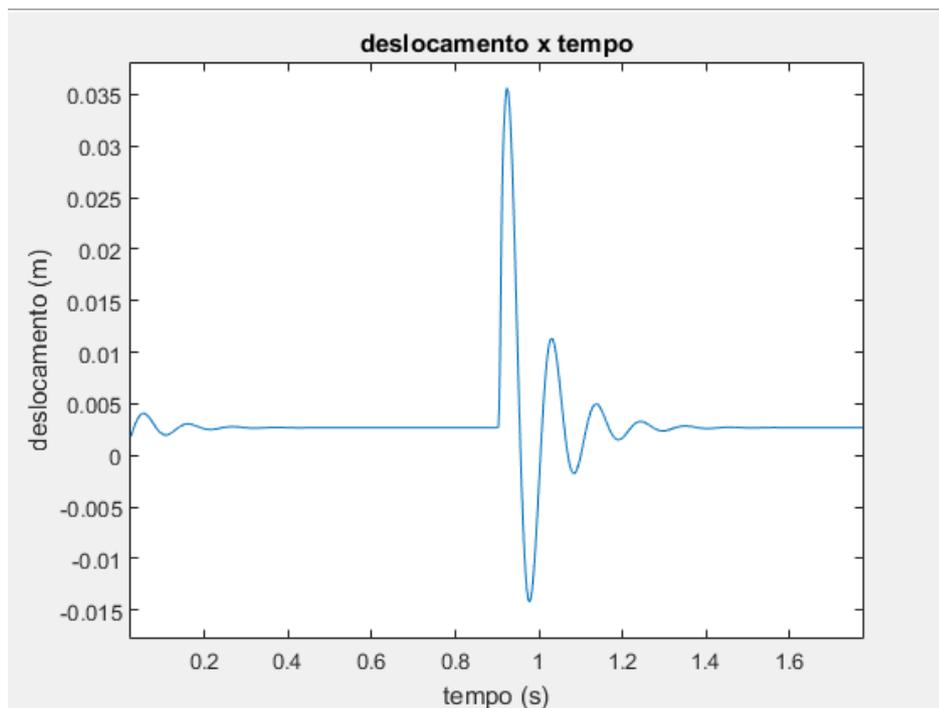


Figura 50: Oscilação do veículo com o amortecimento de 6761

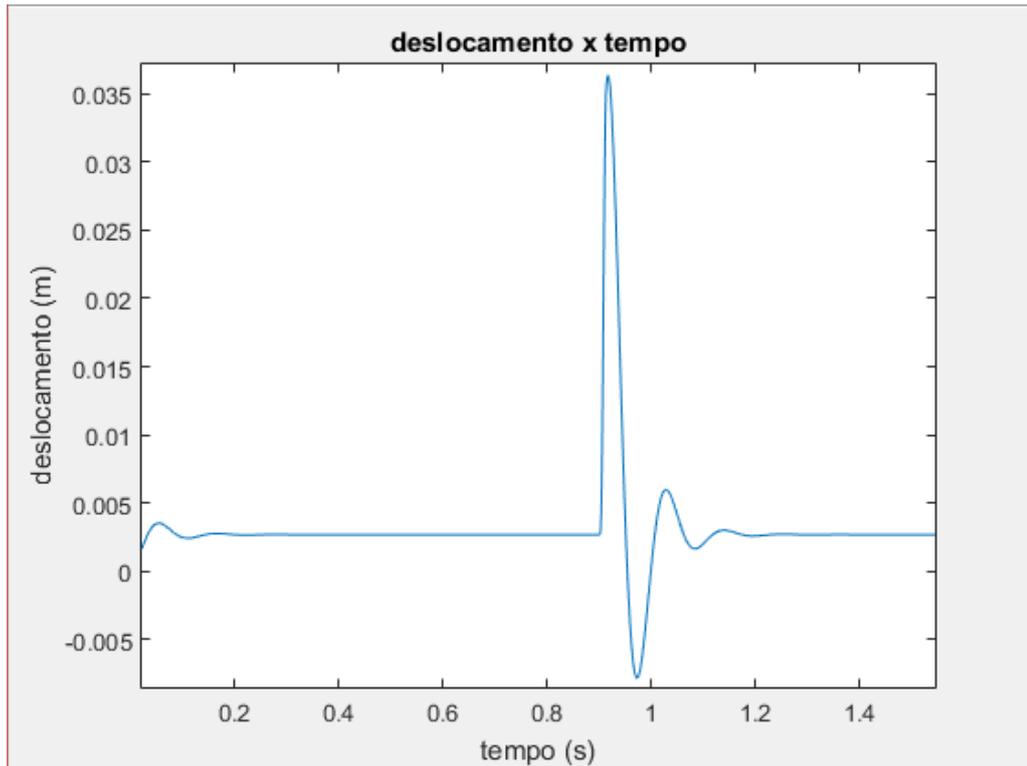


Figura 51: Oscilação do veículo com o amortecimento de 11291

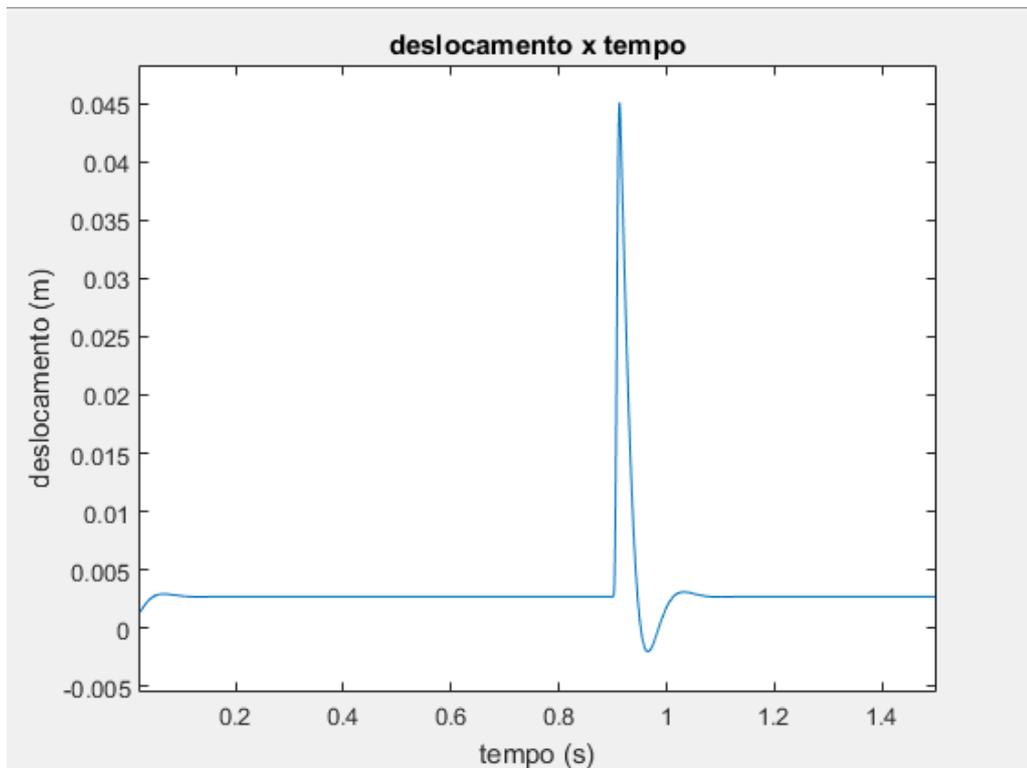


Figura 52: Oscilação do veículo com o amortecimento de 20282

A Tabela 3 apresenta resultados com a amplitude de oscilação máxima que o veículo experimenta ao passar pelo obstáculo e o tempo até o movimento de oscilação cessar.

