

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

Capitão-de-Corveta (FN) GILMAR DIOGO GUEDES

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DO SISTEMA
VIATURA - METRALHADORA CALIBRE .50**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Mecânica do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciências em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Fernando Ribeiro da Silva – D. Sc.

Rio de Janeiro

2010

c2010

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

Praça General Tibúrcio, 80 – Praia Vermelha

Rio de Janeiro – RJ CEP: 22290-270

Este exemplar é de propriedade do Instituto Militar de Engenharia, que poderá incluí-lo em base de dados, armazenar em computador, microfilmear ou adotar qualquer forma de arquivamento.

São permitidas a menção, reprodução parcial ou integral e a transmissão entre bibliotecas deste trabalho, sem modificação de seu texto, em qualquer meio que esteja ou venha a ser fixado, para pesquisa acadêmica, comentários e citações, desde que sem finalidade comercial e que seja feita a referência bibliográfica completa.

Os conceitos expressos neste trabalho são de responsabilidade do autor e do orientador.

629.8312
L533m

Guedes, Gilmar Diogo.

Modelagem e simulação da Dinâmica do Sistema Viatura-Metralhadora calibre .50 / Gilmar Diogo Guedes.
Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia, 2010.
114p.: il.,

Dissertação (mestrado) – Instituto Militar de Engenharia.
– Rio de Janeiro, 2010.

1. Engenharia Mecânica – dissertação
2. Grafos de ligação. 3. Sistemas dinâmicos.
4. modelagem e simulação. I. Título. II. Instituto Militar de Engenharia

CDD 629.8312

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

Capitão-de-Corveta (FN) GILMAR DIOGO GUEDES

MODELAGEM E SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DO SISTEMA VIATURA - METRALHADORA CALIBRE .50

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Mecânica do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciências em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Fernando Ribeiro da Silva – D. Sc.

Aprovada em 21 de dezembro de 2010 pela seguinte Banca Examinadora:

Prof. Fernando Ribeiro da Silva – D.Sc. IME – Presidente

Prof. Arnaldo Ferreira – Ph.D. IME

Prof. Mauro Speranza Neto – D.Sc. PUC

Prof. Ricardo Teixeira da Costa Neto – MAJ/QEM – D.Sc. IME

Rio de Janeiro

2010

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar ao Senhor Deus, que permitiu minha entrada neste mestrado e me sustentou em todos os momentos ao longo destes últimos dois anos. A ele toda honra e toda glória.

Em especial quero agradecer à minha querida esposa Érica e filha Isabel pela compreensão pelas minhas ausências ao longo destes dois anos, pelo imenso carinho e apoio nas horas difíceis e por elas serem o meu tesouro nesta vida, aquilo de mais precioso que Deus poderia me dar, a minha família.

À minha querida mãe, Elza, pelo seu amor, carinho e apoio ao longo de toda minha vida.

À minha segunda mãe, Maria Irene, minha sogra, pela fundamental ajuda nos meses finais do mestrado, quando assumiu os cuidados da minha pequena filha para que eu pudesse me dedicar integralmente ao curso.

Ao meu orientador, Prof. Fernando Ribeiro da Silva, pelo apoio e disponibilidade que dedicou ao meu trabalho.

Aos amigos da Engenharia Mecânica pelo apoio e camaradagem.

“Teu, Senhor, é o poder, a grandeza, a honra, a vitória e a majestade; por que teu é tudo quanto há nos céus e na terra; teu Senhor, é o reino, e tu te exaltaste por chefe sobre todos. Riquezas e glória vêm de ti, tu dominas sobre tudo, na tua mão há força e poder; contigo está o engrandecer e a tudo dar força. Agora, pois, ó nosso Deus, graças te damos e louvamos o teu glorioso nome.”

1Crônicas 29:11-13. (Bíblia Sagrada)

SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES.....	9
LISTA DE TABELAS.....	12
LISTA DE ABREVIATURAS.....	13
1. INTRODUÇÃO	16
1.1. Motivação.....	16
1.2. Características da viatura.....	19
1.3. Características do armamento.....	20
1.4. Objetivo.....	21
1.5. Procedimento.....	22
1.6. Importância do estudo.....	23
1.7. Organização.....	24
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
2.1. Revisão sobre a utilização da técnica dos Grafos de Ligação.....	25
2.2. Revisão sobre Dinâmica Veicular.....	29
3. CONCEITOS DA DINÂMICA VEICULAR	32
3.1. Suspensões.....	34
3.2. Pneus.....	35
4. MODELAGEM DO SISTEMA	36
4.1. Caracterização do sistema dinâmico a ser modelado.....	36
4.2. Modelagem Plana.....	38
4.2.1. Modelagem dos Pneus e Rodas.....	39

4.2.2.	Modelagem do Chassi e Suspensões.....	42
4.2.3.	Modelagem dos subsistemas “Pneus”, “Rodas”, “Suspensão” e “Chassi” (½ carro).....	46
4.2.4.	Modelagem do Reparo.....	49
4.2.5.	Modelagem da Metralhadora.....	57
4.2.6.	Modelagem do Reparo e da Metralhadora.....	61
4.2.7.	Modelagem de todos os subsistemas (Modelo Plano Completo)....	64
4.3.	Modelagem do Sistema em Três Dimensões.....	66
4.3.1.	Modelagem dos subsistemas “Pneus”, “Rodas”, “Suspensão” e “Chassi”(carro completo).....	67
4.3.2.	Modelagem do Reparo.....	69
4.3.3.	Modelagem do Reparo e da Metralhadora.....	73
4.3.4.	Modelagem e resultados dos subsistemas acoplados.....	77
4.3.4.1.	Resultados para os subsistemas acoplados (força constante).....	81
4.3.4.2.	Resultados para os subsistemas acoplados (força em pulso).....	85
4.3.4.3.	Resultados para os subsistemas acoplados (força real).....	88
5.	ASPECTOS CONSTRUTIVOS DO REPARO E SUA INSTALAÇÃO.....	91
6.	CONCLUSÕES.....	97

7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	99
8.	APÊNDICE.....	103
8.1.	Grafos de Ligação (Bond Graphs).....	104
8.2.	Origem dos Grafos de Ligação.....	104
8.3.	Sistemas, subsistemas e componentes.....	105
8.4.	Técnica dos Grafos de Ligação.....	106
8.5.	Grafos Multiligação.....	109
8.6.	Modelo de Estado.....	113
8.7.	Implementação.....	114

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIG.1.1 Viaturas pertencentes ao Exército Inglês	16
FIG.1.2 Viaturas pertencentes ao CFN.....	17
FIG.1.3 Viaturas Land Rover do Exército utilizadas no Haiti	17
FIG.1.4 Viaturas do Corpo de Fuzileiros Navais no Haiti	18
FIG.1.5 Mtr .50 com reparo utilizado em embarcações.....	20
FIG.3.1 Estado de massa e Momento de Inércia	32
FIG.3.2 Eixos e Movimentos de referência	33
FIG.3.3 Esquema básico de uma suspensão	34
FIG.3.4 Tipos de Construção de pneus	35
FIG.4.1 Acoplamento entre os subsistemas (a) e Modelo Físico(b).....	37
FIG.4.2 Modelo físico de meio carro.....	38
FIG.4.3 Grafo Multiligação Rodas (a) e Pneus (b).....	39
FIG.4.4 Acoplamento dos subsistemas “Pneus” e “Rodas”.....	40
FIG.4.5 Força transmitida pelo pneu dianteiro.....	41
FIG.4.6 Grafos multiligação da suspensão (a) e do chassi (b) e o modelo físico do acoplamento destes subsistemas (c).....	42
FIG.4.7 Acoplamento entre os subsistemas “Chassi” e “Suspensão”.....	44
FIG.4.8 Forças Transmitidas pelas suspensões.....	44
FIG.4.9 Diagrama de Corpo Livre do Chassi.....	45
FIG.4.10 Grafo multiligação viatura.....	47
FIG.4.11 Ligações do sistema “1/2 viatura”.....	47
FIG.4.12 Forças transmitidas pelos pneus.....	48
FIG.4.13 Grafo Multiligação genérico para estruturas.....	49
FIG.4.14 Confeção do grafo multiligação do reparo.....	50
FIG.4.15 Modelo físico e Grafo Multiligação do Reparo	51
FIG.4.16 Matriz genérica da estrutura do Reparo	52

FIG.4.17	Particionamento da matriz de massa.....	53
FIG.4.18	Ligações feitas no Simulink para o Reparo.....	55
FIG.4.19	Forças e Momento transmitido pelo Reparo.....	57
FIG.4.20	Modelo simplificado da metralhadora.....	58
FIG.4.21	Grafo de Ligação da Metralhadora.....	58
FIG.4.22	Curva “Pressão x Tempo” da Metralhadora.....	59
FIG.4.23	Ângulo de elevação da metralhadora.....	60
FIG.4.24	Ligações no Simulink.....	60
FIG.4.25	Forças transmitidas pela metralhadora (30 graus).....	61
FIG.4.26	Grafo de ligação dos subsistemas “Reparo” e “Metralhadora”.....	61
FIG.4.27	Ligações do subsistema “Reparo” e “Metralhadora”.....	62
FIG.4.28	Forças transmitidas pelo Reparo.....	63
FIG.4.29	Grafo de ligação do modelo completo.....	64
FIG.4.30	Ligações no Simulink do modelo completo plano.....	65
FIG.4.31	Forças e Deslocamentos nos Pneus (Zero grau).....	66
FIG.4.32	Modelo do veículo com sete graus de liberdade.....	68
FIG.4.33	Modelo completo da viatura no Simulink.....	68
FIG.4.34	Forças transmitidas pelos pneus.....	69
FIG.4.35	Matriz genérica do reparo e seu modelo físico.....	70
FIG.4.36	Particionamento da matriz de Massa.....	71
FIG.4.37	Ligações do subsistema Reparo no Simulink.....	71
FIG.4.38	Forças Transmitidas pelo Reparo.....	72
FIG.4.39	Momentos transmitidos pelo reparo.....	72
FIG.4.40	Acoplamento entre os subsistemas Reparo e Metralhadora.....	73
FIG.4.41	Ligações dos subsistemas Reparo e Metralhadora.....	74
FIG.4.42	Posição da força em relação aos eixos.....	75
FIG.4.43	Forças transmitidas pelo reparo (zero grau).....	75
FIG.4.44	Momentos transmitidos pelo reparo (zero grau).....	76
FIG.4.45	Forças transmitidas pelo Reparo.....	76
FIG.4.46	Momentos transmitidos pelo Reparo.....	77
FIG.4.47	Acoplamento dos subsistemas.....	78

FIG.4.48 Comparação entre as curvas de pressão.....	79
FIG.4.49 Curva da força da metralhadora.....	80
FIG.4.50 Engaste do reparo ao chassi.....	80
FIG.4.51 Tensão resultante na seção de ligação do reparo no chassi.....	81
FIG.4.52 Forças transmitidas pelos pneus (zero grau).....	82
FIG.4.53 Forças transmitidas pelos pneus (90 graus).....	83
FIG.4.54 Forças transmitidas pelos pneus (270 graus).....	84
FIG.4.55 Curva de forças e a seqüência de pulsos utilizado para testar o modelo.....	85
FIG.4.56 Tensão na base do reparo e uma ampliação desta.....	86
FIG.4.57 Comparação entre as tensões na base do reparo.....	87
FIG.4.58 Curva de uma rajada da metralhadora.....	89
FIG.4.59 Tensão produzida na base do reparo.....	89
FIG.4.60 Ampliação do gráfico da tensão na base do reparo.....	90
FIG.5.1 Vários tipos de viatura com reparos para metralhadora cal.50.....	92
FIG.5.2 Modelos de reparos.....	93
FIG.5.3 Reparo em forma de viga.....	94
FIG. 5.4 Estrutura do reparo como viga.....	94
FIG.5.5 Reparo como estrutura circular.....	95
FIG.5.6 Viaturas Land Rover equipadas com reparo circular.....	95
FIG.5.7 Viaturas AM-1 e AM-11 REC.....	96
FIG.8.1 Esquema de válvula servo.....	106
FIG.8.2 Representação de uma ligação.....	107
FIG.8.3 Causalidades numa ligação.....	107
FIG.8.4 Esquema de uma multiligação.....	110
FIG.8.5 Junção vetorial. (A) – representação de uma junção vetorial de ordem n. (B) – equivalente em junções escalares.....	111
FIG.8.6 Grafo de ligação (a) e Grafo Multiligação (b).....	112
FIG.8.7 Sequência utilizada no Simulink.....	114

LISTA DE TABELAS

TAB.1.1 Características da Viatura Agrale Marruá.....	19
TAB.1.2 Dados da Metralhadora .50.....	20
TAB.1.3 Munições calibre .50 fabricadas pela CBC.....	21
TAB.3.1 Aspectos principais da Dinâmica Veicular.....	33
TAB.4.1 Parâmetros utilizados.....	41
TAB.4.2 Parâmetros utilizados.....	45
TAB.4.3 Matrizes de Rigidez e Massa.....	52
TAB.4.4 Detalhamento da Entrada e Saída.....	55
TAB.4.5 Parâmetros.....	56
TAB.4.6 Parâmetros Utilizados.....	59
TAB.4.7 Parâmetros utilizados	67
TAB.8.1 Domínio Físico e Variáveis de Potência e de Energia.....	108
TAB.8.2 Representação e equações dos elementos.....	109
TAB.8.3 Representação dos elementos nas multiligações.....	111

LISTA DE ABREVIATURAS

Mtr .50	-	Metralhadora calibre .50.
Vtr (TNE-1/2 ton) Especificado.	-	Viatura de ½ Tonelada para Utilização em Terreno não
Mtr	-	Metralhadora
MAG	-	Metralhadora Automática a Gás
CFN	-	Corpo de Fuzileiros Navais

RESUMO

A literatura tem apresentado diversos modelos que visam simular o comportamento de veículos terrestres que trafegam nas mais variadas formas de terrenos. Em geral esses veículos são considerados corpos rígidos, no caso dos monoblocos, ou corpos flexíveis, no caso de veículos pesados do tipo ônibus ou caminhões. De qualquer forma, esses modelos somente fazem uma abordagem do veículo como um todo, sendo considerado um único sistema dinâmico.

Este trabalho propõe uma sistemática de análise modular para que o sistema veículo e o subsistema dinâmico a ele instalado sejam modelados de forma modular permitindo suas análises isoladas e, posteriormente, em conjunto. O modelo utilizado como exemplo de aplicação do procedimento modular é o de uma viatura militar onde foi instalado o suporte de uma metralhadora. As características dinâmicas da viatura, da estrutura do suporte e do armamento são consideradas no modelo. O procedimento de modelagem é o da técnica dos grafos de ligação que facilitam a representação do correspondente diagrama de blocos

Somente a dinâmica vertical é verificada. Como armamento é utilizada a metralhadora calibre .50, cuja curva de pressão obtida permitiu ser mensurado o valor da força transmitida para a viatura por ocasião do disparo. São feitas simulações para teste do modelo, com a elevação e direção da metralhadora sendo alteradas, onde são verificadas as tensões transmitidas para a viatura, como também as forças transmitidas pelos pneus para o solo.

Por fim, é feita uma avaliação das possibilidades de instalação de uma estrutura para suporte da metralhadora, sendo sugeridas alterações na viatura de forma que esta possa suportar os esforços provenientes do disparo da metralhadora, como também testar sua estabilidade.

ABSTRACT

The literature has presented several models that simulate the behavior of ground vehicles traveling on various forms of terrain. Generally these vehicles are considered rigid bodies, in the case of the boxes, or flexible bodies, in the case of heavy vehicles like buses or trucks. Anyway, these models are only one approach the vehicle as a whole, is considered a single dynamic system.

This paper proposes a systematic analysis of the modular vehicle system and subsystem dynamic is modeled it installed in a modular fashion allowing their individual evaluations and then together. The model used as an example of application of the modular is a military vehicle where it was installed on the support of a gun. The dynamic characteristics of the vehicle, the support structure and armaments are considered in the model. The modeling procedure is the technique of bond graphs that facilitate the representation of the corresponding block diagram.

Only the vertical dynamics is verified. Weaponry is used .50 caliber machine gun, whose pressure curve obtained permitted to be measured the amount of force transmitted to the car during the shooting. For simulations to test the model, with the elevation and direction of the machine gun changed, where tensions are checked transmitted to the vehicle, but also the forces transmitted by the tire to the ground.

Finally an assessment is made of the possibilities of installing a support structure for the gun, suggesting adjustments to the car so that it can to support the efforts of the gun from firing, but also to test its stability.

1. INTRODUÇÃO

1.1. MOTIVAÇÃO

Os veículos *Off-Road* (Fora de estrada) ganham destaque dentro das Forças Armadas pelas suas características de operar em diversos tipos de terreno, de transpor uma série de obstáculos, além de transportar uma quantidade considerável de material, o que resulta em que as mesmas sejam utilizadas basicamente para transporte de pessoal e material. Em países com participação mais freqüente em conflitos armados, como a Inglaterra por exemplo, viaturas com características semelhantes às utilizadas pelo Brasil, como as Land Rover Defender, são utilizadas não só para transporte, mas também são configuradas como um sistema Viatura/Armamento para atuarem como uma plataforma de tiro móvel, proporcionando uma maior versatilidade na utilização da viatura e do armamento nela instalado, sendo conhecidas como “Veículos com Múltiplos Propósitos”, ou seja, veículos com inúmeras possibilidades de emprego, diferenciando-se das pertencentes às Forças Armadas brasileiras, particularmente da Marinha, em que os Fuzileiros Navais utilizam viaturas e armamentos, semelhantes aos utilizados pelo Exército da Inglaterra, separadamente e de forma bastante limitada, quando comparadas com as utilizadas pelos britânicos. Na **FIG. 1.1** são apresentadas duas Viaturas Land Rover do Exército Inglês atuando no Afeganistão, a primeira equipada com um lançador de Granadas 40mm MK-19 e uma Metralhadora MAG (a) e a segunda com uma Metralhadora .50 e uma Metralhadora MAG (b)



(a)



(b)

FIG.1.1- Viaturas pertencentes ao Exército Inglês

Na **FIG.1.2** são apresentadas as viaturas utilizadas pelo CFN em suas atividades no Brasil, uma Toyota Bandeirantes (a), uma Agrale Marruá (b) e uma Land Rover Defender (c).



FIG. 1.2- Viaturas pertencentes ao CFN.

Devido à crescente participação das Forças Armadas Brasileiras em apoio a Organismos Internacionais, seu pessoal e material estão tendo de se ajustar às inúmeras situações de emprego que surgem. Atualmente o Brasil participa de operações de paz da ONU em alguns países e, particularmente, a atuação no Haiti tem exigido que sejam feitas diversas adaptações e inovações em suas viaturas leves não blindadas, principalmente no tocante à segurança do pessoal nela embarcado, como também em apoio à tropa a pé que esteja atuando junto a estas viaturas. Em função disso, algumas adaptações foram feitas em suas viaturas. Um exemplo destas adaptações pode ser observado na **FIG.1.3**, onde é apresentada a instalação de blindagem adicional nas viaturas Land Rover do Exército (a) para serem enviadas ao Haiti, faltando ainda serem pintadas na cor branca, diferenciando-se das primeiras lá utilizadas sem qualquer proteção (b).