Tabela 3: Amplitude de Deslocamento e Tempo de Oscilação – Simulações Numéricas com MATLAB

v = 2,7 m/s		
c (Nm/s)	Maior amplitude de deslocamento (m)	Tempo de oscilação (s)
3380	0,072	1
6761	0,035	0,5
11291	0,015	0,25
20282	0,004	0,2
v = 13,8 m/s		
c (Nm/s)	Maior amplitude de deslocamento (m)	Tempo de oscilação (s)
3380	0,032	1,1
6761	0,0165	0,8
11291	0,008	0,2
20282	0,003	0,15
v= 22,2 m/s		
c (Nm/s)	Maior amplitude de deslocamento (m)	Tempo de oscilação (s)
3380	0,021	1,3
6761	0,0115	0,8
11291	0,005	0,2
20282	0,003	0,1

Em seguida uma análise das velocidades vibracionais de cada caso.

V.4 Velocidade Vibracional a 2,7 m/s

As Figuras: 53,54,55 e 56 apresentam os gráficos para simulação da velocidade vibracional um veículo passando a 2,7 m/s em um obstáculo de 0,10 m de altura.

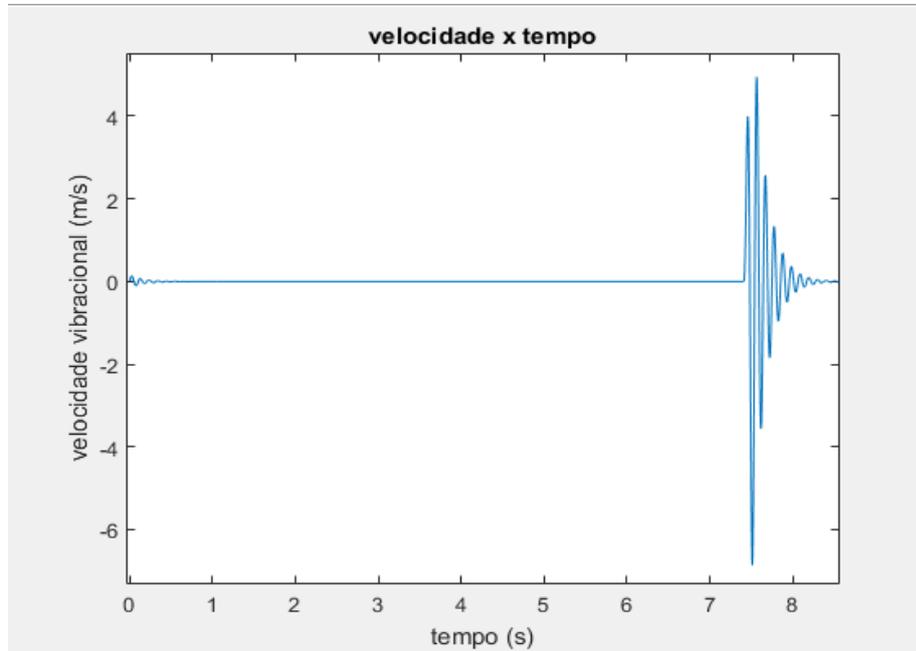


Figura 53: Velocidade vibracional com amortecimento de 3380

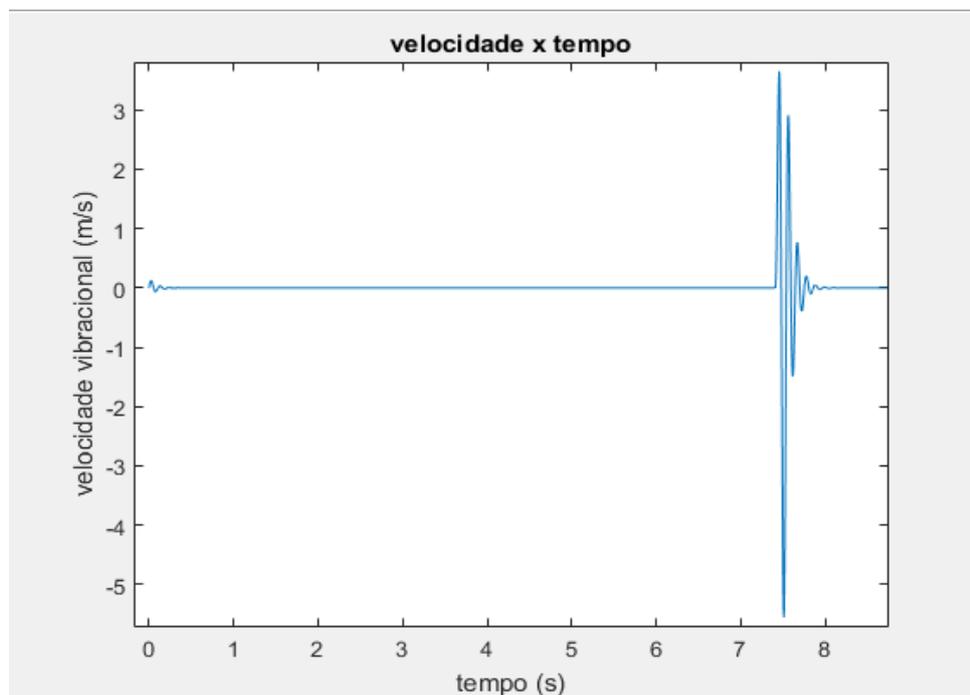


Figura 54: Velocidade vibracional com amortecimento de 6761

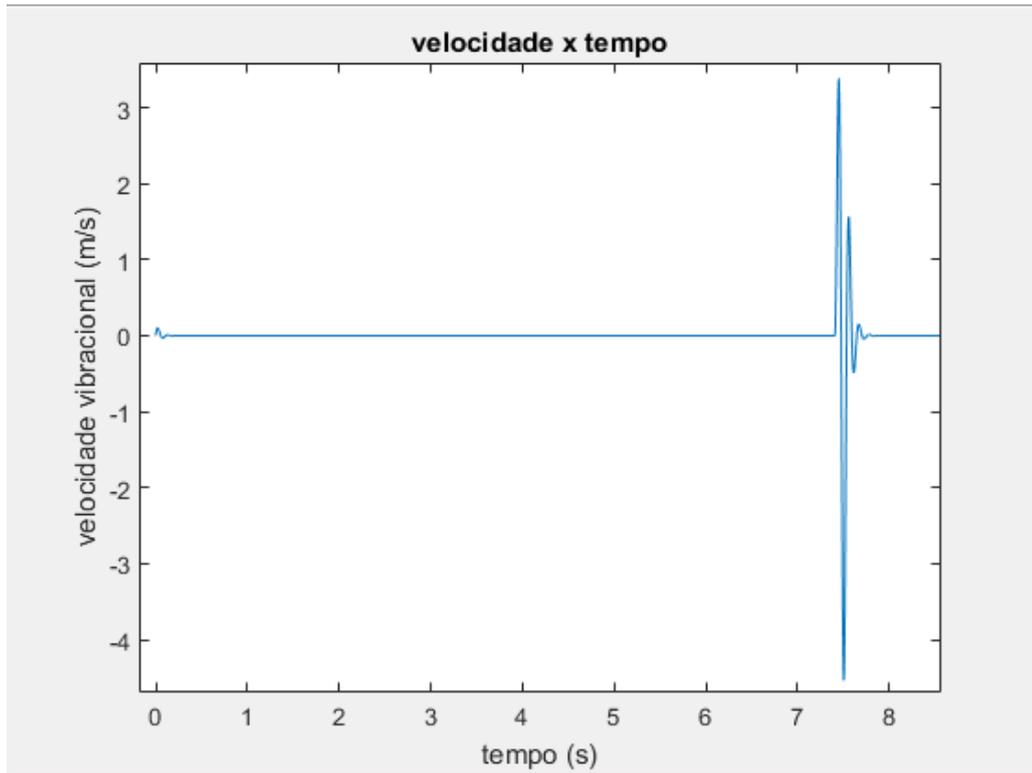


Figura 55: Velocidade vibracional com amortecimento de 11291

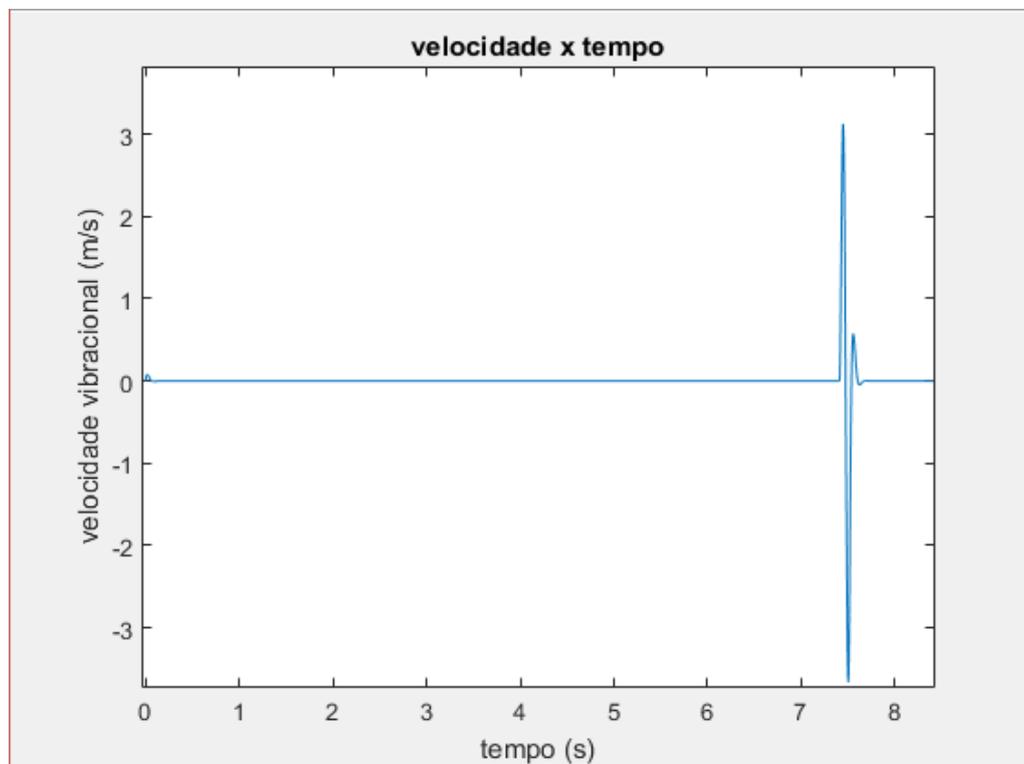


Figura 56: Velocidade vibracional com amortecimento de 20282

V.5 Velocidade Vibracional a 13,8 m/s

As Figuras:57,58,59 e 60 apresentam os gráficos para simulação da velocidade vibracional um veículo passando a 13,8 m/s em um obstáculo de 0,10 m de altura.

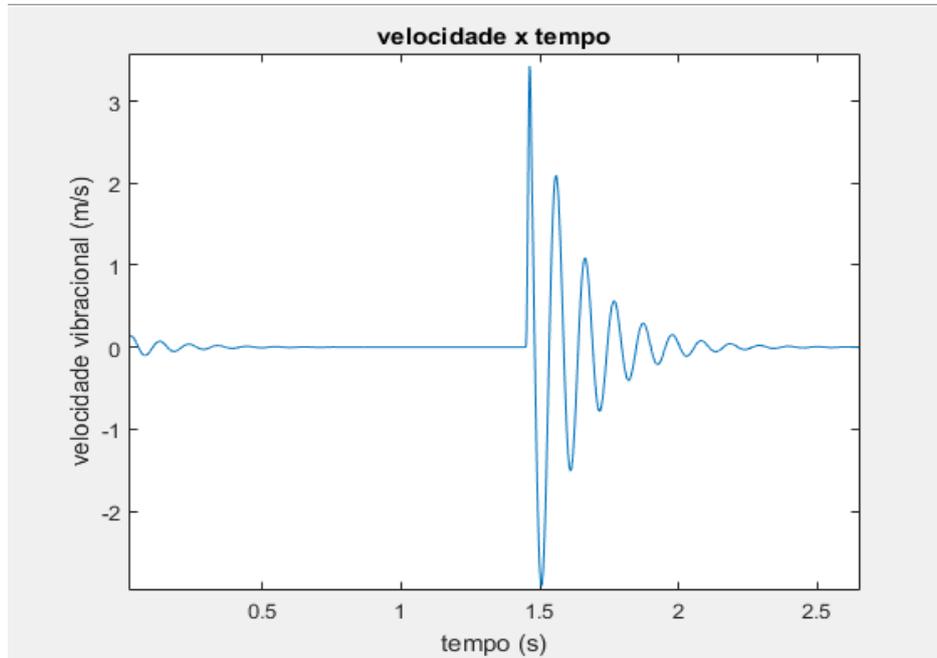


Figura 57: Velocidade vibracional com amortecimento de 3380

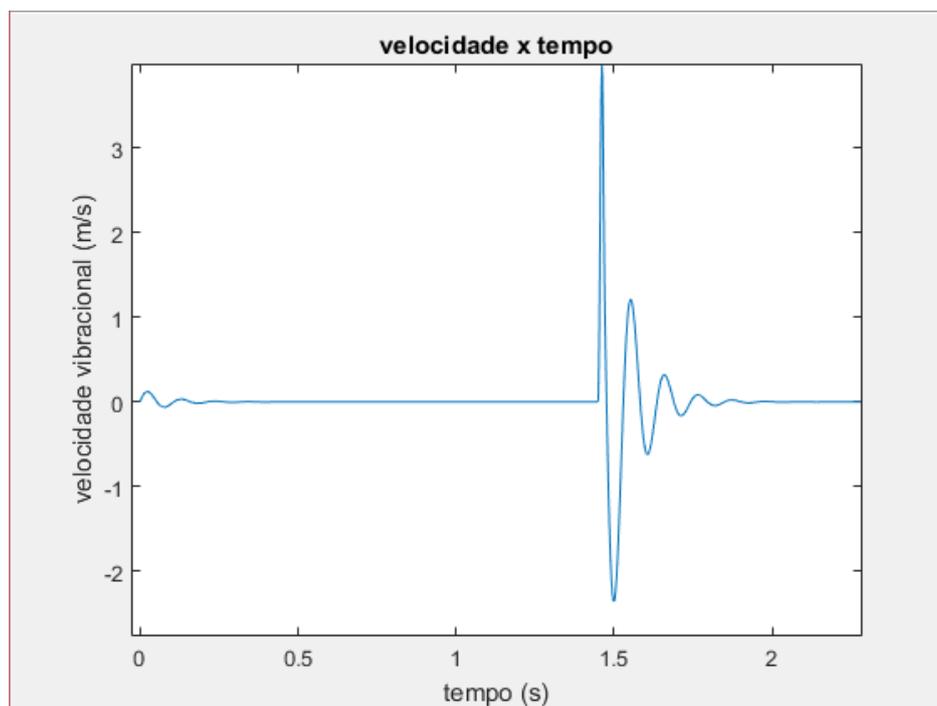


Figura 58: Velocidade vibracional com amortecimento de 6761

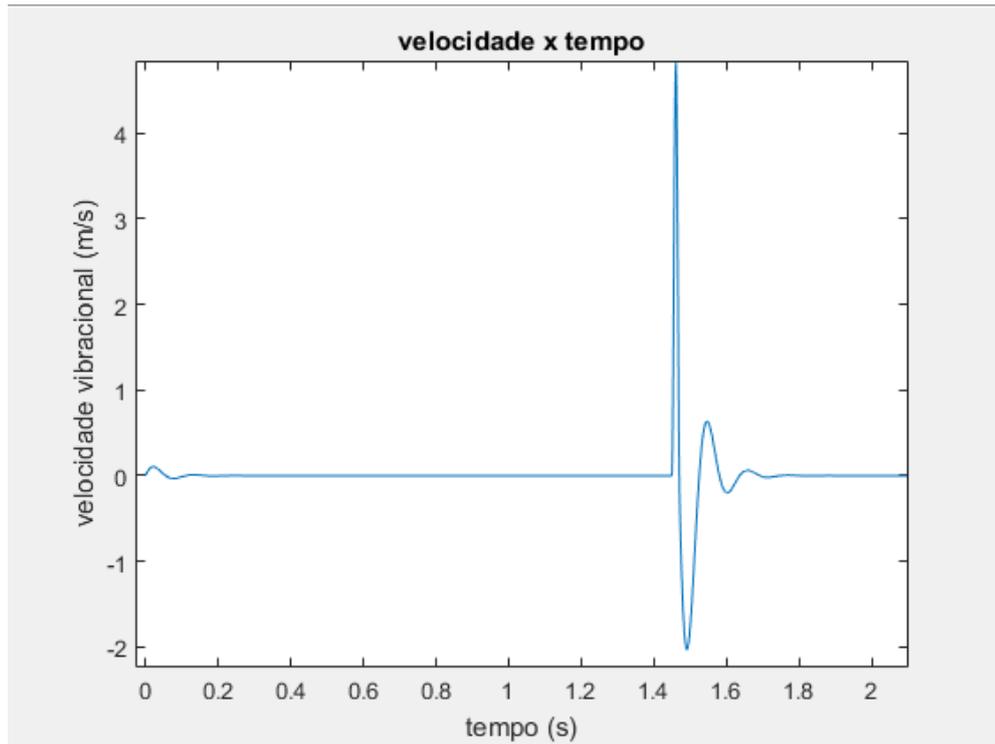


Figura 59: Velocidade vibracional com amortecimento de 11291

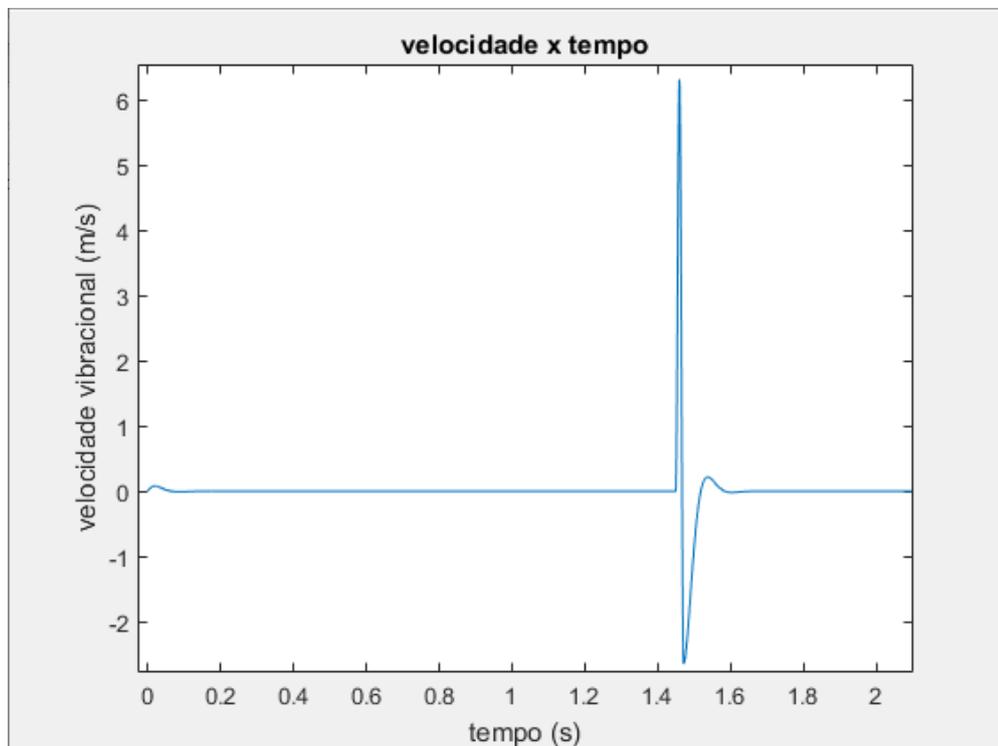


Figura 60: Velocidade vibracional com amortecimento de 20282

V.6 Velocidade Vibracional a 22,2 m/s

As Figuras: 61,62,63 e 64 apresentam os gráficos para simulação da velocidade vibracional um veículo passando a 22,2m/s em um obstáculo de 0,10 m de altura.