FIG.1.3. Viaturas Land Rover do Exército utilizadas no Haiti

No caso dos Fuzileiros Navais, suas viaturas leves não blindadas utilizadas no Haiti sofreram pequenas alterações, como por exemplo, a retirada de suas capotas e portas das Toyotas Bandeirantes, a instalação de outros modelos de bancos na parte traseira para facilitar o transporte e desembarque da tropa, além de um suporte para metralhadora calibre 5,56mm instalado na parte superior da estrutura do chassi para segurança em caso de capotagem conhecida como “Santo Antônio”. Na **FIG 1.4** é observada uma viatura Toyota Bandeirantes em utilização no Haiti sem sua cobertura de lona e portas (a) e com a tropa embarcada (b).



(a)



(b)

FIG.1.4 – Viaturas do Corpo de Fuzileiros Navais no Haiti

Ressalta-se que tais modificações nas viaturas brasileiras no Haiti são fruto de observações feitas em campo e sua execução feita em alguns casos, durante a própria missão, devido à urgência e de forma meramente técnica, sem estudos mais profundos e elaborados de engenharia. Observando-se algumas configurações realizadas por outros países em viaturas com características semelhantes, como também as necessidades oriundas das diversas operações que as Forças Armadas desenvolvem fora do Brasil, que tendem a aumentar pelo cenário internacional conturbado e pelas aspirações do Brasil junto a ONU, é notório que as Forças Armadas precisam repensar a utilização de seus meios. Para tal, é importante a realização de estudos mais elaborados de engenharia com relação às suas viaturas, que possam prever o comportamento destas quando equipadas com algum outro tipo de material em determinadas situações, como por exemplo, a utilização de armamentos instalados sobre estas. Visando a diminuição do custo financeiro, do tempo de fabricação, um melhor desempenho dinâmico dos sistemas e buscando maior clareza sobre fenômenos como tensões, forças, deslocamentos dentre outros, que na maioria das vezes afetam a durabilidade e manutenção dos equipamentos, ao invés de serem feitas adaptações para atender solicitações

pontuais e específicas como ocorreu no Haiti, é importante que seja criada uma ferramenta computacional que possa prever, por meio de um modelo matemático, o comportamento de tais meios. Tal ferramenta permitirá a execução de avaliações prévias do conjunto quando sujeito a inúmeras situações, possibilitando a confecção de projetos que contemplem as variáveis inseridas e previamente testadas num modelo computacional de confiança, que retrate com fidelidade o comportamento de tais meios. Em se tratando de sistemas dinâmicos instalados, como uma metralhadora, cresce ainda mais a importância de tal ferramenta, pois deve ser previsto o comportamento não somente da viatura, mas de todos os sistemas embarcados e suas mútuas interações. Como exemplo, o presente trabalho abordará o comportamento dinâmico de um conjunto composto por uma Viatura Agrale Marruá AM-1, apresentada na **FIG.1.2.(b)**, um suporte para metralhadora, conhecido como “Reparo”, em forma de uma viga maciça de seção reta circular e uma Metralhadora calibre .50 (12.7mm) Browning. Tanto a viatura, quanto o reparo e a metralhadora serão analisadas separadamente e posteriormente em conjunto, permitindo que sejam feitas medições, por exemplo, das tensões provocadas pelo disparo da metralhadora sobre o chassi da viatura, dos deslocamentos nas molas das suspensões e deformações dos pneus, dentre outros.

1.2. CARACTERÍSTICAS DA VIATURA

Dentre todas as características da viatura Agrale Marruá, estão apresentadas na **TAB.1.1** somente as que foram consideradas relevantes para o presente trabalho.

TAB.1.1- Características da Viatura Agrale Marruá

Suspensão	Barras longitudinais oscilantes e barra removível, com molas helicoidais e amortecedores de dupla ação.
Pneus	Pireli, modelo Scorpion Mud LT235/85R16 108Q.
Carroceria	Formada por elementos de chapa de aço
Chassi	Composto por longarinas e travessas de perfil tubular em aço de alta resistência
Ocupantes	4
Capacidade de carga	500 kg mais reboque de 500kg
Comprimento total	3800 mm
Bitola	1540 mm
Distância entre - eixos	2300 mm

1.3. CARACTERÍSTICAS DO ARMAMENTO

Segundo o Manual do Curso de Mecânico de Armamento do CFN, a Metralhadora calibre .50 funciona com o aproveitamento do *recuo do cano*, produzido pela expansão dos gases formados pela queima da carga de projeção. Para amortecer este recuo, permitir um movimento suave das partes móveis da arma e manter a estabilidade da mesma durante o tiro, a metralhadora possui um dispositivo chamado *amortecedor de recuo*, do tipo mecânico não ajustável, constituído por uma *forte mola com dupla função*, amortecedora-recuperadora, ligada ao prolongamento do cano, sendo, portanto, solidário aos movimentos de recuo e de avanço do cano, provocados, respectivamente, pela ação dos gases ou pela distensão das molas recuperadoras. O mecanismo interno da metralhadora é considerado um sistema mecânico composto de massas, molas e amortecedores, cuja excitação inicial se dá por meio da realização do disparo. A **FIG.1.5** apresenta dois tipos de reparo para utilização da Mtr .50, o reparo terrestre (a) e um modelo utilizado em embarcações da Marinha do Brasil (b).



(a)



(b)

FIG.1.5- Mtr .50 com reparo utilizado em embarcações.

Dentre todas as características da metralhadora calibre .50, serão apresentadas na **TAB.1.2** somente as que possuem alguma relevância para o presente trabalho.

TAB.1.2- Dados da Metralhadora .50

Calibre	.50 polegada ou 12,7 mm
Massa somente da arma	36,5 kg
Massa do cano	11,2 kg
Comprimento da arma	1,634 mm
Comprimento do cano	1,143 mm
Velocidade inicial	887 m/s
Cadencia teórica de tiro automático	450/550 TPM
Massa do Reparo	40 kg
Massa de um cofre municiado com 100 cartuchos comuns.	13,2 kg

A Companhia Brasileira de Cartuchos (CBC) fornece informações sobre as munições calibre .50 fabricadas no Brasil. Tais características são apresentadas na **TAB.1.3**, sendo destacada em vermelho a munição utilizada no presente trabalho.

TAB.1.3- Munições calibre .50 fabricadas pela CBC.

Munição	Projétil Peso grains	Balística			Utilização / Características	
		V m/s	E joules	Provete cm		
.50 Browning (12,7x99mm)						
1	Comum M33	655	887	16.699	91,4	Contra alvos não blindados, porém com velocidade média maior que o comum M2.
2	AP Perfurante M2	702	856	16.668	91,4	Contra alvos protegidos por blindagens leves, não blindados e abrigos de concreto.
3	API Perfurante incendiário M8	658	887	16.775	91,4	Contra alvos protegidos por blindagens leves que contenham líquidos inflamáveis, alvos não blindados, abrigos de concreto e alvos resistentes a projéteis comuns.
4	API-T Perfurante incendiário traçante M20	612	887	15.603	91,4	Combina as funções dos projéteis das munições traçante M17 ou M33 e perfurante incendiária M8.
5	AP-HC Perfurante c/ núcleo de metal duro	760	830	16.966	91,4	Mesma utilização do projétil Perfurante M2, entretanto com maior penetração. Este projétil perfura uma chapa de aço temperado com espessura de 22mm colocada a 550m da boca da arma.
6	API-HC Perfurante Incendiário-núcleo de metal duro	772	830	17.234	91,4	Mesma utilização do projétil Perfurante com núcleo de metal duro, porém com o poder incendiário.
7	Taçante M17	630	872	15.523	91,4	Treinamento de pessoal com a vantagem de poder ser visualizada a trajetória do projétil. O traço é visível até 1.450 m da boca da arma.
8	Taçante M33	584	887	14.889	91,4	
-	Festim	-	-	-	-	Treinamento de pessoal ou tiro de salva.
.50 Browning (12,7x76mm)						
9	Taçante Fumígeno M48 A1	829	532	7.603	81,3	Munição para fuzil apontador .50 M8C que é acoplado aos canhões sem recuo. As especificações balísticas dessa munição permitem que se obtenha para o projétil traçante fumígeno (spotter tracer) trajetória semelhante àquela do projétil lançado pelo canhão onde está acoplado o fuzil apontador.
V (velocidade) e E (energia) à distância de 25 metros. Provete (comprimento do cano)						

1.4. OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um procedimento de modelagem modular utilizando a Técnica dos Grafos de Ligação para simular e analisar o comportamento dinâmico de um sistema constituído por uma viatura leve sobre a qual são instalados uma metralhadora calibre .50 (12.7mm) e seu suporte.

1.5. PROCEDIMENTO

Basicamente o sistema é composto por três subsistemas: a Viatura, o Suporte da metralhadora conhecido como “Reparo” e a Metralhadora. Este trabalho abordará somente a Dinâmica Vertical da viatura, sendo analisado inicialmente por um modelo plano, onde cada subsistema será analisado separadamente, seguido por uma avaliação global obtida pela interação dinâmica entre os três subsistemas. Após, será apresentado o modelo em três dimensões, com a mesma sequência de avaliação do modelo plano. Desta forma, serão confeccionados modelos com nível cada vez maior de detalhamento ao longo do desenvolvimento do trabalho.

Serão obtidos resultados sobre o comportamento dinâmico do conjunto quando submetido aos esforços provenientes da metralhadora, onde serão medidas as tensões transmitidas pelo reparo para o chassi por ocasião do disparo da metralhadora, os deslocamentos nas suspensões e nos pneus devido à ação do peso da metralhadora e do reparo sem a metralhadora estar atirando, como também pela ação das forças e momentos provenientes do disparo da metralhadora, permitindo desta forma saber precisamente se o sistema funciona adequadamente ou não.

O sistema composto pela viatura, o reparo e a metralhadora será particionado em subsistemas, por meio de uma metodologia modular, inerente aos Grafos de Ligação, que permite detalhar o sistema proposto tanto quanto seja do interesse. Desta forma, caso se queira estudar mais detalhadamente as suspensões, que no presente modelo não possuem sua geometria considerada e se queira considerá-la, desta forma, basta apenas substituir no modelo o subsistema que trata das suspensões por um novo subsistema, ou a substituição de um subsistema por outro, como no caso da metralhadora que pode ser substituída por outro armamento, ou ainda a substituição da viatura por outra, dentre outros.

O presente trabalho permitirá a modelagem de outras viaturas, reparos e armamentos com características semelhantes, bastando para tal o conhecimento dos parâmetros inerentes a cada um para serem inseridos no presente modelo matemático.

1.6. IMPORTÂNCIA DO ESTUDO

A modelagem dinâmica de forma modular permitirá avaliar previamente e com exatidão o comportamento do conjunto Viatura/Reparo/Metralhadora, bem como de cada um separadamente. Pela Modelagem Modular, segundo LEITE, 2007, a qualquer tempo, pode-se substituir ou agregar subsistemas num modelo já existente, sem prejuízo da sua funcionalidade. Segundo LOUCA, STEIN e RIDEOUT, 2001, o projeto de um veículo é um processo caro, que é iniciado com uma análise global do sistema do veículo, a fim de determinar as características desejadas dos subsistemas. Este processo é seguido pelo detalhamento dos subsistemas e componentes e, finalmente, a construção e testes de protótipos. Desenvolvimento de tempo e custos podem ser significativamente reduzidos com a utilização de modelos para simulação. Uma simulação do sistema de previsão do veículo pode permitir a criação e testes do veículo virtual para uma variedade de condições e projeto dos componentes fundamentais antes da construção de protótipos. A disponibilidade da simulação de um veículo completo com os modelos dos subsistemas de alta fidelidade também permite o desenvolvimento de um projeto simultâneo, onde as mudanças em um componente são refletidas sobre o projeto de componentes e subsistemas correlacionados.

Existe uma vasta literatura disponível em livros, teses, dissertações, na Internet, congressos, revistas, dentre outros, sobre modelagem dinâmica de veículos, porém quando se trata desta modelagem com algum tipo de sistemas dinâmico embarcado, esta literatura se torna escassa. A literatura disponível também não é muito vasta quando se trata de armamentos, senão alguns livros de balística e de funcionamento de armamentos, que não tratam de sua mecânica, mas do seu funcionamento e manutenção. Desta forma, o presente estudo contribuirá de forma significativa no contexto científico, pois apresentará uma nova ferramenta computacional que permitirá a modelagem de várias viaturas e armamentos com características semelhantes a um baixo custo financeiro e em pouco tempo. De posse desta ferramenta, as Forças Armadas Brasileiras poderão idealizar adaptações que supram as necessidades para o emprego de suas viaturas, acarretando em futuros projetos para tais adaptações, possibilitando desta forma, uma participação mais direta das Forças Armadas, particularmente da Marinha do Brasil, junto às montadoras de automóveis e fábricas de armamentos, tal como ocorre em países como os EUA e Inglaterra, onde as forças armadas

participam diretamente nas diversas fases de desenvolvimento de projetos de suas viaturas e armamentos, junto às montadoras e fábricas.

1.7. ORGANIZAÇÃO

O trabalho é dividido em seis capítulos e um apêndice.

No Capítulo 1 é feita a introdução do trabalho. É apresentada a motivação para confecção deste trabalho, bem como as características da viatura e do armamento, seu objetivo, a importância do estudo e sua organização.

No Capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica sobre a utilização da Técnica dos Grafos de Ligação e a justificada a razão de sua escolha, bem como uma revisão sobre dinâmica veicular.

No Capítulo 3 há uma abordagem sobre alguns conceitos na dinâmica veicular que são importantes para o presente trabalho.

O Capítulo 4 trata da modelagem dos subsistemas no plano e em três dimensões.

O Capítulo 5 fará uma apresentação de alguns tipos de reparo utilizados em diversas viaturas e proporá duas sugestões de instalação para a viatura Agrale Marruá modelo AM-1, em uso no Corpo de Fuzileiros Navais.

No Capítulo 6 são apresentadas as conclusões do trabalho.

No Capítulo 7 são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas neste trabalho.

No APÊNDICE é apresentado um histórico sobre o desenvolvimento da técnica dos Grafos de Ligação, seus principais conceitos, aplicações no presente trabalho e o motivo pela modelagem via grafos multiligação.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Como este trabalho visa utilizar a Técnica dos Grafos de Ligação para modelagem modular de sistemas dinâmicos, é feita uma revisão bibliográfica sobre a utilização dessa técnica e justificada a razão de sua escolha, bem como uma revisão sobre dinâmica veicular.

2.1. REVISÃO SOBRE A UTILIZAÇÃO DA TÉCNICA DOS GRAFOS DE LIGAÇÃO

Segundo COSTA NETO, 2008, existem diversas vertentes de modelagem de sistemas dinâmicos, e seu trabalho adota aquela que utiliza o conceito de fluxo de potência, tendo em vista sua facilidade de implementação computacional. Em um modelo dinâmico mecânico pode-se sempre definir como variáveis de saída esforços (forças e momentos) e fluxos (velocidades lineares e angulares). Se além das variáveis de saída, as variáveis de entrada também forem esforços e fluxos, este modelo poderá ser acoplado a outros representados da mesma forma, desde que as condições de compatibilidade entre as entradas de um modelo e as saídas de outro sejam respeitadas. Consegue-se assim obter modelos de sistemas complexos a partir de seus subsistemas, sem que seja necessário determinar as equações analíticas resultantes do acoplamento entre os subsistemas. Ainda segundo este autor, a subdivisão de um veículo em módulos é muito útil quando se quer estudar o comportamento dinâmico de um determinado subsistema e sua influência nos demais componentes. Em alguns casos, devido ao tipo de tratamento empregado para descrever os elementos, não se consegue perceber de que modo as variáveis inerentes a um subsistema interagem com as demais, e, por conseguinte, os subsistemas entre si. A abordagem modular baseada no fluxo de potência permite uma melhor identificação das relações de causa e efeito entre subsistemas, uma vez que podem ser definidas, de forma clara e consistente, quais são as variáveis de entrada e de saída de cada componente ou módulo, e, conseqüentemente, seus acoplamentos.

FERREIRA, 2006, propõe um procedimento de modelagem e simulação para sistemas mecânicos em geral utilizando a técnica generalizada dos grafos de ligação e a modularidade dos diagramas de blocos. Neste procedimento, o grafo de ligação representativo do sistema é

inteiramente convertido em diagrama de blocos que mantém todas as propriedades do grafo, inclusive o significado físico dos elementos de um sistema, porém sem a necessidade de equacionar diretamente ou de escrever uma única linha de código numérico para resolver as equações de espaço de estado do sistema. Embora o foco do autor seja sobre a modelagem de sistemas mecânicos, seu trabalho permite sua utilização para sistemas de outros domínios físicos, ou até mesmo para sistemas com multidomínios.

LEITE, 2007, realiza a modelagem e a simulação de quatro casos envolvendo a representação da dinâmica vertical de dois veículos automotores terrestres, que correspondem em linhas gerais:

a) a um monobloco em forma de casca prismática retangular com motor dianteiro, posicionado simetricamente em relação às laterais do veículo, e suspensão tipo feixe de molas, montada sobre dois eixos rígidos; e

b) a um monobloco de uma viatura blindada de transporte de pessoal com motor dianteiro, posicionado do lado direito do veículo, e suspensão independente, tipo McPherson, nas seis rodas. Nesta modelagem o autor também utilizou os Grafos de Ligação permitindo uma modularidade bastante didática e praticidade na modelagem.

Ainda segundo este autor, a abordagem tradicional de modelagem impõe, a cada projeto novo, ainda que seja baseado em desenvolvimentos anteriores, e a cada modificação de um projeto existente, memoriais próprios, pois a alteração de um único parâmetro em um subsistema implica que suas equações devem ser refeitas. Com o objetivo de evitar esse tipo de dificuldade, o autor optou pela realização da modelagem empregando-se os procedimentos da Técnica dos Grafos de Ligação, a qual tem se mostrado bastante útil na representação de sistemas discretos onde ocorram interações entre subsistemas de naturezas físicas distintas, pois tal técnica permite modelar as partes de um sistema de forma independente e, em seguida, reuni-las num único grafo simplesmente conectando-as através das portas apropriadas, sendo possível substituir ou agregar subsistemas num modelo já existente, sem prejuízo da sua funcionalidade.

Segundo FILIPPINI, NIGRO e JUNCO, 2004, em mecânica clássica existem vários processos através dos quais as equações diferenciais podem ser derivadas de um sistema de corpos rígidos. No caso de grandes sistemas esses procedimentos são de trabalho intensivo e, conseqüentemente, sujeito a erro, sendo minimizados quando informatizados. No seu trabalho, os autores executam a modelagem dinâmica de um veículo utilizando a Teoria dos Grafos de Ligação, por meio de um pequeno conjunto de elementos que podem ser acopladas

através de portas que representam o fluxo de potência entre estes elementos. Desta forma, os autores afirmam que a modelagem modular se torna possível através do acoplamento dos componentes ou subsistemas por meio de suas portas de conexão. Eles concluem afirmando que a conjugação de várias características fazem dos Grafos de Ligação uma ferramenta bastante adequada para a modelagem dinâmica, análise e simulação de sistemas complexos de engenharia envolvendo vários domínios físicos na sua constituição.