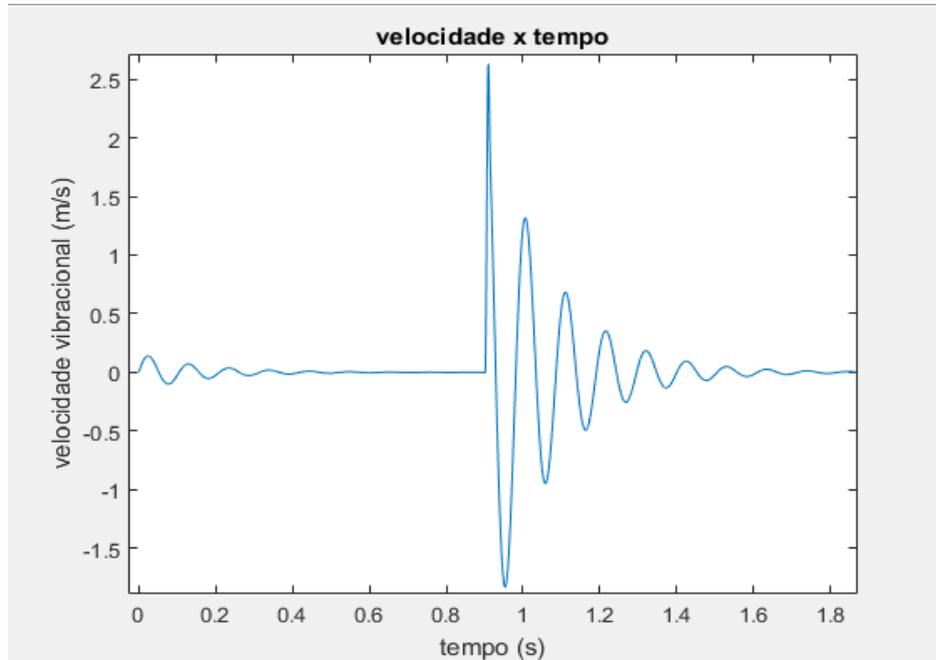


Figura 61: Velocidade vibracional com amortecimento de 3380

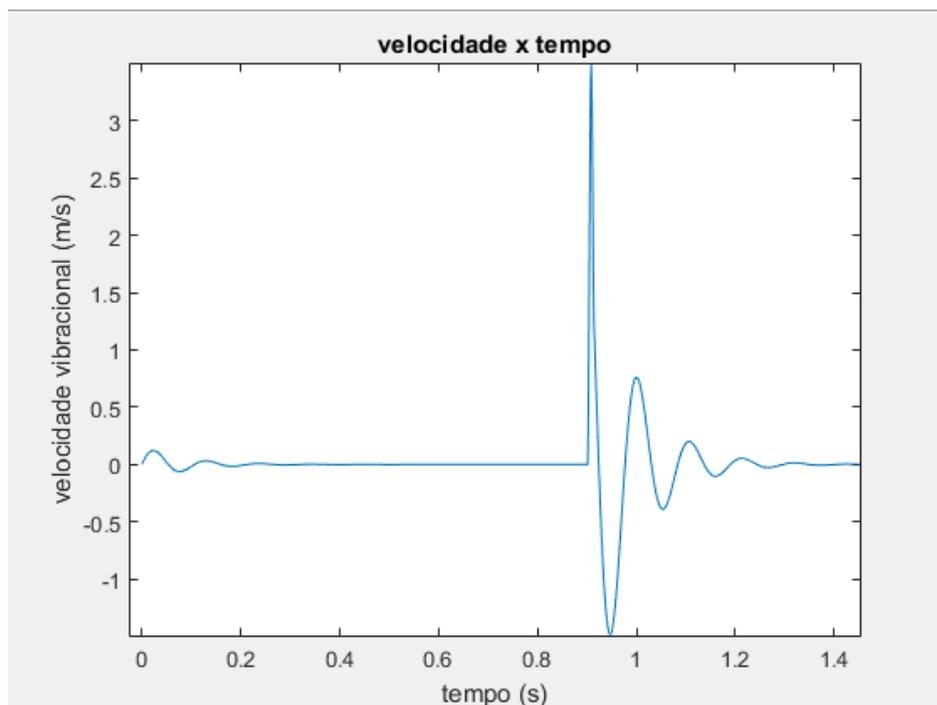


Figura 62: Velocidade vibracional com amortecimento de 6761

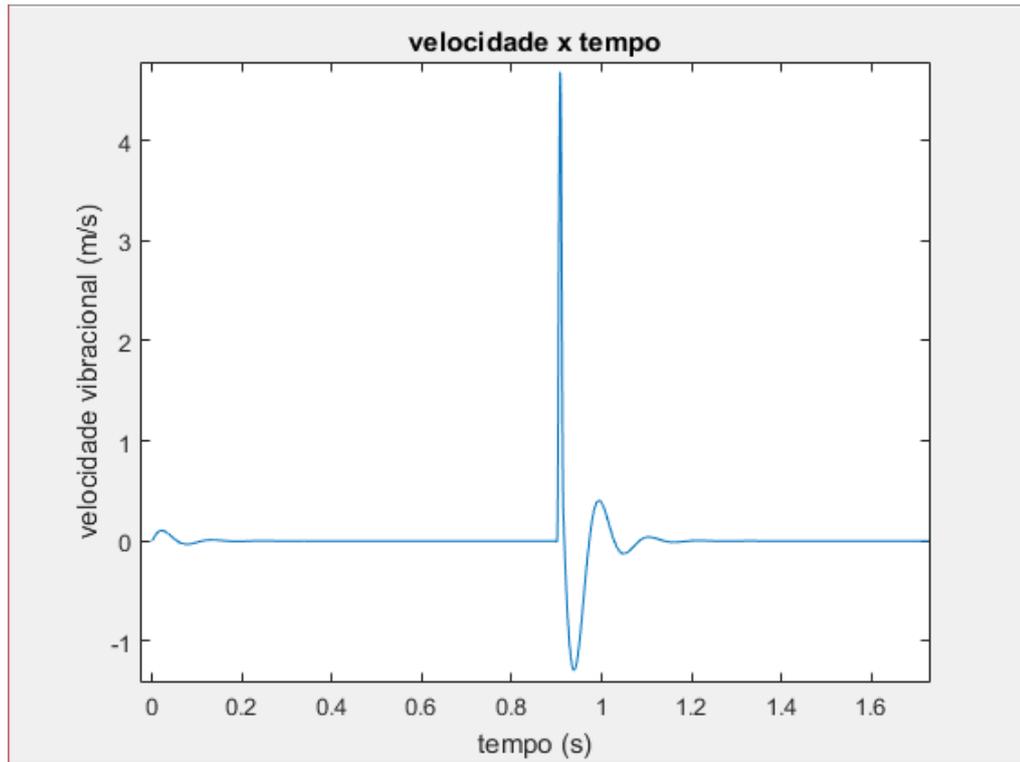


Figura 63: Velocidade vibracional com amortecimento de 11291

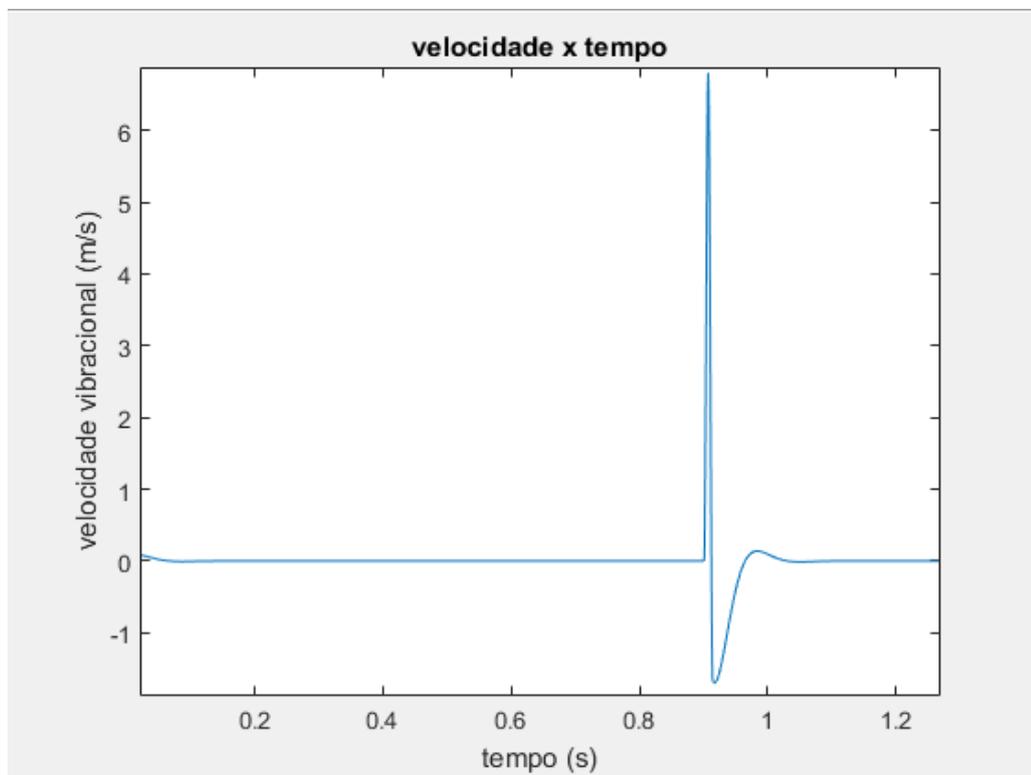


Figura 64: Velocidade vibracional com amortecimento de 20282

A Tabela 4 apresenta resultados com o pico de velocidade de oscilação que o veículo experimenta ao passar pelo obstáculo e o número de oscilações. O período de oscilação foi de 0,1s.

Tabela 4: Pico de Velocidade e Número de Oscilações – Simulações Numéricas com MATLAB

v = 2,7 m/s		
c (Nm/s)	Pico de velocidade vibratória (m/s)	Número de oscilações
3380	4,96	10
6761	2,92	5
11291	1,6	2,5
20282	0,6	2
v = 13,8 m/s		
c (Nm/s)	Pico de velocidade vibratória (m/s)	Número de oscilações
3380	2,1	11
6761	1,2	8
11291	0,65	2
20282	0,2	1,5
v = 22,2 m/s		
c (Nm/s)	Pico de velocidade vibratória (m/s)	Número de oscilações
3380	1,33	13
6761	0,8	8
11291	0,4	2
20282	0,15	1

V.7 – Resultados

O modelo desenvolvido utilizando o pacote computacional MATLAB (MATLAB,2015) considera um veículo com apenas 1 grau de liberdade com a rigidez da mola do amortecedor, como exemplificado na Figura 65. Diferentemente com o que se observa num caso real, o elemento mola resiste a carregamentos trativos e compressivos, não prevendo que

a roda perca a conexão com o solo. Isso acarreta em que o modelo possa prever que o pneu esteja submetido a uma força para baixo durante a simulação, o que pode acarretar em previsões irreais. Na análise desenvolvida considerou-se a rigidez do pneu (K_{pneu}) muito maior que a rigidez da mola (K_{mola}), o que a tornou desprezível no denominador da equação:

$$K_{eq} = \frac{K_{mola} \cdot K_{pneu}}{K_{mola} + K_{pneu}} \cong \frac{K_{mola} \cdot K_{pneu}}{K_{pneu}} = K_{eq} = K_{mola} \quad (10)$$

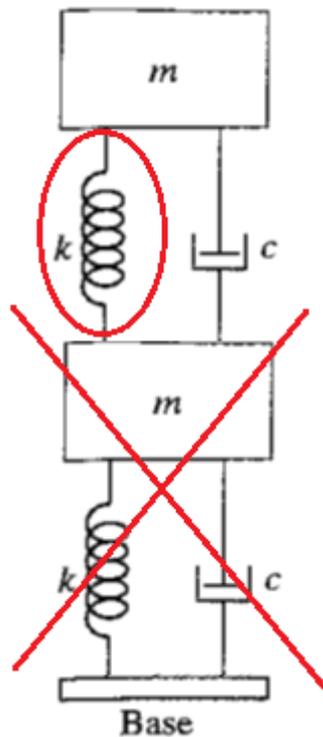


Figura 65: Modelo com 1 grau de liberdade, desconsiderando o amortecimento e a rigidez dos pneus

Analisando os resultados, pode-se averiguar que o elemento de SMA apresenta um desempenho superior aos materiais com o coeficiente de amortecimento menor. Em relação ao material com $c = 3380 \text{ Nm/s}$ o material estudado conseguiu se manter superior em todos os aspectos, atingindo patamares com mais de 380% de diferença. Um exemplo é na velocidade de $2,7 \text{ m/s}$, para o qual o aço comum atingiu um pico de deslocamento $5,2 \text{ cm}$ maior do que o

material pseudoelástico, oscilando 10 vezes em um intervalo de um segundo com uma velocidade de vibração máxima de aproximadamente 5 m/s e mantendo patamares próximos nas velocidades maiores também.

O aço com $c = 6761$ Nm/s obteve melhora de mais de 50% quando comparado aos resultados do aço anterior, porém ainda abaixo dos resultados obtidos na memória de forma. Na velocidade de 13,8 m/s por exemplo ele apresentou um deslocamento máximo de 1,65 cm oscilando 8 vezes em um intervalo de 0,8 segundos com velocidade de vibração máxima de 1,2 m/s, também mantendo patamares próximos nas outras velocidades.

Em relação ao material com coeficiente de amortecimento maior, nos campos “Tempo de oscilação” e “Número de oscilações” observamos que os dois materiais ficaram bem pareados em todas as velocidades, com variações não muito grandes entre os dois. Em relação ao deslocamento foi notado que os valores foram diminuindo à medida que a velocidade foi aumento, chegando a uma diferença 2 mm a 22,2 m/s. O fator mais discrepante foi a velocidade vibratória, que mesmo na menor diferença apresentou-se cerca de 166% maior no material com memória de forma do que no material comum.

Capítulo 6

Conclusões

As vibrações estão presentes no uso diário dos veículos automotivos, seja pelo funcionamento do veículo ou por ondulações na pista onde trafega. As vibrações provocam inúmeros problemas como: trincas e rachaduras no chassi, empeno em peças da suspensão e falhas por excesso de esforço. As vibrações também afetam o conforto interno dos passageiros e por isso o amortecimento tem sido constantemente estudado e aprimorado nas suspensões automotivas.

O trabalho utilizou os conceitos de vibrações mecânicas amortecida para estudar melhorias no conforto dos automóveis e durabilidade dos componentes de suspensão. Através da pesquisa em artigos, dissertações e projetos de conclusão de curso foram identificados diversos problemas de vibrações. Observou-se que as SMAs possuem propriedades de amortecimento histerético associado ao processo de transformação de fase induzida por tensão, possibilitando sua utilização na construção da suspensão. Para o desenvolvimento do projeto utilizaram-se os pacotes computacionais Ansys (ANSYS,2015) e Matlab(MATLAB,2015) .

O pacote computacional Ansys foi utilizado para uma análise estática complexa envolvendo não linearidades constitutivas associadas ao fenômeno de transformação de fase. Um modelo simplificado foi construído para desenvolver simulações numéricas com o objetivo de estimar um coeficiente de amortecimento equivalente. O modelo simplificado envolve uma viga engastada submetida a um esforço de flexão pura. Através do modelo, que permite a simular a evolução da fração volumétrica da martensita induzida pelo carregamento mecânico, foi possível obter a curva histerética do elemento. Obteve-se com o modelo desenvolvido uma estimativa para o coeficiente de amortecimento de 11291Nm/s. Os resultados do modelo de elementos finitos mostraram a presença de um laço de histerese na curva força x deslocamento, o que confirma a possibilidade da utilização deste material como um absorvedor de vibrações.

O pacote computacional Matlab foi utilizado para realizar uma análise dinâmica do efeito do amortecimento. Foi utilizado um modelo de vibração livre com excitação de base de um grau de liberdade. A intenção foi representar um veículo trafegando em uma pista com um

ressalto e comparar diferentes de coeficientes de amortecimento dos materiais lineares-elásticos com o encontrado na análise estática de elementos finitos do material com pseudoelasticidade. Nessa análise foi constatado que o material se apresentou bastante superior aos com os menores fator de amortecimento ($\xi = 0,05$) e ($\xi = 0,1$), apresentando resultados com mais de 100% de diferença para o coeficiente de 0,1 e cerca de 50% para o coeficiente de 0,05. Em relação ao maior coeficiente, o elemento apresentou bons resultados, principalmente em velocidades elevadas, sendo a única grande discrepância a velocidade vibracional.