Segundo DA SILVA e FERREIRA, 2006, a metodologia dos grafos de ligação de sistemas físicos (mecânicos), juntamente com os diagramas de blocos proporcionam a construção de blocos que estejam diretamente relacionados aos componentes físicos do sistema que representam, com suas relações constitutivas previamente definidas, e em seguida, montados de acordo com as relações de compatibilidade e de continuidade do sistema, dadas pelos elementos de junções do grafo. O autor comenta que dessa maneira é possível modelar e simular um sistema dinâmico apenas trabalhando de maneira predominantemente gráfica, equacionando-se apenas a chamada matriz de estrutura de junção, que descreve a topologia do sistema relacionando seus elementos. Além disso, também confere uma grande condensação à representação, por ser possível se descrever qualquer sistema com um número muito reduzido de blocos.

Segundo RILL, 2006, a modelagem de um veículo por subsistemas pode trazer uma variedade de aplicações possíveis. A combinação de subsistemas simples e módulos resulta em um modelo de veículo com um número mínimo de dados e um bom desempenho em tempo de execução computacional. Tais modelos podem ser utilizados para desenvolver estratégias de controle avançado de segurança eletrônica de dispositivos. Dependendo do foco de interesse, mais e mais subsistemas e módulos podem ser substituídos por outros mais detalhados. Desta forma, estudos de projeto, design e conforto, por exemplo, se tornam mais facilmente executáveis.

FILHO, MARTINS e LAURENT, 2002, afirmam que entre os mais pesquisados e relevantes problemas de engenharia, em suas diversas áreas, encontra-se o entendimento da modelagem e simulação dinâmica de sistemas. Para simplificar a modelagem dinâmica de sistemas, os autores adotaram a metodologia dos Grafos de Ligação que está tendo cada vez mais aplicação em diferentes meios e que proporciona uma visualização das interações entre os seus vários componentes e fornece implicitamente uma sistemática para a modelagem matemática do sistema, facilitando o uso de recursos computacionais para a sua simulação.

Segundo BANERJEE, SAHA, KARMAKAR, BHATTACHARYYA, 2008, um veículo ferroviário é um sistema complexo de múltiplos corpos. Modelagem de um sistema deste tipo requer a síntese de vários constrangimentos cinamáticos e dinâmicos para representar as equações do movimento. O Grafo de Ligação que é uma ferramenta de modelagem para sistemas com diferentes domínios físicos é especialmente adequado para a modelagem de sistemas multicorpos. O Grafo de Ligação é um retrato da troca de energia entre os diferentes componentes de um sistema dinâmico. Por meio de suas Junções a energia permanece conservada e esta característica marcante da técnica dos Grafos de Ligação motivou os autores a utilizá-la para a criação de um modelo representativo para uma composição ferroviária.

Segundo ASSANIS, FILIPI, GRAVANTE, GROHNKE, GUI, LOUCA, RIDEOUT, STEIN E WANG, 2000, quando a integração é realizada no SIMULINK, seus recursos gráficos permitem o acoplamento rápido de módulos, enquanto cada um deles tem um conjunto pretendido de ligações de entrada/saída. No entanto, a flexibilidade do SIMULINK vem com uma sobrecarga de determinados termos na eficiência computacional, sendo fortemente dependente do nível de decomposição do sistema e do número de componentes e módulos.

Segundo ANDRADE, 1995, a Técnica dos Grafos de Ligação tem como principais características a utilização de uma linguagem unificada para todos os sistemas dinâmicos e a modularidade matemática e simbólica. A forma comum de representar sistemas dinâmicos permite o tratamento de problemas multidisciplinares, onde os conhecimentos específicos são respeitados, e profissionais de diferentes áreas podem se comunicar, visto que compartilham dos mesmos conceitos de representação. A modularidade, por sua vez, torna possível o aproveitamento integral dos modelos matemáticos dos subsistemas que compõem o sistema combinado. Ainda segundo o autor, as metodologias baseadas em Grafos de Ligação, não prescindem das formulações próprias de cada problema. O que elas permitem é a obtenção das Equações de Estado de um sistema complexo a partir da representação unificada de procedimentos específicos e, como se baseiam no conceito físico do fluxo de energia entre os elementos do sistema, da modularidade.

Segundo GAWTHROP e BEVAN, 2007, a natureza gráfica dos Grafos de Ligação separa a estrutura do sistema de equações, permitindo que sejam visualizadas as características essenciais de um sistema. Com efeito, através da criação destes grafos, projetar e analisar a

estrutura de um sistema, talvez sendo a parte mais importante da modelagem do sistema, muitas vezes pode ser feita utilizando apenas lápis e papel. Modeladores, portanto podem focar seus trabalhos nas relações entre os componentes e subsistemas ao invés da aplicação de detalhes de seus softwares de modelagem. Mesmo sendo utilizados computadores, os Grafos de Ligação podem fornecer informações sobre os Estados dos sistemas, Loops algébricos e os benefícios e as consequências das aproximações e simplificações.

2.2. REVISÃO SOBRE DINÂMICA VEICULAR

GILLESPIE, 1992, trata dos mecanismos básicos que regem o desempenho do veículo na dinâmica longitudinal, vertical e lateral. Diversas forças têm como resposta os movimentos de aceleração, frenagem e curva. A maior parte do estudo da dinâmica veicular deve envolver o estudo de como e porque essas forças são produzidas. O comportamento dinâmico do veículo é determinado pelas forças oriundas dos pneus, da gravidade e forças aerodinâmicas. O veículo e seus componentes são estudados para determinar quais forças serão produzidos por cada uma destas fontes e como o veículo irá responder a essas forças. Ainda segundo o autor, o movimento do veículo é controlado pelas forças exercidas no pneu pela estrada, que têm um papel importante nos problemas de dirigibilidade. A função essencial de um pneu, segundo este autor, é interagir com a estrada, de modo a produzir as forças necessárias para o apoio e movimento do veículo. O pneu deve desenvolver forças laterais para controlar a direção do veículo, gerar aceleração lateral em curvas e resistir a forças externas, tais quais rajadas de vento e inclinações longitudinais da pista. Estas forças são geradas pela deriva do pneu, pela inclinação lateral do mesmo ou por uma combinação das duas. Também importantes são as forças normais e longitudinais na superfície de contato.

Segundo SANTOS, 2007, O estudo da dinâmica veicular divide-se em três partes: dinâmica longitudinal, dinâmica lateral e dinâmica vertical. Chama-se de dinâmica veicular vertical o estudo do movimento na direção vertical do veículo, envolvendo deslocamento, velocidade e aceleração nesta direção e os movimentos de rolagem e arfagem. Um estudo de dinâmica vertical engloba subsistemas como suspensão e chassis, sendo afetada principalmente por irregularidades na pista.

Segundo CALDAS, 2008, a dinâmica vertical está diretamente relacionada ao sistema de suspensão, que é sua peça fundamental, o qual consiste em um conjunto de elementos que servem de união entre as rodas e a própria estrutura do automóvel (carroceria e chassi). Ela é caracterizada pela aceleração vertical e pelas velocidades angulares de rolagem e arfagem. Como a superfície do terreno por onde trafega sem sempre é perfeitamente plana e regular, todo veículo deve ser projetado de forma que suas quatro rodas possam se adaptar à estrada mesmo que esta apresente certas irregularidades. Além disso, é necessário também que durante o deslocamento do veículo as rodas sejam capazes de oscilar elasticamente e absorver as irregularidades do terreno, a fim de evitar que as vibrações correspondentes sejam transmitidas à estrutura do veículo e conseqüentemente aos passageiros ou cargas.

Segundo KNOB, 2010, a dinâmica vertical está intimamente relacionada ao sistema de suspensão. Esse sistema persegue dois objetivos principais: assegurar permanentemente o contato das rodas com o solo, condição importante para se obter uma boa aderência e um nível aceitável de estabilidade e segurança de marcha, de forma a haver uma boa distribuição do peso do veículo sobre o solo; e, minimizar o efeito das irregularidades do terreno, permitindo, deste modo, um maior conforto ao condutor e passageiros.

No Brasil, a modelagem veicular é bastante difundida e se encontra bastante literatura, mas a técnica dos Grafos de Ligação ainda não é muito utilizada na modelagem de sistemas dinâmicos, porém pela revisão percebe-se que possui grandes facilidades e aplicações neste tipo de trabalho. Como a proposta deste trabalho é a modelagem de um conjunto composto por três subsistemas dinâmicos complexos, a saber, uma viatura, um Reparo e um Armamento, é bastante plausível a escolha da técnica dos Grafos de Ligação como ferramenta de auxílio na sua modelagem, pois permitirá que seja avaliada, de uma forma mais simples, a interação mútua entre estes subsistemas.

Inúmeras possibilidades de análise se tornam possíveis pela utilização da Técnica dos Grafos de Ligação e serão mais profundamente abordadas no decorrer do presente trabalho. A adoção desta técnica de abordagem modular será aplicada no trabalho de forma a serem obtidas respostas pela simulação de seus subsistemas em termos das deformações de suas molas, no caso das suspensões, do deslocamento do centro de gravidade do chassi, como também das forças transmitidas pelos pneus para o solo, que serão causados pela ação da força oriunda da metralhadora. Pode-se ainda substituir o presente armamento por outro com características diferentes, de forma a se verificar o comportamento do sistema como um todo,

não sendo necessário fazer, a princípio, nenhuma modificação na parte que trata da viatura, pois a modularidade desta técnica permite este tipo de procedimento.

Como o presente trabalho utilizará a técnica dos Grafos de Ligação se torna importante que seus principais conceitos sejam objeto de comentário. No Apêndice é apresentado um histórico sobre seu desenvolvimento, seus principais conceitos e aplicações no presente trabalho e o motivo pela modelagem via grafos multiligação.

3. CONCEITOS DA DINÂMICA VEICULAR

Este capítulo fará uma abordagem sobre alguns conceitos na dinâmica veicular que são importantes para o presente trabalho. São feitas considerações sobre os estados de massa e inércia de um corpo que são aplicadas na simulação do chassi e rodas. Os eixos de referência são apresentados, assim como os graus de liberdade do chassi, já que todos os subsistemas, quando acoplados, devem seguir as orientações destes eixos. Será apresentado um resumo sobre os três tipos de dinâmica veicular e serão definidas as funções das suspensões e pneus, já que são elementos imprescindíveis para este tipo de modelagem.

Segundo VILELA, 2010, os Corpos Rígidos, que são definidos para a simulação, são caracterizados pelas suas respectivas massas e momentos de inércia, sendo que as massas estão relacionadas aos movimentos lineares destes corpos e os momentos de inércia aos movimentos angulares dos mesmos. Define-se também como sendo o Estado de um corpo rígido a sua posição e velocidade em uma determinada direção (linear ou angular). A cada direção na qual um corpo rígido pode se movimentar denomina-se grau de liberdade, sendo que o número de graus de liberdade de um corpo rígido é o número de direções nas quais ele tem liberdade de se movimentar. A **FIG.3.1** mostra a representação dos estados de uma massa e um momento de inércia.

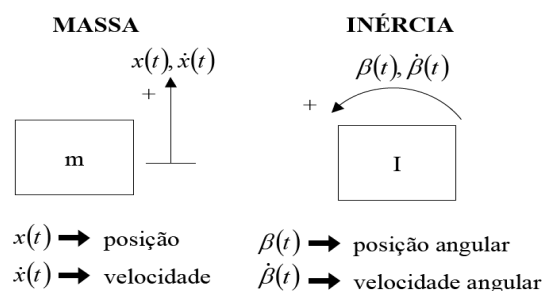


FIG.3.1. Estado de massa e Momento de Inércia

Um veículo apresenta os seguintes movimentos: translação (posição, velocidade e aceleração nas direções longitudinal, lateral e vertical), rotação (orientação, velocidade angular e aceleração angular de rolagem, arfagem e guinada, ou seja, *roll*, *pitch* e *yaw*, respectivamente), além dos movimentos relativos entre as partes do veículo. As entradas às quais o motorista pode submeter o veículo são dadas pelos mecanismos de direção, freio,

acelerador e transmissão. Há, ainda, distúrbios constantemente aplicados ao veículo, isto é, irregularidades da pista e esforços aerodinâmicos. Para o presente trabalho serão adotados os eixos e movimentos do veículo conforme as normas ISO 4130 e DIN70000, apresentados na **FIG.3.2**.

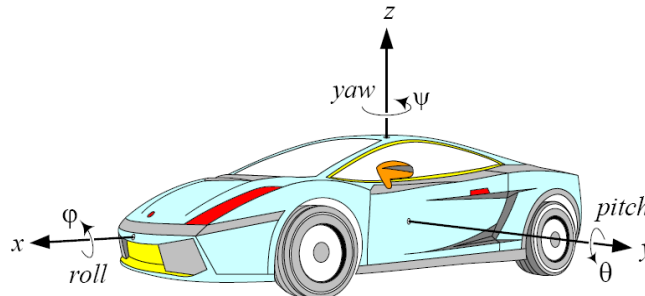


FIG.3.2. Eixos e Movimentos de referência

A dinâmica vertical está diretamente relacionada ao sistema de suspensão, que é sua peça fundamental, o qual consiste em um conjunto de elementos que serve de união entre as rodas e a própria estrutura do automóvel (carroceria e chassi). Ela é caracterizada pela aceleração vertical e pelas velocidades angulares de rolagem e arfagem. A **TAB.3.1** apresenta os principais aspectos da Dinâmica Veicular, sendo que para o presente trabalho o movimento ao redor do eixo Z (*yaw*) não será considerado.

TAB.3.1- Aspectos principais da Dinâmica Veicular

Eixo	Dinâmica	Solicitação Externa	Reação do Veículo
X	Longitudinal	Aceleração e desaceleração	Translação e oscilação (<i>surging</i>) ao longo do eixo X
		Realização de uma curva	Efeito de rolagem (<i>roll</i>) que é rotação ao redor do eixo X (plano YZ)
Y	Transversal	Aceleração e desaceleração	Translação e oscilação (<i>hurching</i>) ao longo do eixo Y quando o veículo sai de frente ou de traseira (derrapagem)
		Realização de uma curva	Efeito da arfagem que é a rotação ao redor do eixo Y (plano XZ)
Z	Vertical	Oscilações do terreno	Efeito de cavalgada ou salto (<i>bounce</i>) que é a oscilação ao longo do eixo Z quando o veículo passa por uma oscilação do terreno
		Realização de uma curva	Efeito de guinada (<i>yaw</i>) que é a rotação ao redor do eixo Z (plano XY) quando o veículo sai de frente ou de traseira (derrapagem)

3.1. SUSPENSÕES

Segundo GILLESPIE, 1992, as funções principais das suspensões são:

- Permitir a movimentação vertical das rodas ao longo do percurso, isolando o chassi das imperfeições do solo;
- Manter as rodas nos seus ângulos característicos previstos, seja estática ou dinamicamente, executando manobras de mudança de direção e curvas;
- Suportar as forças de reação impostas pelos pneus, ou seja, transmitir aceleração e suportar frenagens longitudinais e forças laterais (curvas);
- Suportar os efeitos de rolamento lateral do chassi ou monobloco; e
- Manter os pneus em contato com o solo, com as menores variações de cargas possíveis.

Além de permitir a movimentação vertical das rodas, o projeto da geometria da suspensão deve contribuir também para reduzir as movimentações indesejáveis da carroceria em *pitch* e *roll*. Na **FIG.3.3** é mostrado o esquema básico de uma suspensão. A mola principal sustenta a massa suspensa, e o amortecedor atua dissipando a energia da mola armazenada durante a movimentação.

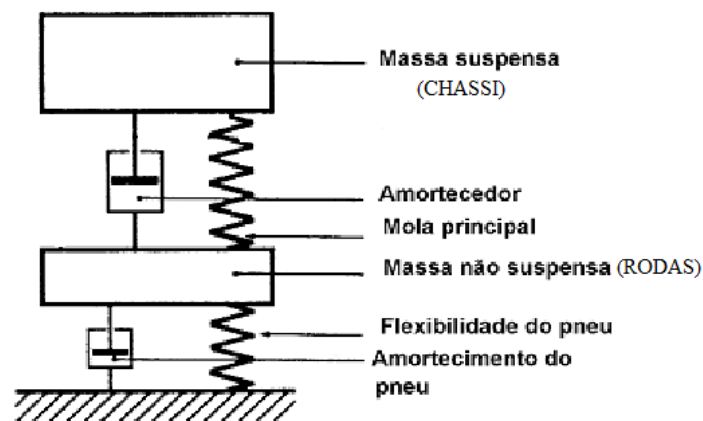


FIG.3.3 - Esquema básico de uma suspensão

A **TAB.1.1** apresenta o tipo de suspensão utilizada pela viatura, que é de Barras longitudinais oscilantes e barra removível, com molas helicoidais e amortecedores de dupla ação, porém não será considerada sua geometria, sendo considerados somente seus efeitos equivalentes de suspensão na direção vertical.

3.2. PNEUS

Os pneus desempenham uma importante função no comportamento dinâmico do veículo, sendo os elementos de ligação entre o piso e o conjunto da suspensão e carroceria.

Segundo GILLESPIE, 1992, o pneu deve cumprir basicamente três funções:

- Suportar a carga vertical enquanto absorve os impactos recebidos da estrada;
- Desenvolver as forças longitudinais para transmitir aceleração e frenagem;
- Desenvolver as forças laterais para a realização de desvios e curvas.

Além das funções básicas citadas, os pneus utilizados em veículos de passageiros e de carga, devem ainda possuir características positivas e compatíveis de durabilidade, economia, conforto, baixo nível de ruído de rolamento e manter estáveis seu rendimento em diferentes condições de piso seco ou molhado, com temperaturas e níveis de solicitação de cargas variadas. Os dois tipos de construção mais largamente empregados em pneus são o diagonal e o radial. A denominação deve-se ao posicionamento da cordoalha de reforço da carcaça de borracha, de modo que nos diagonais são dispostos em ângulos que variam de 30° a 45°, e nos radiais estão dispostos em duas camadas, uma transversal a 90° e outra longitudinal em relação ao eixo de rotação, conforme **FIG.3.4**.

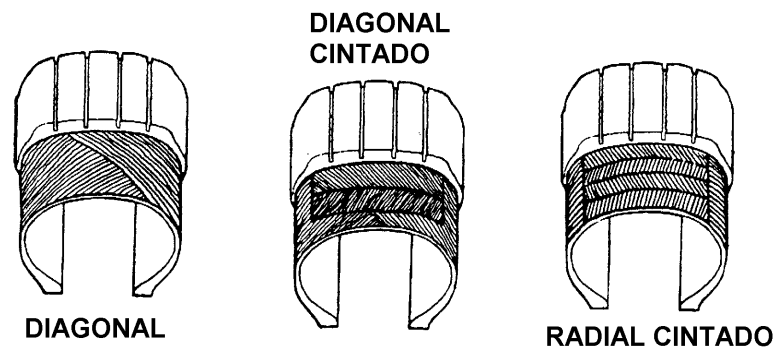


FIG.3.4 – Tipos de Construção de pneus

Semelhantemente à suspensão, a **TAB.1.1** apresenta o tipo de pneus utilizados no presente trabalho, que são da marca Pireli, modelo Scorpion Mud LT235/85R16 108Q, porém seu tipo de construção não será considerado, sendo tratados somente seus efeitos de amortecimento na direção vertical.

4. MODELAGEM DO SISTEMA

Este capítulo tratará da modelagem dos subsistemas no plano e em três dimensões. Inicialmente será abordada de forma genérica a caracterização do sistema, apresentado os subsistemas a serem modelados com seus acoplamentos. Na sequência será realizada a modelagem plana de seus subsistemas separadamente e acoplados, sendo apresentados seus resultados e efetuada a comparação entre estes resultados obtidos pela simulação computacional com os resultados obtidos na condição de equilíbrio estático, por meio de diagramas de corpo livre destes subsistemas. Sua finalização se dá com a modelagem em três dimensões, utilizando a mesma sequência da modelagem plana. Este capítulo é suma importância, pois os resultados nele obtidos servem para validar o presente trabalho.

4.1. CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA DINÂMICO A SER MODELADO

O sistema dinâmico a ser modelado é composto por três subsistemas, a saber, a Viatura, o Reparo (Suporte) e o Armamento. A viatura é decomposta em mais quatro subsistemas, que são o Chassi, as Suspensões, as Rodas e os Pneus. O chassi e as rodas são considerados corpos rígidos, enquanto que os pneus e suspensões têm suas características de rigidez e amortecimento consideradas. O reparo é tratado como uma estrutura que possui massa, características de rigidez e amortecimento e que é modelado pelo Método dos Elementos Finitos (MEF). A metralhadora é modelada de forma que são abordados somente seus mecanismos envolvidos diretamente no recuo de suas partes móveis, por ocasião do disparo da munição. Desta forma, a metralhadora é tratada como um conjunto que possui elementos de inércia, de rigidez e de amortecimento.

Este modelo se propõe a avaliar somente a Dinâmica Vertical do veículo. Para a modelagem será adotada a metodologia dos Grafos de Ligação e como ferramenta computacional será utilizado o software MatLab/Simulink. São utilizadas como exemplo a Viatura Agrale Marruá AM-1, a Metralhadora Calibre .50 (12.7mm) Browning e uma viga com seção reta circular como o Reparo. A **FIG.4.1** apresenta de forma genérica o acoplamento entre os subsistemas componentes em termos de variáveis de potência (Esforços

e Fluxos), representadas pelas setas (a) e o modelo físico deste acoplamento entre os subsistemas (b).

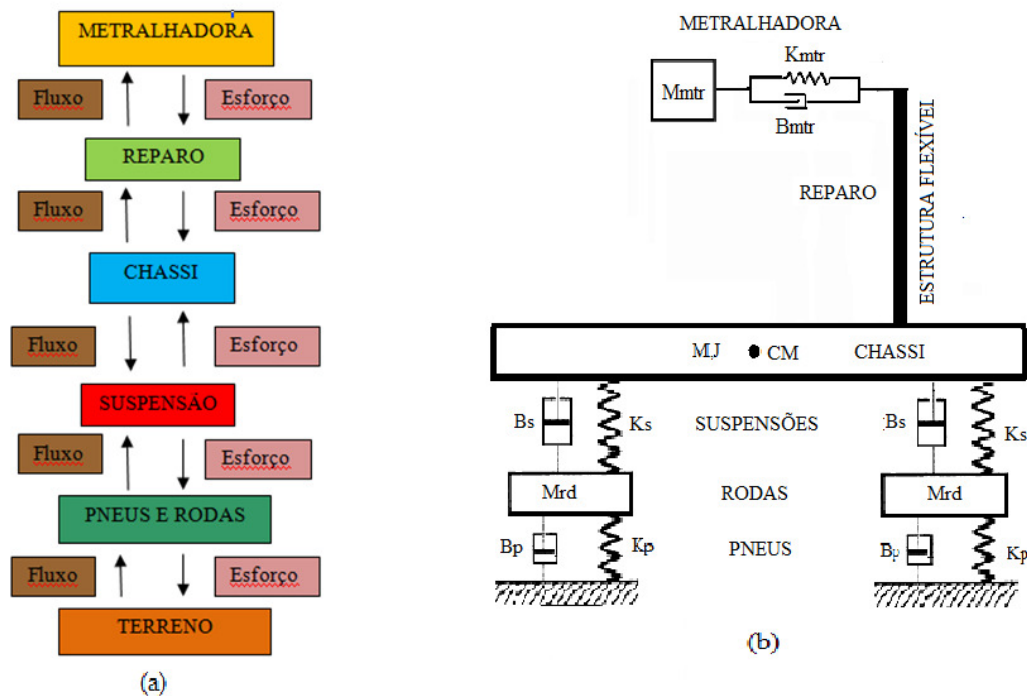


FIG.4.1 – Acoplamento entre os subsistemas (a) e Modelo Físico (b)

Onde:

B_p e K_p - Coeficientes de amortecimento e rigidez dos pneus, respectivamente.

B_s e K_s - Coeficientes de amortecimento dos amortecedores e rigidez das molas das suspensões, respectivamente.

B_{mtr} e K_{mtr} - Coeficientes de amortecimento do amortecedor e rigidez da mola da metralhadora, respectivamente.

M , M_{rd} e M_{mtr} – Massa do chassi, das rodas e da metralhadora, respectivamente.

CM - Centro de massa do chassi.

J – Momento de Inércia do Chassi, medido não eixo y . Há três momentos de inércia em um corpo rígido: I_{xx} , I_{yy} e I_{zz} .

O reparo, por possuir características estruturais de viga e barra, está representado como uma estrutura flexível.

4.2. MODELAGEM PLANA

Como já fora mencionado anteriormente, é feita a modelagem do modelo de meio carro, em que cada subsistema é analisado separadamente, seguido pelos acoplamentos entre os mesmos e culminando com a junção de todos. A **FIG.4.2** apresenta o modelo físico de meio veículo (no plano) com 4 Graus de Liberdade.

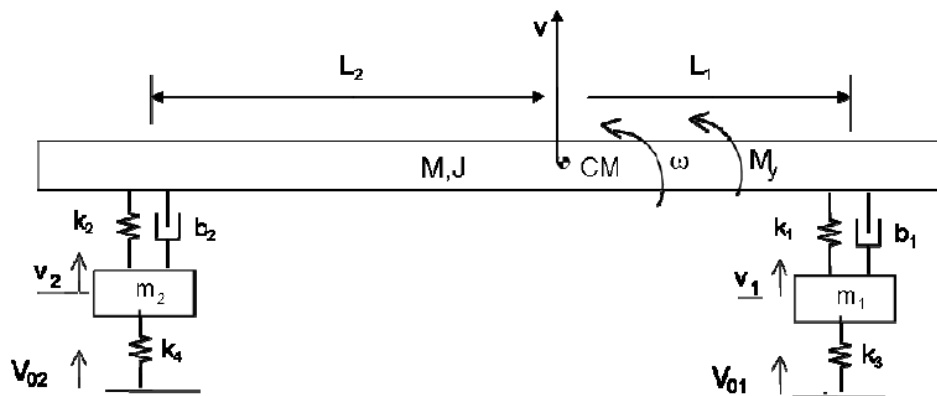


FIG.4.2- Modelo físico de meio carro

A modelagem propriamente dita é feita obedecendo à seguinte sequência:

1. Apresentação do Grafo de Ligação dos subsistemas;
2. Apresentação das equações relativas ao Modelo de Estado de cada subsistema;
3. Apresentação das ligações realizadas no Simulink;
4. Apresentação dos parâmetros utilizados e;
5. Apresentação de resultados da simulação.

4.2.1. MODELAGEM DOS PNEUS E RODAS

Seguindo a sequência mencionada anteriormente para modelagem, a **FIG. 5.3** apresenta os Grafos Multiligação relativos aos subsistemas “Pneus” e “Rodas”. Como está sendo realizada a modelagem plana, cada grafo representa o comportamento de duas rodas e dois pneus, fazendo com que os resultados obtidos para cada subsistema representem o comportamento de cada pneu e roda em separado.

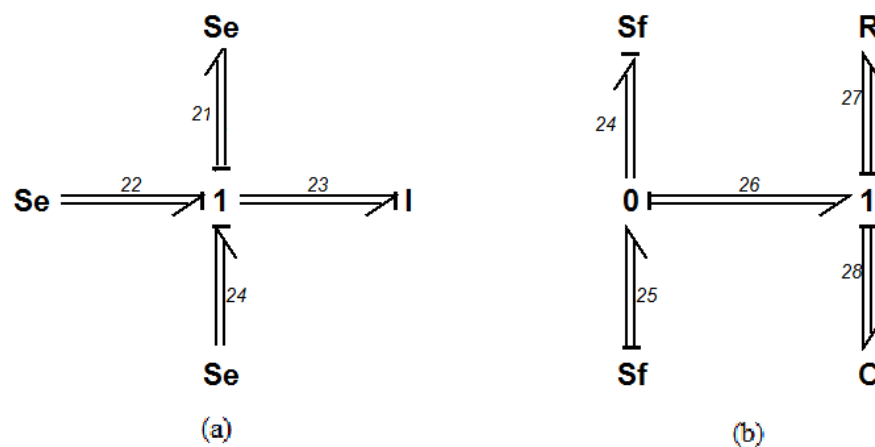


FIG. 4.3- Grafo Multiligação Rodas (a) e Pneus (b)

Identifica-se como Fonte de Fluxo (Sf) para o subsistema pneus, a velocidade transmitida pelo solo, que depende do perfil deste, e a velocidade transmitida pelas rodas por ocasião do acoplamento. No caso das rodas, as Fontes de Esforço (Se) representam o seu próprio peso e as forças oriundas dos pneus e suspensões. Pode-se observar nos grafos acima que existem duas multiligações “24”, que no caso das rodas estão ligadas a uma fonte de esforço e no caso dos pneus, a uma fonte de fluxo, o que significa que será nestas multiligações que ocorrerá o acoplamento destes subsistemas. A seguir são apresentados seus Modelos de Estado com suas respectivas Equações de Estado e Saída, ou seja, (3) e (4) para os Pneus e (5) e (6) para as rodas, respectivamente.

PNEUS

$$\begin{vmatrix} \dot{\mathbf{q}}_{28} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \mathbf{Z} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \mathbf{q}_{28} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} -\mathbf{Id} & \mathbf{Id} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \mathbf{f}_{24} \\ \mathbf{f}_{25} \end{vmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{vmatrix} \mathbf{e}_{24} \\ \mathbf{e}_{25} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \mathbf{invC}_p \\ \mathbf{invC}_p \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \mathbf{q}_{28} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} -\mathbf{invR}_p & \mathbf{invR}_p \\ -\mathbf{invR}_p & \mathbf{invR}_p \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \mathbf{f}_{24} \\ \mathbf{f}_{25} \end{vmatrix} \quad (4)$$

RODAS

$$\begin{vmatrix} \dot{\mathbf{p}}_{23} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \mathbf{Z} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \mathbf{p}_{23} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \mathbf{ID} & -\mathbf{ID} & \mathbf{ID} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \mathbf{e}_{21} \\ \mathbf{e}_{22} \\ \mathbf{e}_{24} \end{vmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{vmatrix} \mathbf{f}_{21} \\ \mathbf{f}_{24} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \mathbf{invI}_r \\ \mathbf{invI}_r \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \mathbf{p}_{23} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \mathbf{Z} & \mathbf{Z} & \mathbf{Z} \\ \mathbf{Z} & \mathbf{Z} & \mathbf{Z} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \mathbf{e}_{21} \\ \mathbf{e}_{22} \\ \mathbf{e}_{24} \end{vmatrix} \quad (6)$$

Continuando a sequência de modelagem, serão apresentadas as ligações entre os subsistemas “Pneus” e “Rodas”. Para que seja realizado o acoplamento entre os subsistemas é necessário um perfeito entendimento do Grafo Multiligação e que a ordem de elaboração das equações do Modelo de Estado, as matrizes representantes dos diversos Campos e os vetores de entrada e saída no Simulink estejam em coerência. Segundo **ANDRADE**, 1995, os procedimentos de acoplamento dependem de cada subsistema. Essas ligações, caracterizadas como portas de entrada e saída, e suas respectivas variáveis de potência permitem definir os módulos, cada qual descrito por um modelo de estado, a serem interligados. A **FIG.4.4** apresenta o acoplamento entre os subsistemas “RODAS” e “PNEUS”.

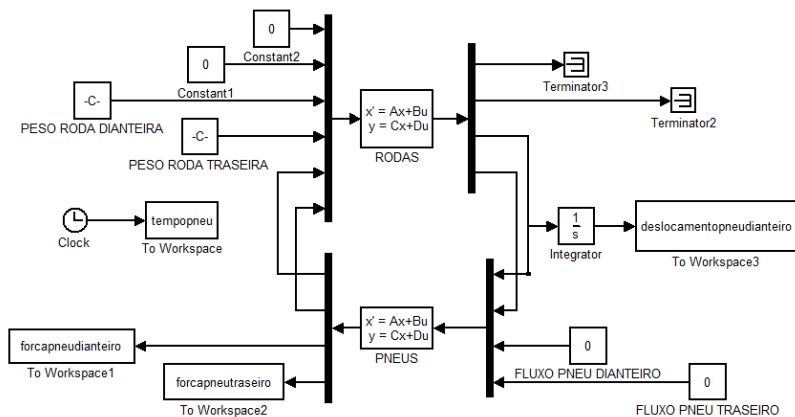


FIG.4.4 – Acoplamento dos subsistemas “Pneus” e “Rodas”

Para a presente simulação, a excitação de base é considerada nula, representando que os subsistemas acoplados estão colocados sobre uma superfície plana sem influência desta. O peso das rodas é a única fonte a influenciar os subsistemas. Os pneus são analisados como um sistema mola e amortecedor sujeitos ao peso das rodas. O comportamento esperado dos subsistemas é que alcancem a condição de equilíbrio estático transmitindo para o solo uma força igual ao valor do peso das rodas. A **TAB.4.1** apresenta os parâmetros utilizados na simulação dos subsistemas “Pneus” e “Rodas”.

TAB.4.1- Parâmetros utilizados

Coeficiente de Rigidez dos Pneus (K_p).	200000 N/m
Coeficiente de Amortecimento dos Pneus (B_p)	200 kN.s/m
Massa das Rodas	42 kg
Aceleração da gravidade	9.81 m/s

Na **FIG.4.5** é apresentado o gráfico relativo à força transmitida pelo pneu dianteiro para o solo.

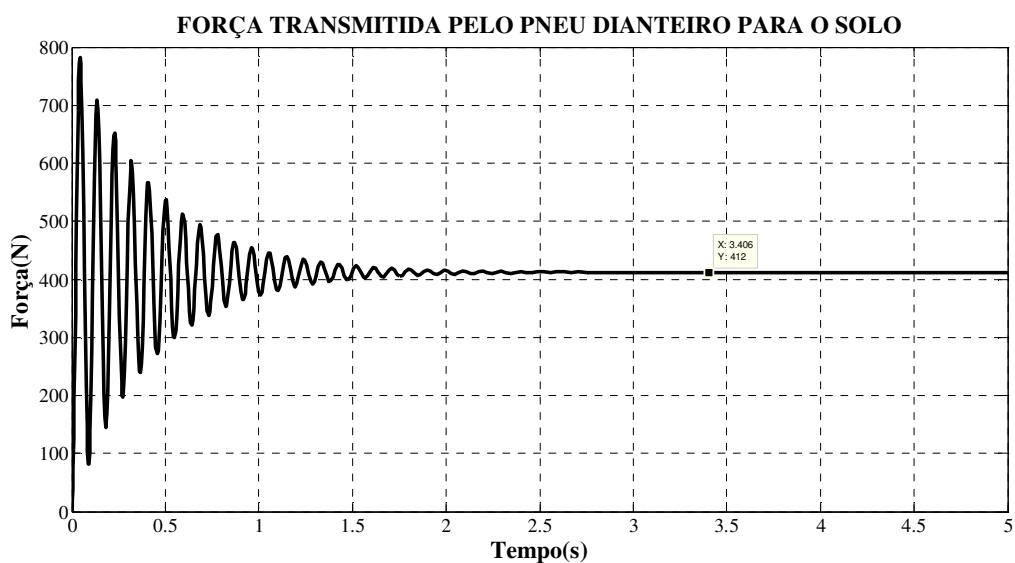


FIG.4.5 - Força transmitida pelo pneu dianteiro

A validação deste modelo se dá pelo fato dos resultados obtidos pela simulação computacional serem exatamente iguais aos obtidos algebricamente pela confecção do diagrama de corpo livre destes subsistemas acoplados e na condição de equilíbrio estático, ou seja, a força transmitida pelos pneus para o solo é de 412N, ou seja, o valor do peso das rodas.

4.2.2. MODELAGEM DO CHASSI E SUSPENSÕES

Seguindo a sequência mencionada anteriormente para modelagem, a **FIG. 4.6** apresenta os grafos multiligação relativos aos subsistemas “Suspensão” (a), “Chassi” (b) e o modelo físico do acoplamento entre estes subsistemas (c).

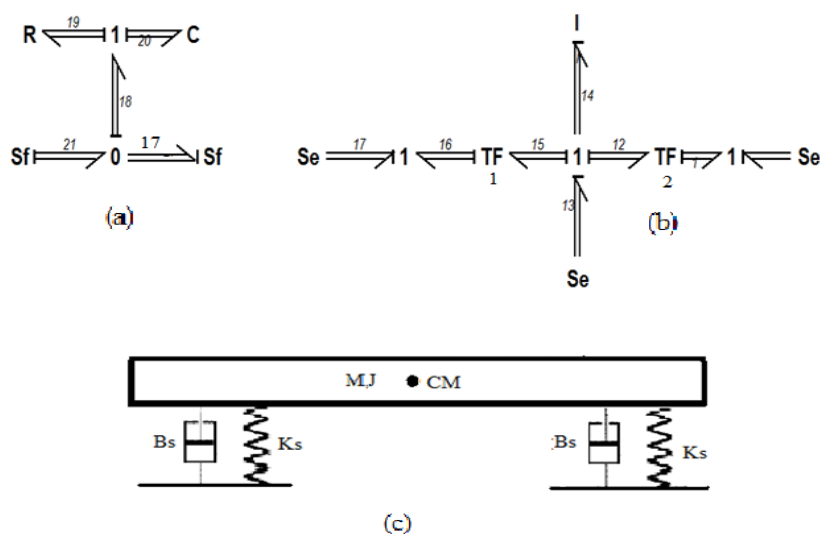


FIG. 4.6 – Grafos multiligação da suspensão (a), do chassi (b) e o modelo físico do acoplamento destes subsistemas (c).

Para um melhor entendimento do presente grafo é importante que sejam definidos alguns de seus parâmetros:

R- Campo Resistivo - Matriz dos Coeficientes de amortecimento dos amortecedores;

C- Campo Capacitivo - Matriz dos Coeficientes de flexibilidade (inverso da rigidez) das molas dos amortecedores;

Sf- Fonte de fluxo- Simbolizando o local de apoio das suspensões;

Se- Fonte de esforço- Peso do chassi;

I- Campo inercial- Matriz relativa à massa e momento de inércia do chassi;

TF1-Transformador1- Matriz que relaciona as velocidades lineares dos pontos de ancoragem do subsistema mola-amortecedor com as velocidades lineares e angulares do chassi por meio das distâncias entre os pontos de fixação dos amortecedores e o centro de gravidade do chassi.

TF2- Transformador2- Matriz que relaciona as velocidades lineares e angulares do chassi e do reparo com a distância entre o ponto de fixação do reparo e o centro de gravidade do chassi (o reparo ainda não está sendo analisado e não influenciará o modelo).

Seguindo a sequência de modelagem serão apresentados seus Modelos de Estado com suas respectivas Equações de Estado e Saída.