Após as análises, foi constatado que o material apresentou bons resultados, mas ainda possui um elevado preço de fabricação o que, neste momento, inviabiliza a fabricação para comercialização.

VI.1 Sugestões

Para o desenvolvimento de trabalhos futuros, deixa-se como sugestão o desenvolvimento de modelos com dois ou mais graus de liberdade, que representem uma situação mais próxima à experimentada pelos sistemas de amortecimento automotivos. O modelo de elementos finitos pode ser utilizado representando elementos de SMA com geometrias mais complexas e submetidos a esforços mais complexos além de uma simulação dinâmica.

O estudo das vibrações amortecidas também pode ser realizado simulando-se o comportamento de elementos com outros materiais inteligentes alternativos.

Capítulo 7

Referências Bibliográficas

- **ADEODATO, A.**; *Redução de Vibrações em Eixos utilizando Elementos de Ligas com Memória de Forma*, Projeto Final, Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2014.
- **AGUIAR, R. A. A.**; *Análise da Redução de Vibrações em Sistemas Mecânicos Utilizando Ligas com Memória de Forma*, Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2011.
- **AQUINO, A .S.**; *Controle de Vibração de um Sistema sob Deslabanceamento Rotativo Utilizando Atuador de Liga com Memória de Forma*, Tese de Doutorado, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, Paraíba, 2011.
- **Auto Entusiastas**, <<https://www.autoentusiastas.com.br>>, 2000
- **Best Cars**, <<https://www.bestcars.uol.br>>, 2015
- **BLANDON, C. A.**; *Equivalent Viscous Damping Equation for Direct Displacement Based Design*, Master Degree Dissertation, European School of Advanced Studies in Reduction of Seismic Risk, Università degli Studi di Paiva, Paiva, Italy, 2004.
- **Car Place**, <<https://www.carplace.com>>, 2012
- **Cargo Bull**, <<https://www.cargobull.com.br>>, 2009
- **CARVALHO, A. L. A.**; *Análise Experimental da Dinâmica não Linear de um Oscilador com Memória de Forma*, Projeto Final, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2014.

- **CASTILHO, W. S., da Silva, E. P.** “Algumas Aplicações das Ligas Com Memória de Forma Shape Memory Alloys – Sma”, Sinergia, São Paulo, v. 12, n. 1, p. 99-108, jan./abr. 2011.
- **Circula Seguro**, <<https://www.circulaseguro.pt.br>>, 2013
- **FERREIRA, H. T.;** *Determinação das Frequências Naturais e Modos de Vibrar de um Veículo de Dois Eixos Através de um Programa Computacional em MatLab-Simulink*, Escola de Engenharia de São Carlos Universidade de São Paulo, São Carlos, São Paulo, Brasil, 2003.
- **FREITAS, L. M. P. Jr.;** *Estudo da Dinâmica Vertical de uma Suspensão Veicular do Tipo Macpherson*, Tese de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, São Paulo, Brasil, 2006.
- **Friscar Engates**, <<https://www.friscarengates.com.br>>, 2008
- **Jocar**, <<https://www.jocar.com.br>>, 2015
- **OLIVEIRA, F. S.;** *Projeto de um Amortecedor para Protótipo de Veículo Fora-de-Estrada*, Projeto Final, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2014.
- **OLIVEIRA, G .C .M.,** “Analysis Of The Pseudoelastic Behavior Of Helical Spring Attenuators Using The Finite Element Method”, Tese de mestrado, ITA, São José dos Campos, São Paulo, Brasil, 2010.
- **OLIVEIRA, G .C .M.;** *Caracterização Microestrutural e Mecânica da Liga NiTi com EMF Produzida em Forno de Indução a Vácuo*, Tese de Mestrado, ITA, São José dos Campos, São Paulo, Brasil, 2010.
- **PACHECO, P. M. C. L., de AGUIAR, R. A. A., RAIGUSOFF, I. I. T., da HORA, R. B., ADEODATO, A.,** “Modeling Pseudoelastic Vibration Attenuators Elements Using The Finite Element Method”, COBEM, Ribeirão Preto, São Paulo, 3-7 Novembro 2013.
- **PACHECO, P. M. C. L, de AGUIAR, R .R .A, RODRIGUES,V.G, SAVI,V.A, da HORA,R.B.,** “Analysis Of The Pseudoelastic Behavior Of Helical Spring Attenuators Using The Finite Element Method”, CONEM, Uberlândia, São Paulo, 10-15 Agosto 2014.

- PINA, E. A. C.; *Estudo da Estabilização na Liga Cu-Al-Mn com Memória de Forma*, Tese de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Pernambuco, Brasil 2006.
- **Quatro Rodas**, <<https://www.quatrorodas.abril.com.br>>, 2010
- **RAO,S.**; *Vibrações mecânicas*, 4 ed. PEARSON, Prentice Hall, 2008.
- **Razão Automóvel**, <<https://www.razaoautomovel.com.br>>, 2015
- **Torezzan Pneus**, <<https://www.torezzanpneus.com.br>>, 2000
- **UOL Carros**, <<https://www.carros.uol.com.br>>, 2013
- **VWCCO**, <<https://www.vwcco.com.br>>, 2001
- **Scielo**, < <https://www.scielo.org.br>>, 2010
- **Suspensão automotiva**, <<https://www.suspensaoautomotiva.com.br>>, 2014

APÊNDICE I: Rotina em Ansys

finish

/clear,nostart

/REP,FAST

/COLOR,PBAK,OFF

/REPLOT

C*** PRE-PROCESSAMENTO =====

/PREP7

/TITLE,Viga em Flexao - Elementos Planos

!TipoAnalise=0 ! Análise Linear Elástica

TipoAnalise=1 ! Análise SMA

C*** DEFINICAO DAS CONSTANTES =====

L=0.5100

b=0.100

h=0.100

P=2661428.571

E=200e9

v=0.29

SIG_SAS=(620e6) ! Tensão de início da transformação de fase (MPa)

SIG_FAS=(750e6) ! Tensão final da transformação de fase (MPa)

SIG_SSA=(400e6) ! Tensão de início da inversão da transformação de fase (MPa)

SIG_FSA=(200e6/1.5) ! Tensão final da inversão da transformação de fase (MPa)

EPSILON=0.07 ! Máxima deformação residual (mm/mm)