CHASSI

$$\begin{matrix} \dot{p}_{14} \\ \vdots \\ p_{14} \end{matrix} = \begin{matrix} |Z|p_{14}| + | \\ -TF2^T & ID & TF1^T \end{matrix} \begin{matrix} | \\ e_{13} \\ e_{16} \end{matrix} \quad (7)$$

$$\begin{matrix} f_1 \\ f_{16} \\ \dot{f}_1 \end{matrix} = \begin{matrix} |TF2*inv(I)| \\ |TF1*inv(I)| \\ Z \end{matrix} \begin{matrix} | \\ p_{14}| + \begin{matrix} Z & Z & Z \\ Z & Z & Z \\ -TF2*inv(I)*TF2^T & TF2*inv(I) & TF2*inv(I)*TF1^T \end{matrix} \begin{matrix} | \\ e_{13} \\ e_{16} \end{matrix} \quad (8)$$

SUSPENSÃO

$$\begin{matrix} \dot{q}_{20} \\ \vdots \\ q_{20} \end{matrix} = \begin{matrix} |Z|q_{20}| + | \\ -ID & ID \end{matrix} \begin{matrix} | \\ f_{17} \\ f_{21} \end{matrix} \quad (9)$$

$$\begin{matrix} e_{17} \\ e_{21} \end{matrix} = \begin{matrix} |invC_S| \\ |invC_S| \end{matrix} \begin{matrix} | \\ q_{20}| + \begin{matrix} -R_S & R_S \\ -R_S & R_S \end{matrix} \begin{matrix} | \\ f_{17} \\ f_{21} \end{matrix} \quad (10)$$

Continuando a sequência de modelagem, serão apresentadas as ligações entre os subsistemas “Chassi” e “Suspensão”. As mesmas considerações feitas sobre o entendimento do Grafo multiligação, sobre a ordem de elaboração das equações do Modelo de Estado e sobre a coerência entre os diversos Campos e os vetores de entrada e saída no Simulink são válidas também para este modelo. A **FIG.4.7** apresenta o acoplamento entre os subsistemas “CHASSI” e “SUSPENSÃO” realizado no Simulink e efetivado por meio da multiligação nº17, na **FIG.4.6** (a) e (b).

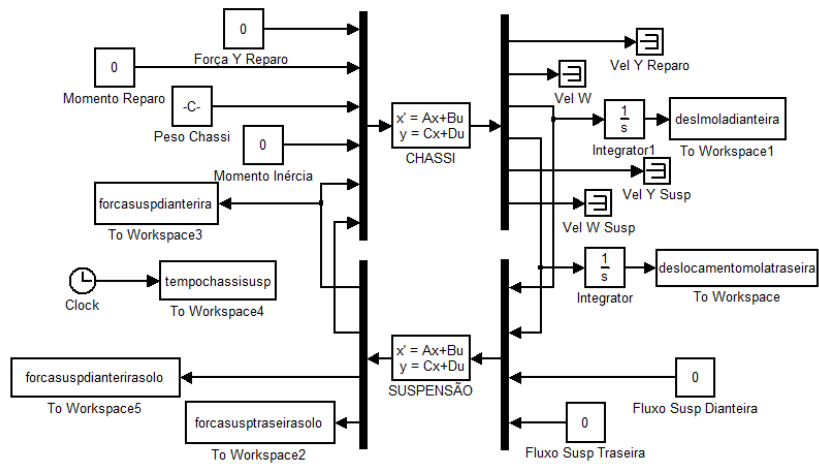


FIG.4.7- Acoplamento entre os subsistemas “Chassi” e “Suspensão”.

Para a presente simulação, o fluxo oriundo da roda será considerado nulo, representando que os subsistemas acoplados estão colocados sobre uma superfície plana sem influência desta. O peso do Chassi será a única fonte a influenciar os subsistemas. As suspensões serão analisadas como um sistema mola e amortecedor sujeitos ao peso do chassi e da força vertical proveniente do reparo. O comportamento esperado dos subsistemas é que alcancem a condição de equilíbrio estático com as molas das suspensões sofrendo deformações de valor igual ao obtido pela aplicação da equação de equilíbrio estático e transmitindo cada suspensão para o solo forças cujo somatório seja igual à metade do peso do Chassi somado ao valor da força vertical do reparo. Na **FIG 4.8** é apresentado o gráfico relativo às forças transmitidas pelas suspensões.

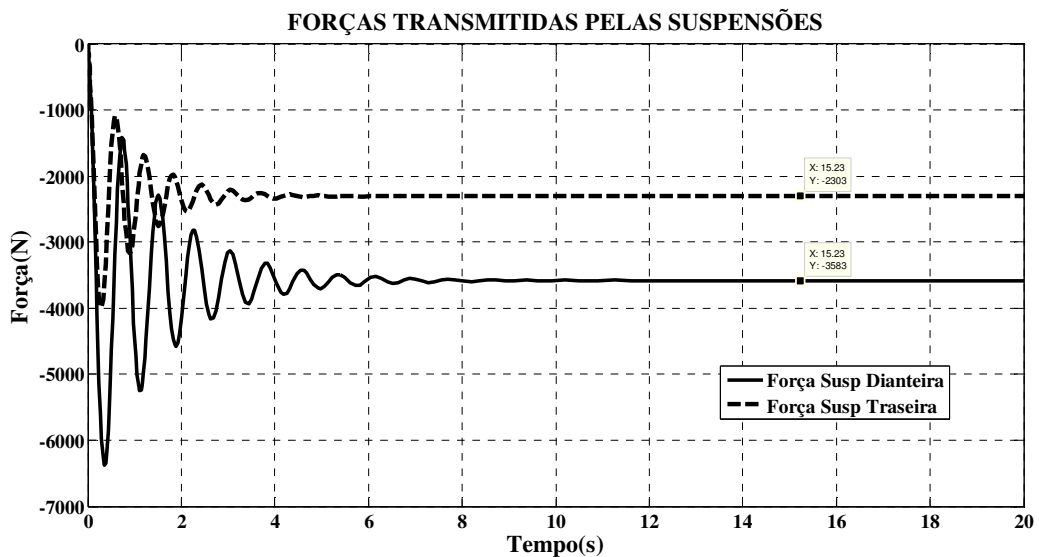


FIG. 4.8 – Forças Transmitidas pelas suspensões

A **TAB.4.2** apresenta os parâmetros utilizados na simulação dos subsistemas “Chassi” e “Suspensão”, que têm como fonte de consulta o Manual da Viatura Agrale Marruá, constante das referências bibliográficas.

TAB.4.2- Parâmetros utilizados

1. Coeficiente de Rigidez das molas da Suspensão	25000 N/m
2. Coeficiente de Amortecimento das molas da suspensão	500 kN.s/m
3. Massa de ½ chassi	600 kg
5. Distância do ponto de fixação da suspensão dianteira ao centro de gravidade do chassi (a)	0.9m
6. Distância do ponto de fixação da suspensão traseira ao centro de gravidade do chassi (b)	1.4m
7. Bitola (somente utilizada no modelo em três dimensões)	1.54m
5. Distância do ponto de fixação do reparo ao CG	0.7m

Para validação do presente modelo é necessário comparar os valores apresentados na **FIG. 4.8** com os resultados obtidos conforme a condição de equilíbrio estático do chassi. Para tal a **FIG.4.9** apresentada o Diagrama de Corpo Livre do Chassi, onde estão relacionadas as forças aplicadas no chassi pelas suspensões dianteira e traseira e seus respectivos momentos.

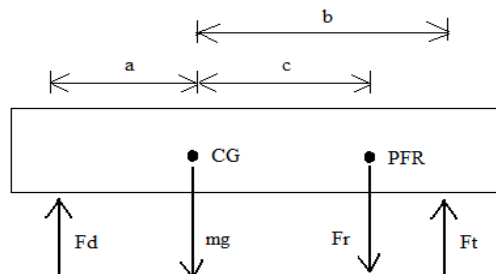


FIG.4.9- Diagrama de Corpo Livre do Chassi

Onde:

mg: Peso do chassi

Fr: Força vertical proveniente do reparo

Fd: Força no ponto de ancoragem da suspensão dianteira

Ft: Força no ponto de ancoragem da suspensão traseira

CG: Centro de Gravidade do chassi

PFR: Ponto de fixação do Reparos no chassi

De acordo com os valores contidos na **TAB.4.2**, considerando a Força vertical proveniente do reparo (F_r) nula, tem-se que:

$$\left\{ \begin{array}{l} F_d + F_t = mg \\ 0.9F_d + 0.7F_r - 1.4F_t = 0 \end{array} \right\} \quad \begin{array}{l} F_d = 2229 \text{ N} \\ F_t = 3657 \text{ N} \end{array} \quad (11)$$

De posse destas equações, conclui-se que os valores encontrados por este equacionamento algébrico são os mesmos obtidos pela simulação computacional dos subsistemas observados na **FIG.4.8** são iguais aos encontrados, o que vem validar o modelo computacional dos subsistemas “Chassi” e “Suspensão”.

4.2.3. MODELAGEM DOS SUBSISTEMAS “PNEUS”, “RODAS”, “SUSPENSÃO” E “CHASSI” (½ CARRO)

Um das características marcantes da técnica dos Grafos de Ligação, como mencionado durante a revisão bibliográfica, é a modularidade. Após os subsistemas componentes serem modelados separadamente e seus resultados validados, é possível então realizar o acoplamento de todos estes subsistemas num sistema maior, que é o modelo de ½ carro. Seguindo a sequência mencionada anteriormente para modelagem, a **FIG. 4.10** apresenta o Grafo Multiligação relativo ao acoplamento dos subsistemas “Pneus”, “Rodas”, “Suspensão” e “Chassi”.

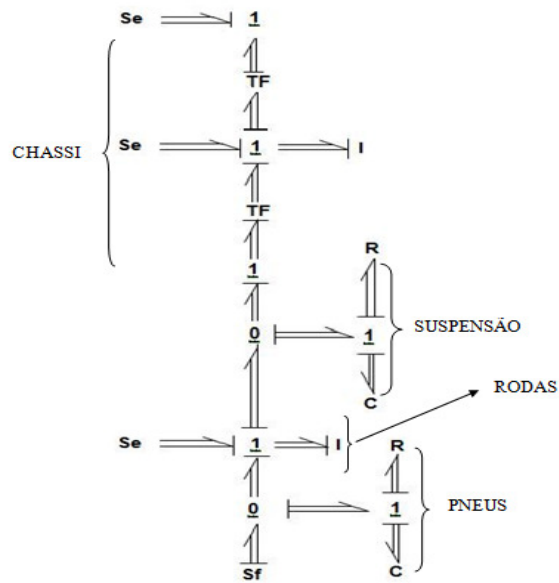


FIG. 4.10 – Grafo multiligação viatura

Ainda pelas características dos Grafos de Ligação, as equações dos modelos de estado dos subsistemas não serão modificadas, porém deve-se ter o devido cuidado com as ligações que deverão ser feitas no Simulink. A **FIG.4.11** apresenta as ligações dos subsistemas componentes do sistema “Viatura”.

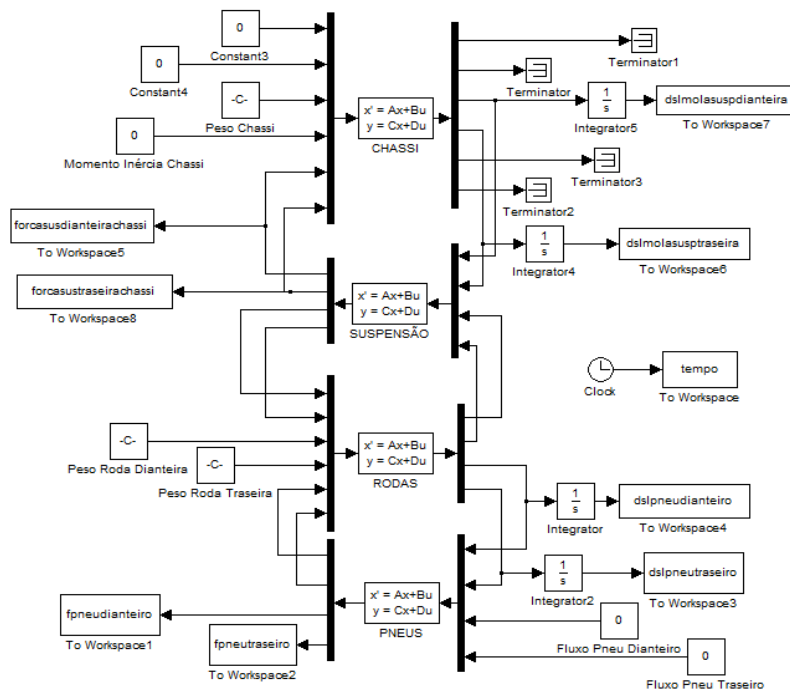


FIG.4.11-Ligações do sistema “1/2 viatura”

Para a presente simulação, a excitação de base é nula, representando que os subsistemas acoplados estão sobre uma superfície plana sem sofrer influência desta. Os pesos do Chassi e das rodas são as únicas fontes a influenciar os subsistemas. O comportamento esperado é que seja transmitida pelos pneus a respectiva distribuição de carga. Os parâmetros desta simulação são os mesmos anteriormente utilizados nas simulações em separado dos subsistemas. Na **FIG. 4.12** é apresentado o gráfico relativo às forças transmitidas pelos Pneus para o solo, agora com todos os subsistemas acoplados, dos pesos do chassi e das rodas.

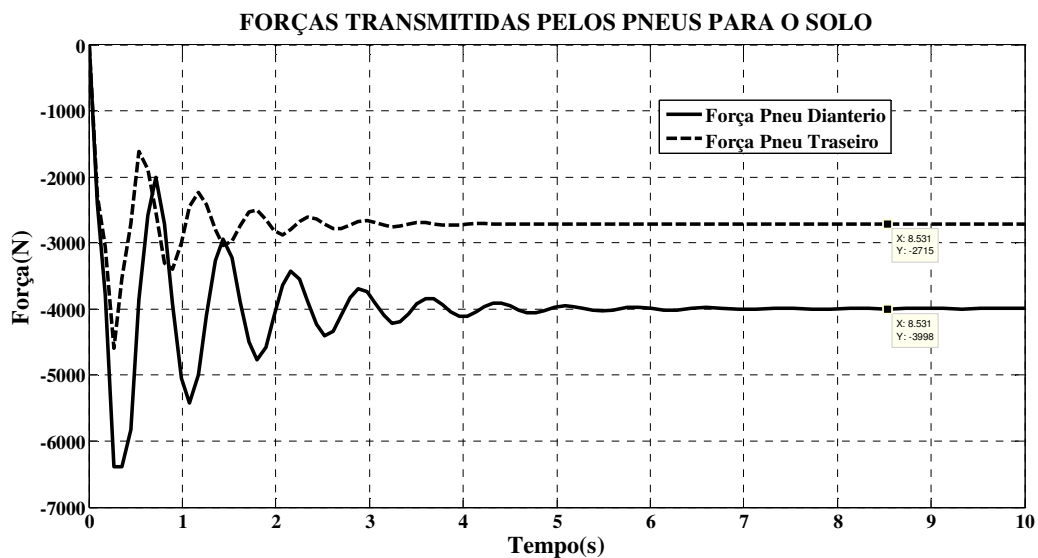


FIG.4.12 - Forças transmitidas pelos pneus

Analisando o diagrama de corpo livre composto por todos os subsistemas acoplados, verifica-se que os resultados obtidos para as forças transmitidas pelos pneus são exatamente os mesmos observados na simulação computacional.

Após todas as análises realizadas, algumas conclusões podem ser feitas sobre a modelagem da Viatura:

- A modularidade proposta pela Técnica dos Grafos de Ligação pode ser comprovada, visto que os subsistemas puderam ser analisados separadamente e, por meio das ligações adequadas no Simulink, foram acoplados e também analisados dentro do sistema como um todo.
- Após serem obtidos resultados nas simulações que retratam com fidelidade o comportamento dinâmico dos subsistemas separadamente e em conjunto, quando acoplados, conclui-se que o presente modelo está correto e pode ser validado.

4.2.4. MODELAGEM DO REPARO

O conceito de grafo multiligação para uma estrutura genérica, apresentado por Da SILVA e SPERANZA NETO (1993), foi aproveitado, com modificações, para a modelagem do subsistema Reparo, por este se tratar de uma estrutura cilíndrica maciça que possui características de rigidez e amortecimento. A **FIG.4.13** apresenta o Grafo Multiligação genérico para estruturas apresentado pelos autores acima citados.

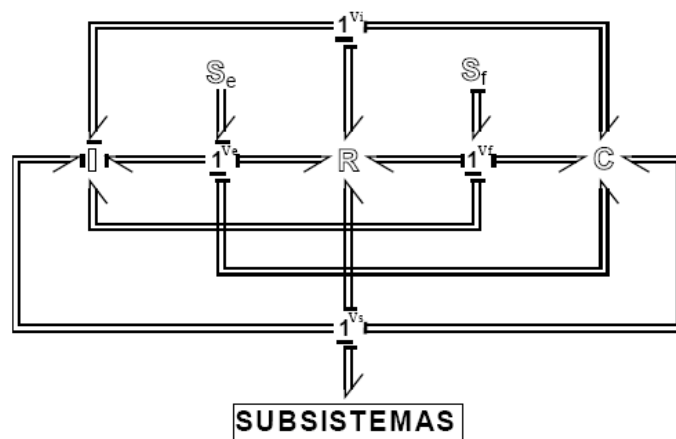


FIG.4.13 - Grafo Multiligação genérico para estruturas.

A representação de sistemas estruturais proposta correlaciona as matrizes de massa M , rigidez K e amortecimento B do método dos elementos finitos para estruturas lineares, respectivamente, com os campos inercial, capacitivo e resistivo da Técnica dos Grafos de Ligação.

No grafo multiligação da **FIG.4.13** os graus de liberdade da estrutura são divididos em quatro tipos, associados a cada uma das junções vetoriais 1 , as quais são identificadas por V_i quando relacionadas com os graus de liberdade internos; V_s quando relacionadas com os graus de liberdade que interagem com subsistemas externos; V_e quando relacionadas com os graus de liberdade que recebem esforço externo; e V_f quando relacionadas com os graus de liberdade que recebem fluxo prescrito (Da SILVA, 1994).

Essa divisão dos graus de liberdade de estrutura requer um particionamento de cada uma das matrizes dos campos, e em quatro linhas de Submatrizes S_{ij} , de acordo com a topologia indicada pela Matriz (Eq.12), para que o fluxo de potência nos campos seja corretamente descrito para todos os graus de liberdade do sistema.

$$S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} \end{bmatrix} \quad (12)$$

Onde:

S1j– Submatrizes referentes aos graus de liberdade internos;

S2j– Submatrizes referentes aos graus de liberdade que interagem com subsistemas externos;

S3j– Submatrizes referentes aos graus de liberdade que recebem esforço externo; e

S4j– Submatrizes referentes aos graus de liberdade que recebem fluxo prescrito.

No caso particular da estrutura do Reparo analisada neste trabalho, não se considera a junção vetorial V_s , visto que os subsistemas que interagem com o reparo transmitem fluxo e não esforço. Como o reparo não recebe fluxo prescrito S_f , nesta junção será acoplado o subsistema chassi que transmite fluxo para o reparo. Pôde-se, portanto, simplificar o grafo genérico para estruturas através da eliminação da junção vetorial 1^{V_s} , relativa a subsistemas que fornecem esforço para a estrutura e suas correspondentes multiligações. A **FIG.4.14** apresenta o grafo multiligação da estrutura original apresentado anteriormente, com a junção vetorial 1^{V_s} , destacada em vermelho (a), o grafo multiligação sem esta junção vetorial e com os subsistemas na junção que recebia fluxo prescrito S_f (b) e o grafo reajustado que será utilizado neste trabalho (c).