ALPHA=0 ! Parâmetro que afeta a resposta do material em compressão e
tensão

```
*IF, TipoAnalise, EQ, 1, THEN
```

```
    TB, SMA, 1, 1
```

```
    TBDATA, 1, SIG_SAS, SIG_FAS, SIG_SSA, SIG_FSA, EPSILON, ALPHA ! Limpa as
propriedades de material
```

```
*ENDIF
```

```
fator=4
```

```
PI=ACOS(-1)
```

```
C*** DEFINICAO DOS ELEMENTOS =====
```

```
ET, 1, PLANE42, ,, 3 ! Elemento plano 4 nos
```

```
R, 1, b ! definicao da espessura da viga
```

```
ET, 2, SOLID185 ! Elemento 3D
```

```
KEYOPT, 1, 2, 1 ! KEYOPT para definir integração
completa no elemento
```

```
C*** DEFINICAO DAS PROPRIEDADES =====
```

```
MP, EX, 1, E ! Material do corpo
```

```
MP, NUXY, 1, v
```

```
MP, EX, 2, E*100 ! Material do corpo
```

```
MP, NUXY, 2, v
```

```
C*** DEFINICAO DA GEOMETRIA =====
```

```
x1=0
```

```
y1=0
```

```
x2=L
```

```
y2=0
```

```
x3=(9*L)/8
```

$$y3=0$$

$$x4=(9*L)/8$$

$$y4=h$$

$$x5=L$$

$$y5=h$$

$$x6=0$$

$$y6=h$$

$$x7=0$$

$$y7=0$$

$$z7=b$$

$$x8=L$$

$$y8=0$$

$$z8=b$$

C*** DEFINICAO DOS KEYPOINTS =====

k,1,x1,y1

k,2,x2,y2

k,3,x3,y3

k,4,x4,y4

k,5,x5,y5

k,6,x6,y6

k,7,x7,y7,z7

k,8,x8,y8,z8

C*** GERACAO DAS AREAS =====

A,1,2,5,6

A,2,3,4,5

L,1,7 ! Linha guia

L,2,8 ! Linha guia

C*** GERACAO DA MALHA =====

ESIZE,(h/2)/fator ! define o tamanho do elemento a ser utilizado na malha

AMESH,ALL

TYPE,2

ESIZE,,2*fator

MAT,1

VDRAG,1,,,,,8, ! === GERAÇÃO DOS ELEMENTOS SÓLIDOS AO LONGO DA
LINHA GUIA

MAT,2

VDRAG,2,,,,,8, ! === GERAÇÃO DOS ELEMENTOS SÓLIDOS AO LONGO DA
LINHA GUIA

nummrg,all,1e-6

ASEL,S,LOC,Z,0,0 ! Prescricao do engaste na linha na posição x=0

ACLEAR,ALL

ASEL,ALL

!/eof

C*** CONDICÕES DE CONTORNO E FORCAMENTO =====

ASEL,S,LOC,X,0,0 ! Prescricao do engaste na linha na posição x=0

DA,ALL,SYMM

ASEL,ALL

```

DK,1,ALL,0          ! Prescricao de deslocamento nulo no keypoint 1 em todas as
direções

DK,7,UY,0          ! Prescricao de deslocamento nulo no keypoint 7 na direção
vertical

!DA,7,UX,0        ! Prescricao de deslocamento nulo no keypoint 1 em todas as
direções

FK,3,FX,-P/4      ! Prescricao da força no keypoint 3

FK,4,FX,P/4       ! Prescricao da força no keypoint 4

FK,15,FX,P/4     ! Prescricao da força no keypoint 13

FK,14,FX,-P/4    ! Prescricao da força no keypoint 14

!/eof

C*** SOLUÇÃO =====

/SOL

nDiv=20

OUTRES,ALL,ALL

OUTPR,ALL,ALL

KSEL,S, , , 15    ! Definição dos nós para armazenamento das variáveis

NSLK,S

*GET, n15, NODE, 0, num, MAX,

ALLSEL,ALL,ALL

KSEL,S, , , 3     ! Definição dos nós para armazenamento das variáveis

NSLK,S

*GET, n3, NODE, 0, num, MAX,

ALLSEL,ALL,ALL

KSEL,S, , , 4     ! Definição dos nós para armazenamento das variáveis

```

NSLK,S

*GET, n4, NODE, 0, num, MAX,

ALLSEL,ALL,ALL

*DIM,Forca,ARRAY,2*nDiv

*DIM,Deslocamento,ARRAY,2*nDiv

*DO,ii,1,nDiv,1

! Load Steps - Carregamento

TIME,ii

F_amp=P*ii/nDiv

FK,3,FX,-F_amp/4 ! Prescricao da força no keypoint 3

FK,4,FX,F_amp/4 ! Prescricao da força no keypoint 4

FK,15,FX,F_amp/4 ! Prescricao da força no keypoint 13

FK,14,FX,-F_amp/4 ! Prescricao da força no keypoint 14

SOLVE

*GET, u4x,NODE,n4,U,x

*GET, u4y,NODE,n4,U,y

*GET, u3x,NODE,n3,U,x

*GET, u3y,NODE,n3,U,y

num=u4x-u3x

den=h

*IF,den,EQ,0,THEN

Deslocamento(ii)=90

*ELSE

```

        aux=num/den

        Deslocamento(ii)=ASIN(aux)*180/PI

    *ENDIF

    Forca(ii)=4*F_amp

*ENDDO

!/EOF

*DO,ii,1,nDiv,1                                ! Load Steps - Descarregamento

    TIME,ii

    F_amp=P*(nDiv-ii)/nDiv

    FK,3,FX,-F_amp/4                            ! Prescricao da força no keypoint 3

    FK,4,FX,F_amp/4                             ! Prescricao da força no keypoint 4

    FK,15,FX,F_amp/4                           ! Prescricao da força no keypoint 13

    FK,14,FX,-F_amp/4                          ! Prescricao da força no keypoint 14

    SOLVE

    *GET, u4x,NODE,n4,U,x

    *GET, u4y,NODE,n4,U,y

    *GET, u3x,NODE,n3,U,x

    *GET, u3y,NODE,n3,U,y

    num=u4x-u3x

    den=h

    *IF,den,EQ,0,THEN

        Deslocamento(ii+nDiv)=90

    *ELSE

        aux=num/den

```

Deslocamento(ii+nDiv)=ASIN(aux)*180/PI

*ENDIF

Forca(ii+nDiv)=4*F_amp

*ENDDO

ESEL,U,MAT,,2

! PLOT RESULTS / CONTOUR PLOT / NODAL SOLUTION / PLASTIC STRAIN /
EQUIVALENT PLASTIC STRAIN

APÊNDICE II: Rotina no Matlab

Equação Principal

```

clear
close all
global m b k a d v w t1 t2 d0 y0 Ft

% Definição de Variáveis
m=1080/4; % massa do carro [kg]
Ft=m*9.81; % forçamento externo no carro [N]
k=983000; % rigidez da mola [N/m]
b=6761; % amortecimento do sistema [N.s/m]
y0=0.10; % amplitude da curva do quebra-mola
a=[0 1;-k/m -b/m];
d=20; % distância até o quebra molas
v=22.2; % velocidade do carro [m/s]
d0=0.30; % comprimento do quebra mola [m]
w=(2*pi*v)/d0; % frequencia de oscilação [rad/s]
t1=d/v; % momento de chegada no quebra-mola [s]
t2=t1+(d0/v); % momento de saída do quebra-mola [s]
tspan=[0 20]; % vetor de variação de tempo
t0=[0 0]; % deslocamento e velocidade iniciais
% fim de definição de variáveis

% Integração da equação de Estado

[t,y]=ode45('equacao',tspan,t0);
n=length(t);
x=y(1:n,1);
xp=y(1:n,2);
figure(1)
plot(t,x)
xlabel ('tempo (s)')

```

```

ylabel ('deslocamento (m)')
title ('deslocamento x tempo')
figure(2)
plot(t,xp)
xlabel ('tempo (s)')
ylabel ('velocidade vibracional (m/s)')
title ('velocidade x tempo')

```

Método de Runge Kutta

```

function yp=equacao(t,y)
global m b k a w t1 t2 y0 Ft

if t<t1
    yb=0;
    ybp=0;
else
    if t<=t2
        T=t-t1;
        yb=(y0/2)*(1-cos(w*T));
        ybp=w*(y0/2)*(sin(w*T));
    else
        yb=0;
        ybp=0;
    end
end

end

Ft

bu=[0;(Ft+b*ybp+k*yb)/m];
yp=a*y+bu;
end

```