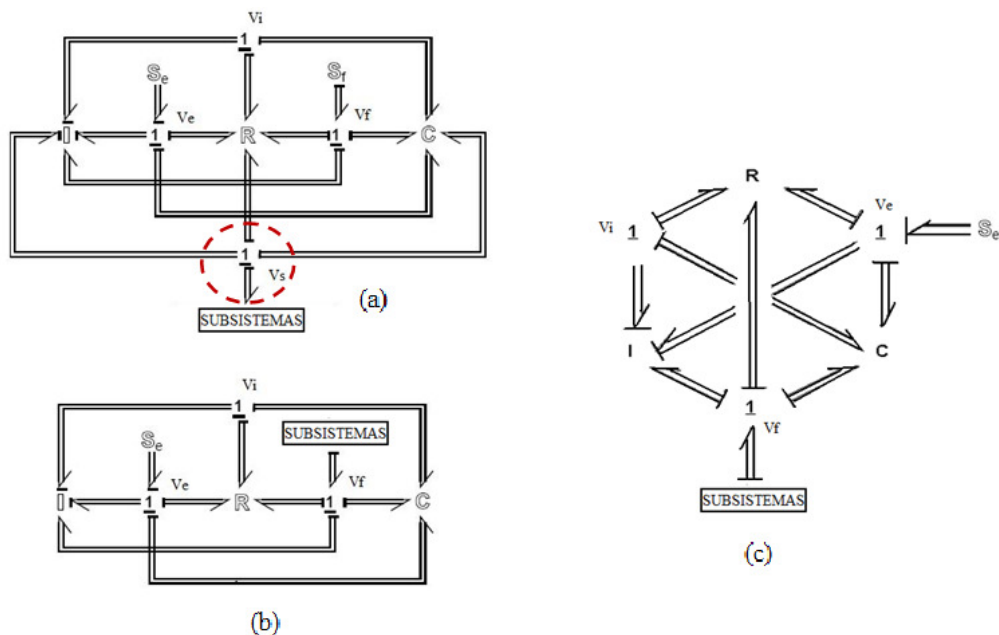


FIG.4.14 – Confeção do grafo multiligação do reparo

A **FIG. 4.15** apresenta o modelo físico do Reparo devidamente discretizado em dois elementos estruturais e três Nós, com seus respectivos graus de liberdade e o Grafo Multiligação, já alterado, utilizado neste trabalho, com suas junções “1” representando cada “Nó” da estrutura discretizada do Reparo, com seus respectivos graus de liberdade.

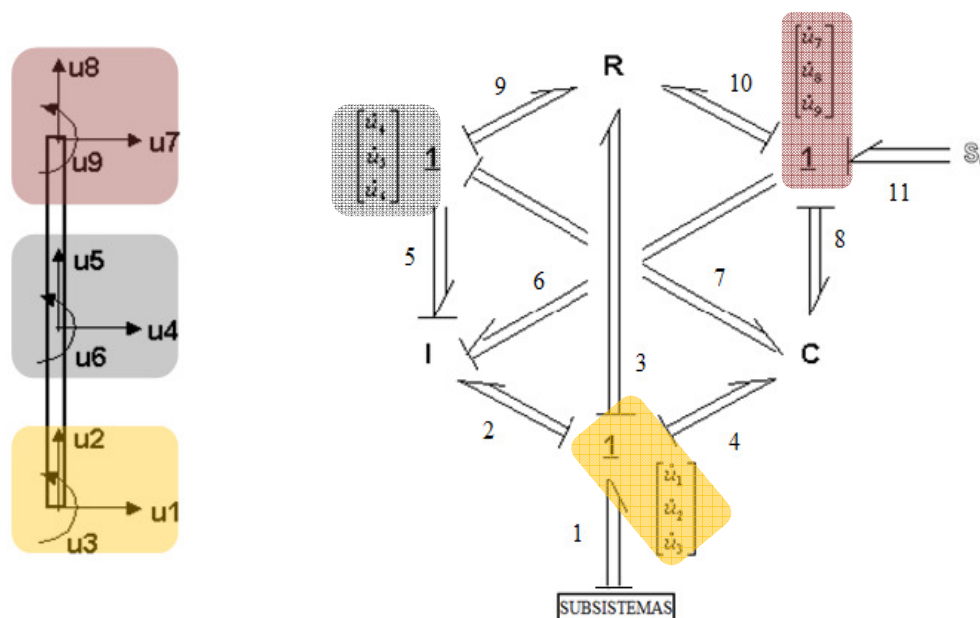


FIG. 4.15 – Modelo físico e Grafo Multiligação do Reparo

Segundo ANDRADE, 1995, as matrizes dos campos Inercial, Capacitivo e Resistivo são obtidas pelo particionamento das respectivas matrizes de Massa, Rigidez e Amortecimento, oriundas do Método dos Elementos Finitos (MEF) e reordenadas de acordo com a topologia apresentada na Eq (12). A **TAB. 4.3** apresenta as matrizes de Rigidez (K) e Massa (M) dos elementos estruturais de Barra e Viga segundo o MEF.

Para serem obtidas as matrizes de Massa, Rigidez e Amortecimento de toda a estrutura é necessário seguir o seguinte procedimento:

1. Montar a matriz genérica para toda a estrutura, respeitando a ordem exata dos graus de liberdade referentes às características de barra e viga; e;
2. Distribuir as matrizes de Rigidez e Massa do MEF, constantes na **TAB.4.3**, nas matrizes de Massa e Rigidez, relativas à estrutura como um todo, tendo como base a matriz genérica da estrutura.

TAB. 4.3 – Matrizes de Rigidez e Massa

BARRA	VIGA PLANA
$K_{barra} = \frac{EA}{L} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}$	$K_{viga} = \frac{EI}{L^3} \begin{bmatrix} 12 & 6L & -12 & 6L \\ 6L & 4L^2 & -6L & 2L^2 \\ -12 & -6L & 12 & -6L \\ 6L & 2L^2 & -6L & 4L^2 \end{bmatrix}$
$M_{barra} = \frac{\rho AL}{6} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix}$	$M_{viga} = \frac{\rho AL}{420} \begin{bmatrix} 156 & 22L & 54 & -13L \\ 22L & 4L^2 & 13L & -3L^2 \\ 54 & 13L & 156 & -22L \\ -13L & -3L^2 & -22L & 4L^2 \end{bmatrix}$

Onde:

E : Módulo de Elasticidade;

A : Área da seção reta circular da estrutura;

L : Comprimento de um elemento estrutural;

I : Momento de Inércia e;

ρ : Peso específico.

Com base no número de graus de liberdade de cada nó da estrutura (três) e na quantidade de nós de toda a estrutura (três), conclui-se que esta estrutura será representada por uma matriz quadrada 9x9. Desta forma, monta-se a Matriz Geral da Estrutura do Reparo, que é a base para construção das matrizes de Massa (M), Rigidez (K) e Amortecimento (B) da estrutura como um todo. Os elementos “B” e “V” desta matriz representam os graus de liberdade relacionados aos elementos básicos de Barra e Viga, respectivamente, oriundas das matrizes de Massa e Rigidez do MEF, conforme **TAB. 4.3**. A matriz genérica da estrutura do Reparo, com seus respectivos graus de liberdade, é apresentada na **FIG. 4.16**.

$$M, K, R = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \\ 8 \\ 9 \end{matrix} & \begin{bmatrix} V & 0 & V & V & 0 & V & 0 & 0 & 0 \\ 0 & B & 0 & 0 & B & 0 & 0 & 0 & 0 \\ V & 0 & V & V & 0 & V & 0 & 0 & 0 \\ V & 0 & V & V & 0 & V & V & 0 & V \\ 0 & B & 0 & 0 & B & 0 & 0 & B & 0 \\ V & 0 & V & V & 0 & V & V & 0 & V \\ 0 & 0 & 0 & V & 0 & V & V & 0 & V \\ 0 & 0 & 0 & 0 & B & 0 & 0 & B & 0 \\ 0 & 0 & 0 & V & 0 & V & V & 0 & V \end{bmatrix} \end{matrix}$$

FIG. 4.16 - Matriz genérica da estrutura do Reparo

O tracejado em azul representa a matriz do primeiro elemento estrutural do Reparo (u_1, u_2, u_3, u_4, u_5 e u_6) e o tracejado em vermelho, a matriz do segundo (u_4, u_5, u_6, u_7, u_8 e u_9). Os graus de liberdade em comum pertencem exatamente ao “Nó” comum aos dois elementos.

Para a montagem das Matrizes de Massa (M), Rigidez (K) e Amortecimento (B) da estrutura, basta distribuir as matrizes de Massa e Rigidez do MEF (Barra e Viga), constantes da **TAB.4.3**, para cada elemento estrutural da matriz genérica de estrutura do Reparo apresentada na **FIG.4.16**. Para a obtenção da Matriz de Amortecimento será utilizado o amortecimento proporcional empregado por FERREIRA e Da SILVA (2005), (Eq.13):

$$B = 0,05 \cdot M + 0,01 \cdot K \quad (13)$$

Após a montagem das matrizes de Massa, Rigidez e Amortecimento de toda a estrutura, é efetuado o particionamento destas matrizes para obtenção das submatrizes do campo inercial (I), capacitivo (C) e resistivo (R), respectivamente. A **FIG.4.17** apresenta a confecção da matriz do campo inercial, onde I_{ij} é uma matriz quadrada 3x3, composta por submatrizes quadradas com as mesmas dimensões, que são obtidas no particionamento da matriz de massa. O mesmo procedimento também será adotado para obtenção das matrizes do campo capacitivo e resistivo.

$$M = \begin{bmatrix} V & 0 & V & V & 0 & V & 0 & 0 & 0 \\ 0 & B & 0 & 0 & B & 0 & 0 & 0 & 0 \\ V & 0 & V & V & 0 & V & 0 & 0 & 0 \\ V & 0 & V & V & 0 & V & V & 0 & V \\ 0 & B & 0 & 0 & B & 0 & 0 & B & 0 \\ V & 0 & V & V & 0 & V & V & 0 & V \\ 0 & 0 & 0 & V & 0 & 0 & V & 0 & V \\ 0 & 0 & 0 & 0 & B & 0 & 0 & B & 0 \\ 0 & 0 & 0 & V & 0 & V & V & 0 & V \end{bmatrix} \quad I = \begin{bmatrix} \overline{V} & 0 & \overline{V} & \overline{V} & 0 & \overline{V} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & B & 0 & 0 & B & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \overline{V} & 0 & \overline{V} & \overline{V} & 0 & \overline{V} & 0 & 0 & 0 \\ \overline{V} & 0 & \overline{V} & \overline{V} & 0 & \overline{V} & \overline{V} & 0 & \overline{V} \\ 0 & B & 0 & 0 & B & 0 & 0 & B & 0 \\ \overline{V} & 0 & \overline{V} & \overline{V} & 0 & \overline{V} & \overline{V} & 0 & \overline{V} \\ 0 & 0 & 0 & \overline{V} & 0 & 0 & \overline{V} & 0 & \overline{V} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & B & 0 & 0 & B & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \overline{V} & 0 & \overline{V} & \overline{V} & 0 & \overline{V} \end{bmatrix}$$

FIG.4.17 – Particionamento da matriz de massa

Dando continuidade à sequência de modelagem do subsistema “Reparo”, agora já com o particionamento pronto, trabalha-se agora com as matrizes particionadas dos campos I, C e R para a obtenção do modelo de estado do reparo, utilizando a metodologia dos grafos de ligação, à semelhança do que fora feito para os demais subsistemas. Segue o equacionamento do modelo de estado do subsistema “Reparo”. A Eq.14 representa a equação de estado na forma matricial.

$$\begin{bmatrix} \dot{\cdot} \\ p_5 \\ \dot{\cdot} \\ p_6 \\ \dot{\cdot} \\ q_4 \\ \dot{\cdot} \\ q_7 \\ \dot{\cdot} \\ q_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{23}D^{-1}A - R_{22}F & -R_{22}G - R_{23}D^{-1} & -C_{21} & -C_{22} & -C_{23} \\ R_{33}D^{-1} - R_{32}F & -R_{32}G - R_{33}D^{-1} & -C_{31} & -C_{32} & -C_{33} \\ Z & Z & Z & Z & Z \\ F & G & Z & Z & Z \\ -D^{-1}A & D^{-1} & Z & Z & Z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_5 \\ p_6 \\ q_4 \\ q_7 \\ q_8 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_{23}D^{-1}E - R_{21} - R_{22}H & Z & Z \\ R_{33}D^{-1}E - R_{31} - R_{32}H & ID & Z \\ ID & Z & Z \\ H & Z & Z \\ -D^{-1}E & Z & Z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ e_{11} \\ \dot{\cdot} \\ f_1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

A Eq.15 representa as saídas do sistema na forma matricial.

$$\begin{bmatrix} e_1 \\ f_{11} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E1 & E2 & E3 & E4 & E5 \\ -D^{-1}A & D^{-1} & Z & Z & Z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_5 \\ p_6 \\ q_4 \\ q_7 \\ q_8 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E6 & N & S \\ -D^{-1}E & Z & Z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ e_{11} \\ \dot{\cdot} \\ f_1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

Onde:

$$E1 = -JR_{23} + JR_{22}F - NR_{33}D^{-1}A + NR_{32}F - R_{12}F + R_{13}D^{-1}A$$

$$E2 = JR_{22}G + JR_{23}D^{-1} + NR_{32}G + NR_{33}D^{-1} - R_{12}G - R_{13}D^{-1}$$

$$E3 = JC_{21} + NC_{31} - C_{11}$$

$$E4 = JC_{22} + NC_{32} - C_{12}$$

$$E5 = JC_{23} + NC_{33} - C_{13}$$

$$E6 = -JR_{23}D^{-1}E + JR_{21} + JR_{22}H - NR_{33}D^{-1}E + NR_{32}H + NR_{31} - R_{12} - R_{11} + R_{13}D^{-1}E$$

Pelo equacionamento do modelo de estado, observa-se que o reparo possui três variáveis de entrada, que são os Fluxos f_1 (velocidades lineares e angulares) e \dot{f}_1 (acelerações lineares e angulares) oriundos do Chassi e o Esforço e_{11} (forças e momento) oriundo da metralhadora.

Como se trata de um grafo multiligação, as entradas e as saídas são representadas por vetores. A **TAB. 4.4** apresenta a ordem dos elementos componentes dos vetores de entrada e saída, detalhando seus componentes, bem como os graus de liberdade do reparo que interagem, respectivamente, com estes componentes e suas ligações no Simulink são apresentadas na **FIG.4.18**.

TAB. 4.4 – Detalhamento da Entrada e Saída

Vetor	Componentes	GL
Entrada		
f_1	$vch_x \quad vch_y \quad \omega ch$	u_1, u_2, u_3
e_{11}	$Fmtr_x \quad Fmtr_y \quad MFmtr_x$	u_7, u_8, u_9
\dot{f}_1	$\dot{v}_x, \dot{v}_y, \dot{\omega}$	$\dot{u}_1, \dot{u}_2, \dot{u}_3$
Saída	Componentes	GL
e_1	$Frep_x \quad Frep_y \quad MFrep_x$	u_1, u_2, u_3
f_{11}	$vmtr_x \quad vmtr_y \quad \omega mtr$	u_7, u_8, u_9

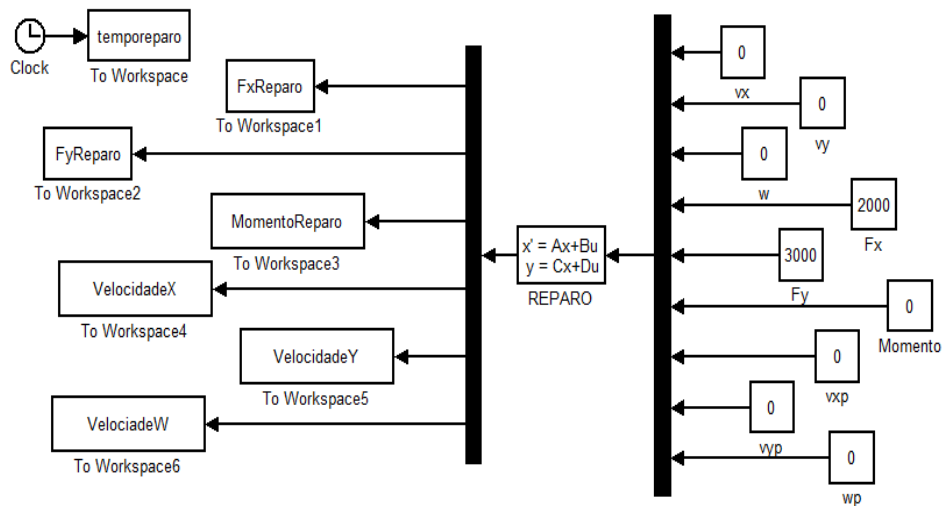


FIG.4.18 - Ligações feitas no Simulink para o Reparo

O subsistema Reparo foi simulado de forma que suas entradas em fluxo fossem nulas, significando que este esteja fixado a uma superfície plana sem sofrer influência da mesma. Como entradas em esforço foram simuladas duas forças constantes (F_x e F_y) e um momento nulo, conforme **FIG. 4.18**, esperando que o sistema se comporte exatamente como uma viga

fixada a uma superfície, sofrendo influência de uma força horizontal e outra vertical, de forma a encontrar sua condição de equilíbrio transmitindo exatamente os valores das forças iguais aos de entrada juntamente com o momento produzido pela força F_x . A **TAB.4.5** apresenta os parâmetros utilizados para simulação do subsistema reparo e a **FIG. 4.19** apresenta as forças e momentos transmitidos pelo reparo para a superfície.

TAB.4.5 – Parâmetros do Reparo

E : Módulo de Elasticidade	210 GPa.
A : Área da seção reta circular da estrutura	0,0004 m ²
L : Comprimento de um elemento estrutural	0,8m
I : Momento de Inércia	1,35 x 10 ⁻⁸ m ⁴
ρ : Massa específica	8000 kg/m ³ (AÇO 4340-ANSI)
Força Horizontal	2000 N
Força Vertical	3000 N

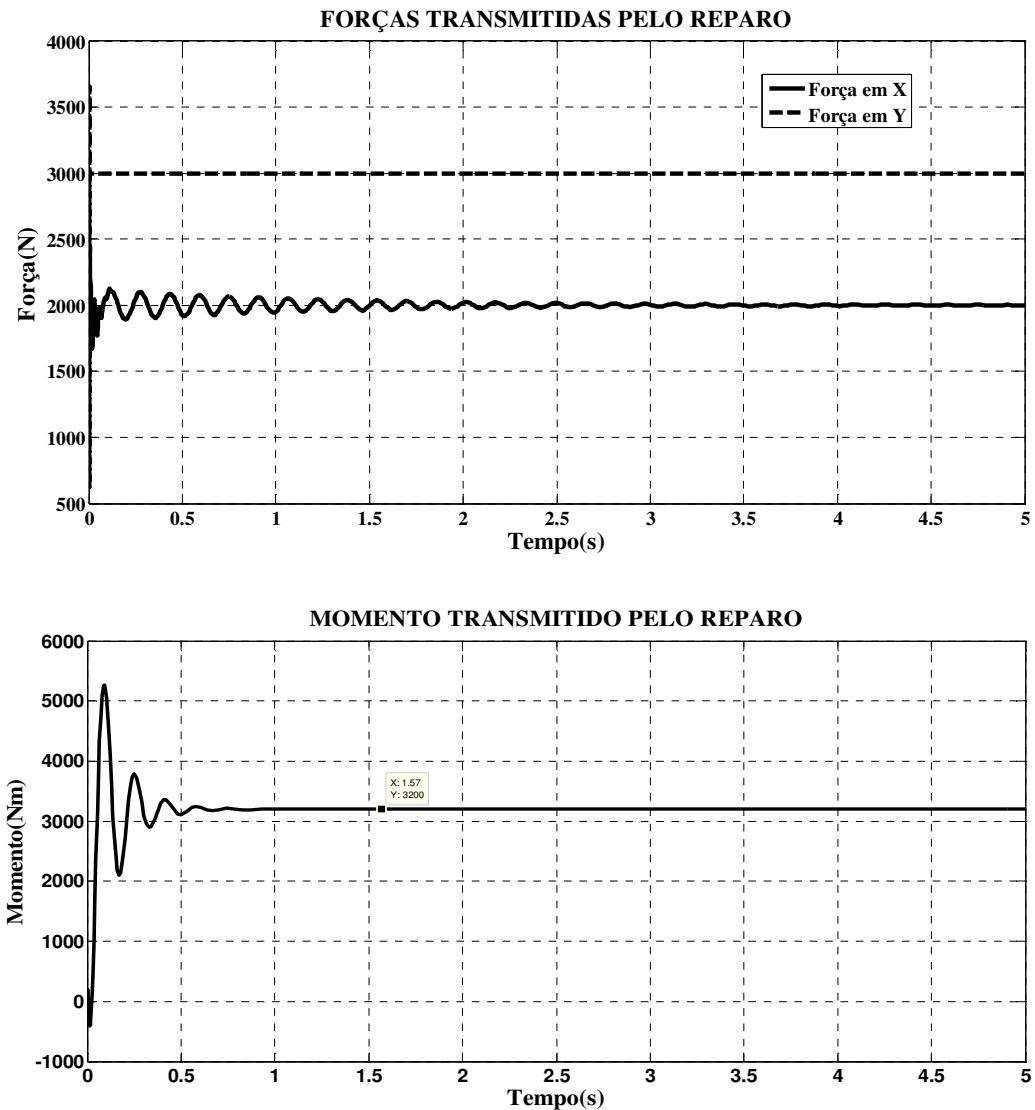


FIG.4.19 – Forças e Momento transmitido pelo Reparo

4.2.5. MODELAGEM DA METRALHADORA

A Metralhadora Calibre .50 é um subsistema dinâmico complexo que envolve várias áreas como Balística, Termodinâmica, Mecânica, dentre outras. Porém para o presente trabalho, sua modelagem estará focada, basicamente, no recuo e amortecimento de alguns de seus componentes, por ocasião do disparo de sua munição. Os componentes principais envolvidos no funcionamento da metralhadora são o Cano, a Caixeta e o Ferrolho, intitulados de “Massa Recuante”, e uma Mola Recuperadora (Helicoidal), responsável por suportar o deslocamento destas massas, causado pela força oriunda do disparo da metralhadora. Desta

forma, este modelo simplificado da metralhadora será considerado um sistema Massa-Mola-Amortecedor, conforme é apresentado na **FIG.4.20**.

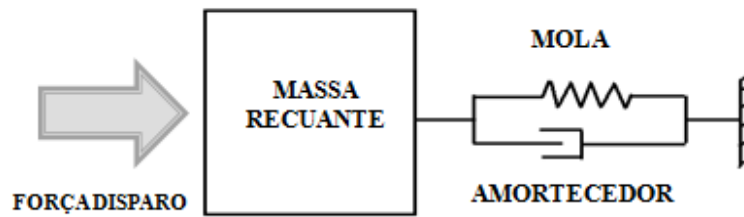


FIG.4.20 – Modelo simplificado da metralhadora

Por se tratar de um sistema onde serão utilizadas basicamente grandezas escalares, excetuando-se o transformador **TF**, que é um vetor, será utilizado para sua modelagem um grafo misto, possuindo ligações simples e uma multiligação. A **FIG. 4.21** apresenta o grafo deste subsistema e em seguida são apresentadas as equações do seu modelo de estado.

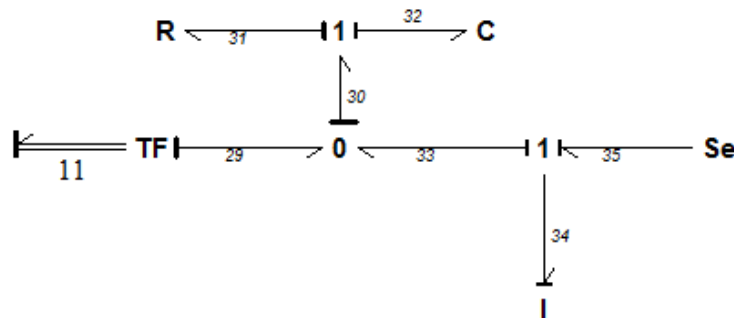


FIG. 4.21 – Grafo de Ligação da Metralhadora

A Eq.16 representa a equação de estado na forma matricial.

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{p}}_{34} \\ \dot{\mathbf{q}}_{32} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{RI} & -\frac{1}{C} \\ \frac{1}{C} & Z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{p}_{34} \\ \mathbf{q}_{32} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{ID} \\ \mathbf{Z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\frac{\mathbf{TF}}{R} \mathbf{e}_{35} \\ (\mathbf{TF})^T \mathbf{f}_{11} \end{bmatrix} \quad (16)$$

A Eq.17 representa as saídas do sistema na forma matricial.

$$\mathbf{e}_{11} = \begin{bmatrix} \mathbf{TF} \\ \mathbf{RI} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{p}_{34} \\ \mathbf{q}_{32} \end{bmatrix} + \mathbf{Z} \begin{bmatrix} \mathbf{TF}(\mathbf{TF})^T \\ \mathbf{R} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{e}_{35} \\ \mathbf{f}_{11} \end{bmatrix} \quad (17)$$

O transformador TF, presente nas equações do modelo de estado, representa o local de acoplamento deste subsistema, modelado em grafo de ligação simples, com o subsistema Reparo, modelado em grafo multiligação. Um dos fatores que mais influenciam este modelo é o valor da força provocada pelo disparo da metralhadora, que será transmitida para os demais subsistemas componentes deste trabalho. Para encontrar o valor desta força foi utilizado o método balístico intitulado VALLIER HEYDENREICH, que fornece a curva de pressão da câmara da metralhadora por ocasião de um disparo, apresentada na **FIG.4.22**.

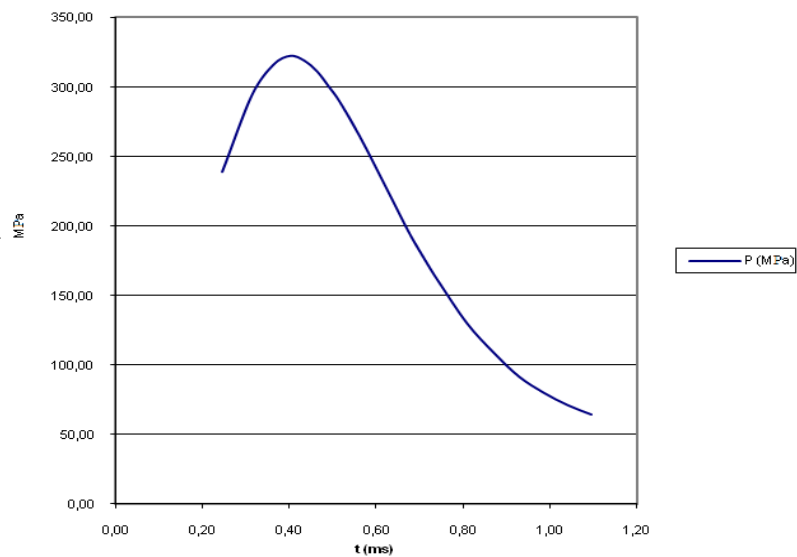


FIG.4.22 – Curva “Pressão x Tempo” da Metralhadora

Os parâmetros utilizados para a simulação do subsistema Metralhadora e para obtenção de sua curva de pressão são apresentados pela **TAB.4.6**.

TAB.4.6 – Parâmetros Utilizados

Massa Recuante (cano+caixeta+ferrolho)	12,716 kg
Rigidez mola recuperadora	11180,12 N/m
Amortecimento (10% rigidez)	1180 kN.s/m
Distância do recuo do cano	0,0265 m
Velocidade inicial munição comum M33 (CBC)	887 m/s
Pressão máxima na câmara	322 MPa
Massa do projétil	0,042 kg
Massa da carga de projeção	0,015 kg
Força da Metralhadora (Fmetr) - constante	40000 N
Distância percorrida pelo projétil	1,04 m

A **FIG. 4.23** ilustra o ângulo de elevação (TETA) da metralhadora e a **FIG.4.24** apresenta suas ligações no Simulink.

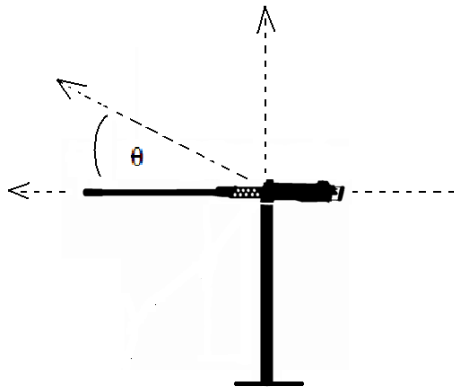


FIG. 4.23 – Ângulo de elevação da metralhadora

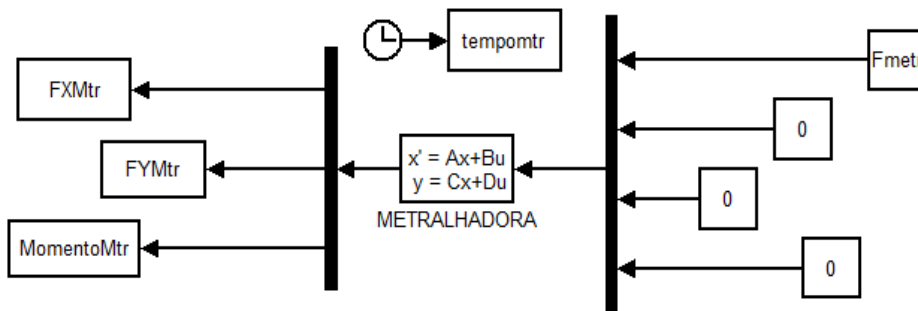


FIG.4.24 – Ligações no Simulink

A **FIG.4.25** apresenta os resultados desta simulação para 30 graus de elevação. As entradas em fluxo na metralhadora foram consideradas nulas, representando que a metralhadora está fixada a um suporte sem sofrer a influência deste.

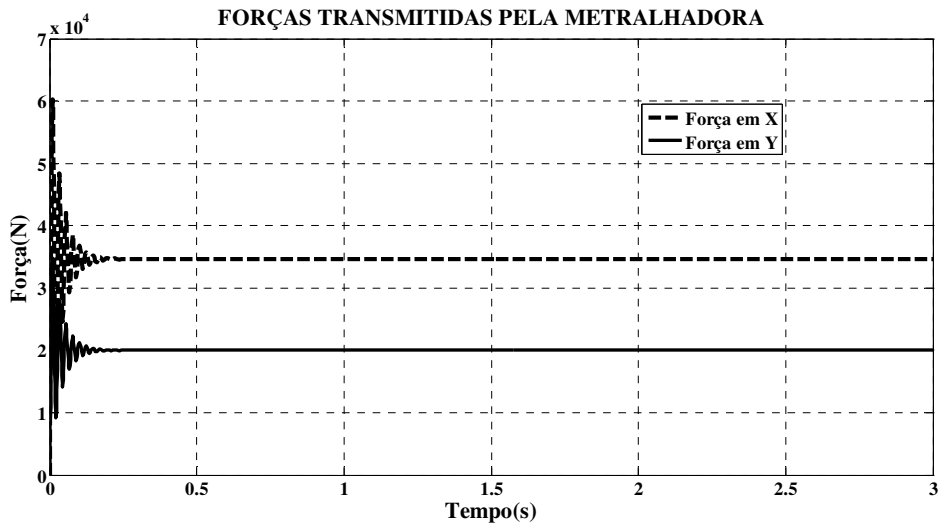


FIG. 4.25 – Forças transmitidas pela metralhadora (30°)

Verifica-se que os valores transmitidos pela metralhadora são exatamente os obtidos pela decomposição da força oriunda do disparo em termos dos valores de seno e cosseno do ângulo de elevação da metralhadora.

4.2.6. MODELAGEM DO REPARO E DA METRALHADORA.

Após os subsistemas Reparo e Metralhadora terem seus modelos validados, eles serão acoplados de forma a funcionarem como um subsistema unificado. Para sua modelagem será seguida a mesma sequência de modelagem utilizada pelos demais subsistemas, então, a FIG. 4.26 apresenta o grafo de ligação destes subsistemas acoplados.

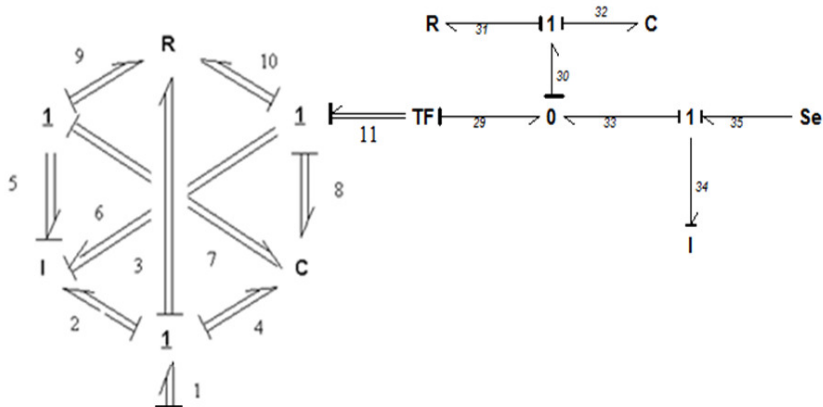


FIG. 4.26 - Grafo de ligação dos subsistemas “Reparo” e “Metralhadora”.

Para a simulação destes subsistemas, os fluxos de entrada no subsistema “Reparo” serão considerados nulos e a Força da Metralhadora (F_{metr}), oriunda do disparo desta, será sua única fonte de esforço. Desta forma estes subsistemas serão simulados com o reparo fixado em uma superfície plana, sendo acionados pela ação do disparo da metralhadora. Espera-se como resultados desta simulação que as forças e o momento transmitidos pelo Reparo sejam exatamente iguais às forças transmitidas pela Metralhadora e o momento gerado pelo Reparo para superfície seja igual ao valor da componente em X da força da Metralhadora multiplicado pelo comprimento do Reparo.

Pela modularidade da técnica dos grafos de ligação e pela funcionalidade proporcionada pelo uso do Simulink, as equações de estado dos subsistemas não são alteradas, sendo ajustadas somente as entradas e saídas por meio das ligações realizadas no Simulink, conforme apresentado na **FIG. 4.27**.

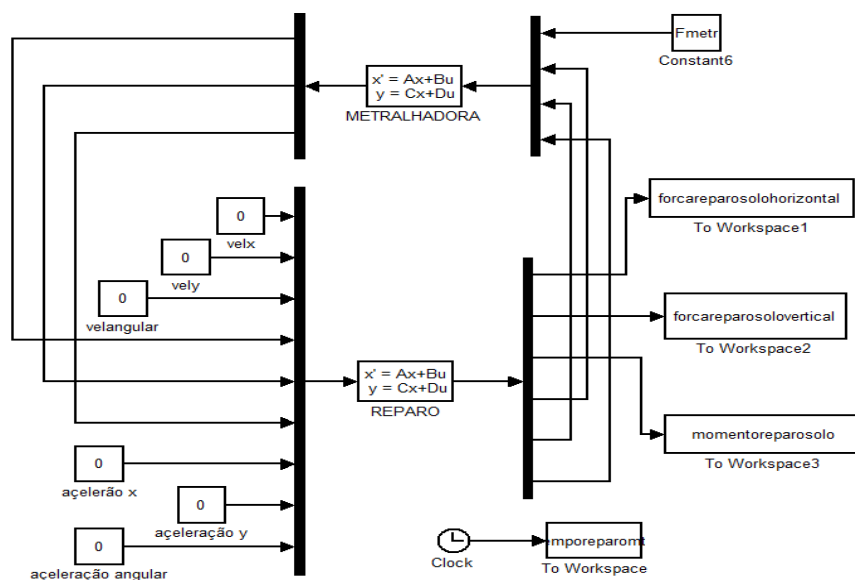


FIG. 4.27 – Ligações do subsistema “Reparo” e “Metralhadora”.

Os parâmetros utilizados para a simulação são os mesmos apresentados pelas **TAB.4.5** e **TAB.4.6**. A simulação será executada com elevações do cano da metralhadora de 0° , 30° e 90° e seus resultados são apresentados na **FIG. 4.28**.

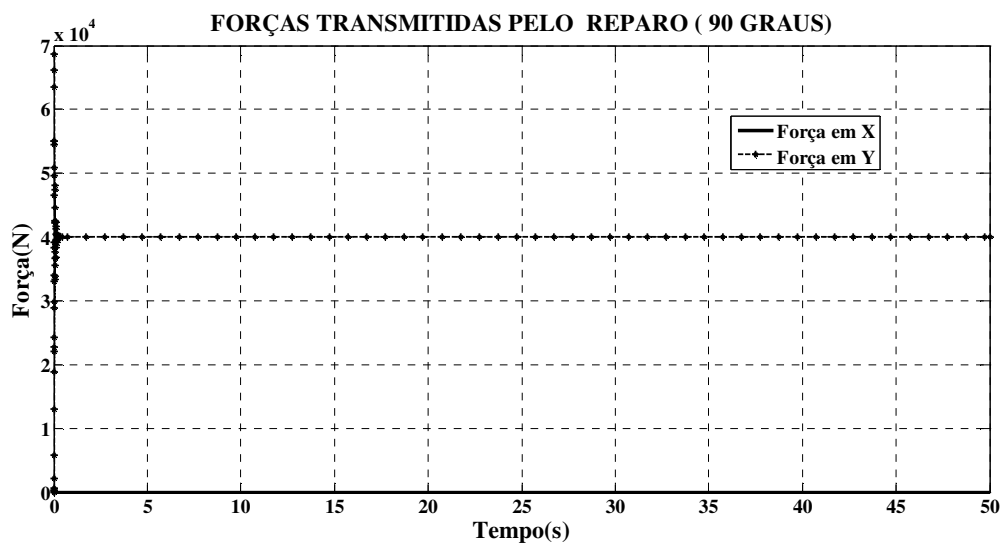
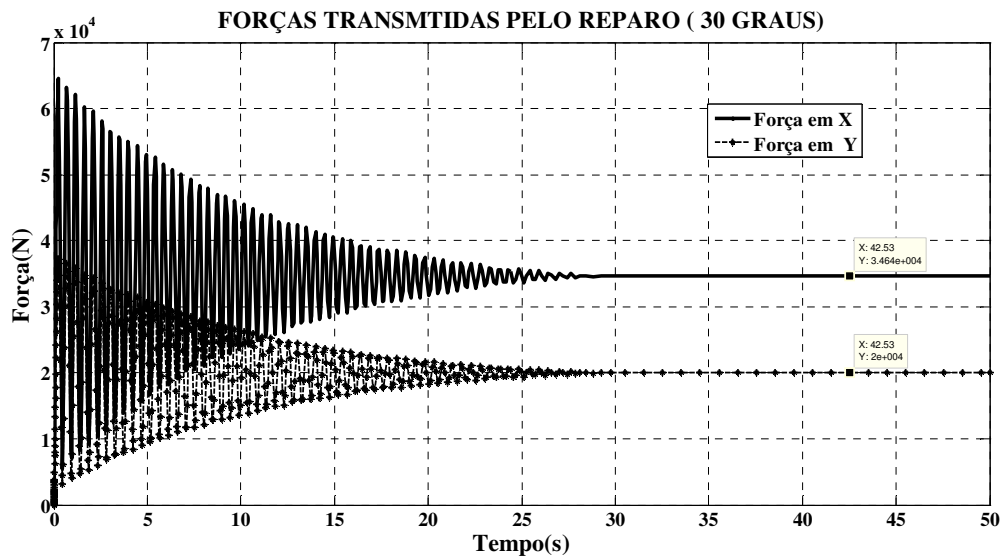
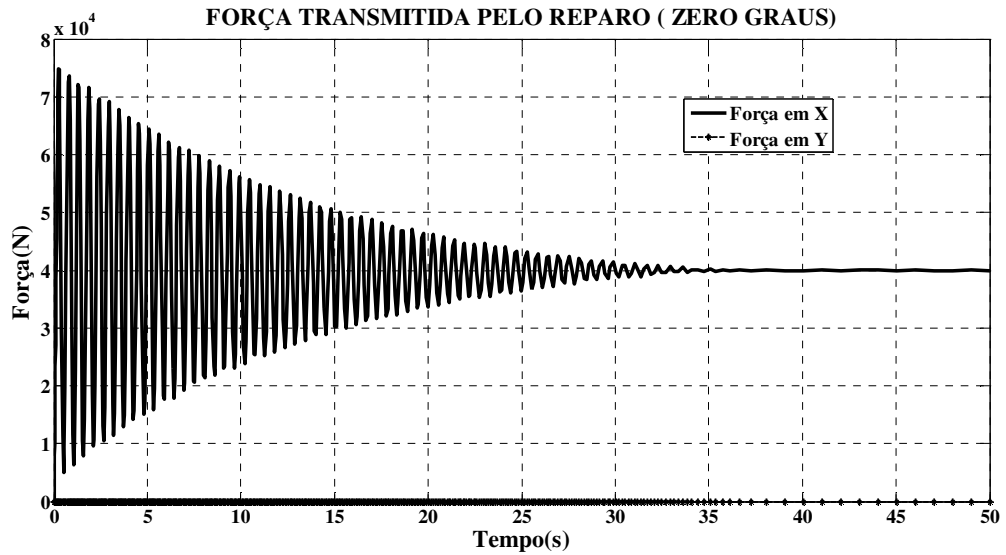


FIG.4.28 – Forças transmitidas pelo Reparo

Os resultados obtidos pela simulação computacional são exatamente os esperados, comprovando desta forma o correto funcionamento do subsistema formado pelo acoplamento dos subsistemas “Reparo” e “Metralhadora”.

Diante do correto funcionamento de todos os subsistemas componentes do modelo proposto neste trabalho, a próxima etapa para conclusão do modelo plano será o acoplamento de todos estes subsistemas para simulação do modelo completo.

4.2.7. MODELAGEM DE TODOS OS SUBSISTEMAS (MODELO PLANO COMPLETO)

Para a modelagem de todos os subsistemas será utilizada a mesma sequência adotada ao longo deste trabalho e desta forma, a **FIG. 4.29** apresenta o grafo de ligação do modelo completo.

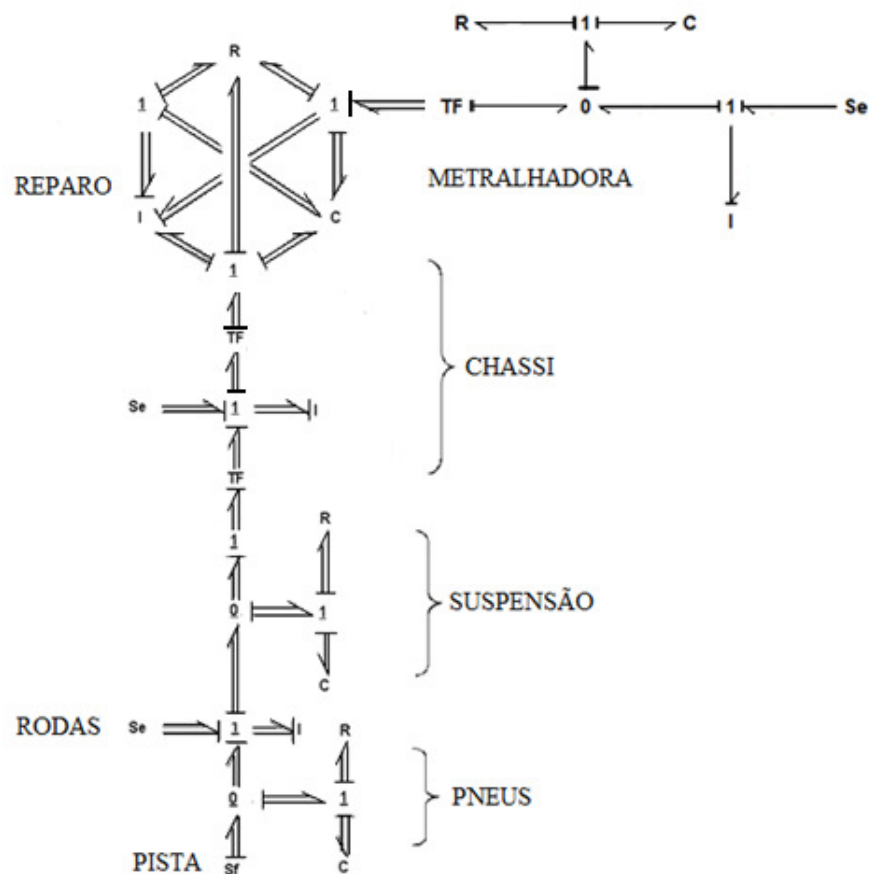


FIG. 4.29 - Grafo de ligação do modelo completo.

Para a simulação destes subsistemas, a excitação de base é nula, sendo que a Força da Metralhadora (F_{metr}), o peso das rodas e o peso do chassi são as fontes de esforço que acionam todo o sistema. Nesta simulação não é avaliado o efeito da força horizontal aplicada pelo Reparo no Chassi, que é avaliado no modelo em três dimensões. A simulação é realizada com a viatura parada sobre uma superfície plana, sem sofrer a influência desta, de forma que haja um intervalo de tempo entre a ação do peso das rodas e chassi sobre o sistema e a ação do disparo da metralhadora, sendo observados exatamente os efeitos causados por cada uma destas fontes de esforço sobre o sistema como um todo. Pela modularidade permitida pela técnica dos grafos de ligação, as equações de estado dos subsistemas não são alteradas, sendo suas entradas e saídas ajustadas no Simulink, conforme apresentado na **FIG. 4.30**.

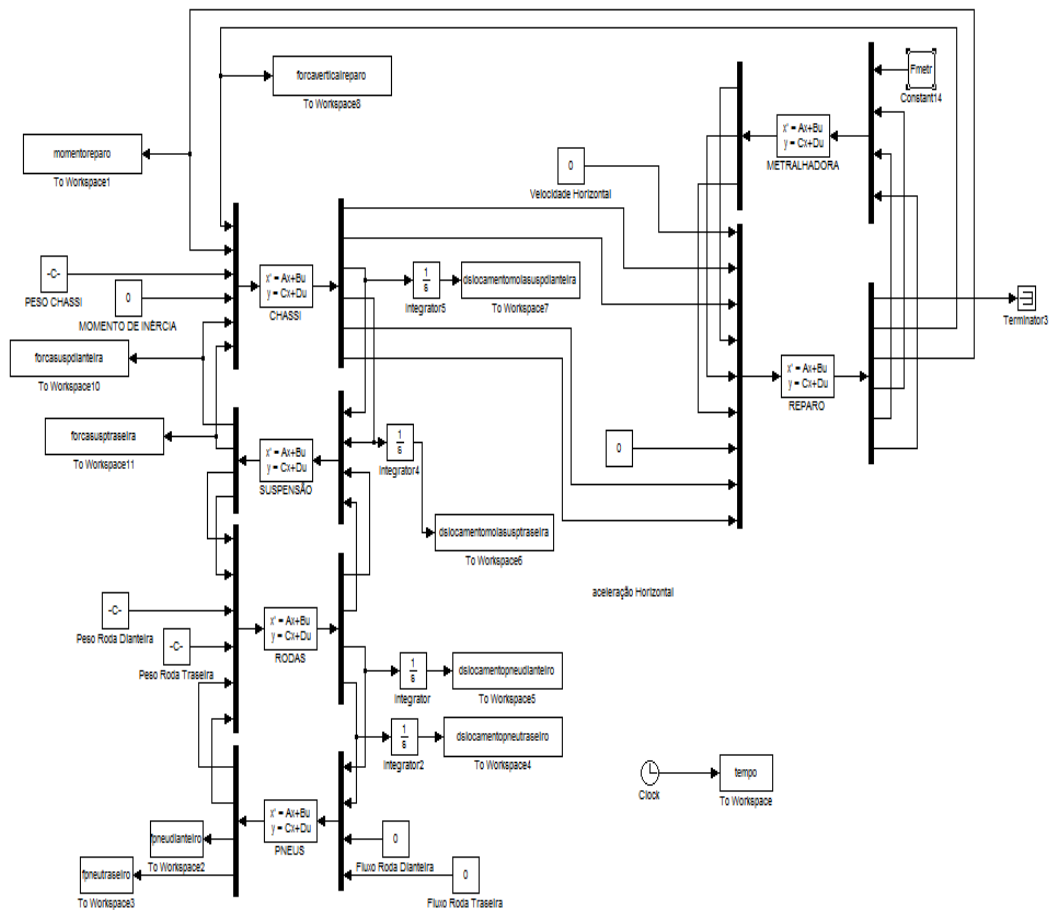


FIG. 4.30- Ligações no Simulink do modelo completo plano

Continuando a sequência de modelagem, será realizada a simulação de todos os subsistemas, sendo que além da ação do peso do Chassi e das Rodas, haverá também a força proveniente da metralhadora que agirá no sistema de acordo com sua elevação. São avaliadas

as forças transmitidas pelos Pneus para o solo com elevação nula, sendo os resultados apresentados na **FIG. 4.31**. A expectativa pelos resultados obtidos na simulação computacional é que os valores das forças transmitidas pelos pneus sejam os mesmos obtidos por meio da confecção do diagrama de corpo livre representante do acoplamento de todos os subsistemas.

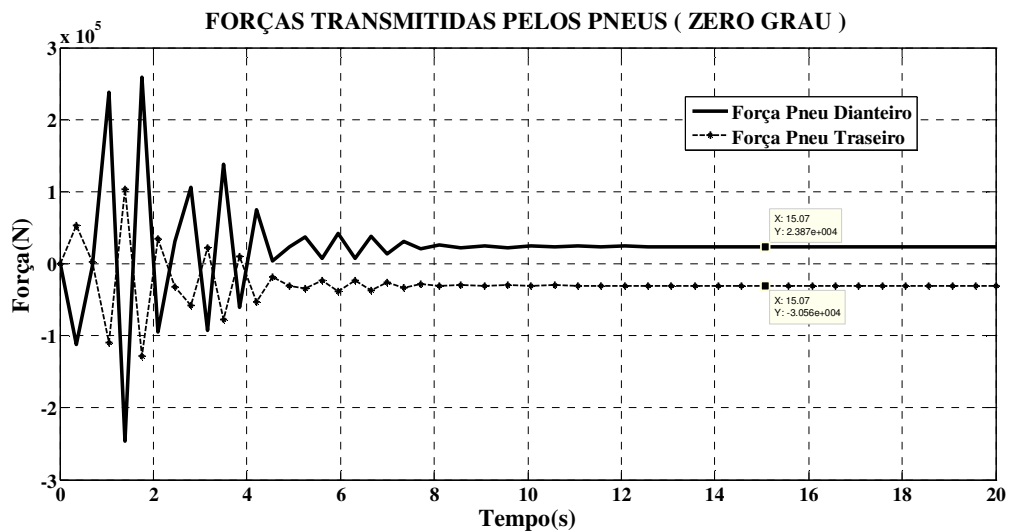


FIG. 4.31 – Forças nos Pneus (Zero grau)

Ao serem medidas as forças por estes transmitidas, verifica-se que os valores obtidos pela simulação computacional são exatamente iguais aos obtidos pela confecção do Diagrama de Corpo Livre do presente modelo, quando este alcança sua condição de equilíbrio estático.

4.3. MODELAGEM DO SISTEMA EM TRÊS DIMENSÕES

A modelagem em três dimensões dar-se-á da mesma forma que no plano, porém agora são abordados os efeitos nos três eixos de referência. A dinâmica vertical é ainda analisada, porém, os efeitos oriundos da dinâmica lateral e longitudinal, devido às forças transmitidas pela metralhadora quando girada em torno do eixo vertical, são analisados considerando-se os efeitos de rigidez e amortecimento dos pneus e suspensões naquelas direções.

Como feito no modelo plano, o mesmo grafo e equações dos subsistemas separados são utilizados neste modelo. Como este grafo trabalha no campo vetorial, as equações dos modelos de estado de cada subsistema não são modificadas, porém a ordem das matrizes

adotadas será alterada para atender a todas as variáveis correspondentes aos eixos de referência. Os parâmetros utilizados para a simulação de todo o veículo estão apresentados na **TAB.4.7** e os que não são arbitrados, foram baseados no trabalho proposto por COSTA NETO, 2008.

TAB. 4.7- Parâmetros utilizados

Coeficiente de Rigidez vertical dos pneus	160.000N/m
Coeficiente de Amortecimento vertical dos pneus	100Ns/m
Coeficiente de Rigidez longitudinal dos pneus (arbitrado)	200000 N/m
Coeficiente de Amortecimento longitudinal dos pneus (arbitrado)	200 kN.s/m
Coeficiente de Rigidez transversal dos pneus (arbitrado)	230000 N/m
Coeficiente de Amortecimento transversal dos pneus (arbitrado)	230 kN.s/m
Massa das rodas para as três direções (estimado)	42 kg
Massa do Chassi para as três direções	1000 kg
Momento de Inércia do Chassi (Ix)	750 kg· m ²
Momento de Inércia Chassi (Iy)	950 kg· m ²
Coeficiente de Rigidez das molas da suspensão para as três direções	16.000N/m
Coeficiente de Amortecimento suspensão para as três direções	100Ns/m

4.3.1. MODELAGEM DOS SUBSISTEMAS “PNEUS”, “RODAS”, “SUSPENSÃO” E “CHASSI” (CARRO COMPLETO)

O próximo passo a ser dado, à semelhança do modelo plano, é o acoplamento de todos estes subsistemas num modelo que represente toda a viatura. A **FIG.4.32** apresenta o modelo com 7 graus de liberdade do veículo. A **FIG.4.33** o acoplamento destes subsistemas feito no Simulink, onde pode ser observado seu grande número de ligações, devido ao número de graus de liberdade do modelo da viatura.

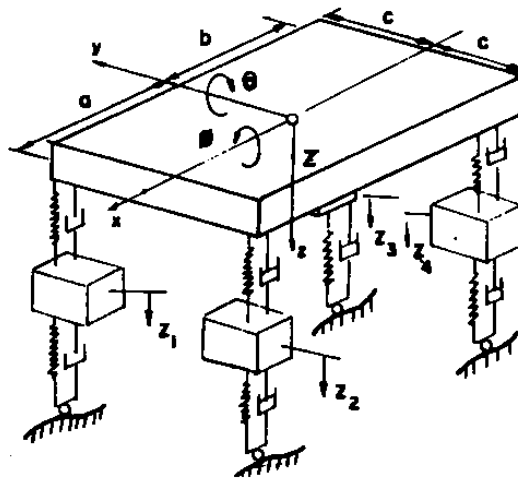


FIG.4.32 - Modelo do veículo com sete graus de liberdade

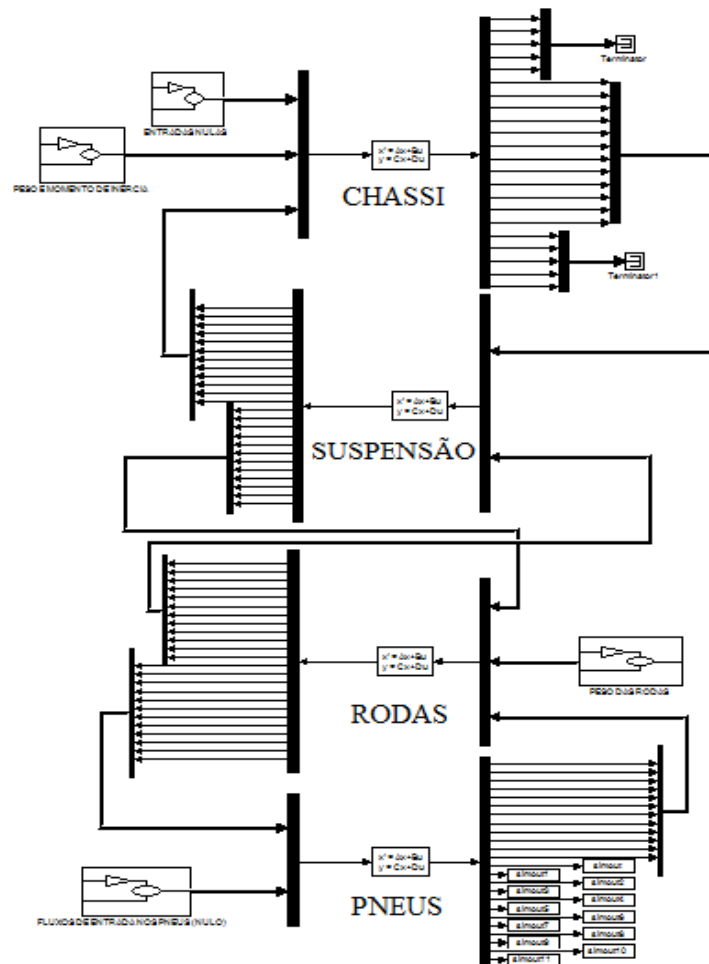


FIG.4.33 – Modelo completo da viatura no Simulink

O acoplamento dos subsistemas deve também gerar resultados coerentes, bastando serem respeitadas as entradas e saídas de cada subsistema. A simulação será realizada com as

entradas em fluxo nos pneus sendo nulas e com o peso do Chassi e das Rodas sendo as únicas fontes de esforço a atuarem no sistema.

Como resultado da simulação do modelo, na **FIG.4.34** são apresentadas as forças transmitidas pelos dois pneus dianteiros e dois traseiros para o solo. Como o CG do carro está centralizado no seu eixo longitudinal, espera-se que os valores das forças transmitidas pelos pneus dianteiros direito e esquerdo sejam iguais e os transmitidos pelos traseiros direito e esquerdo também.

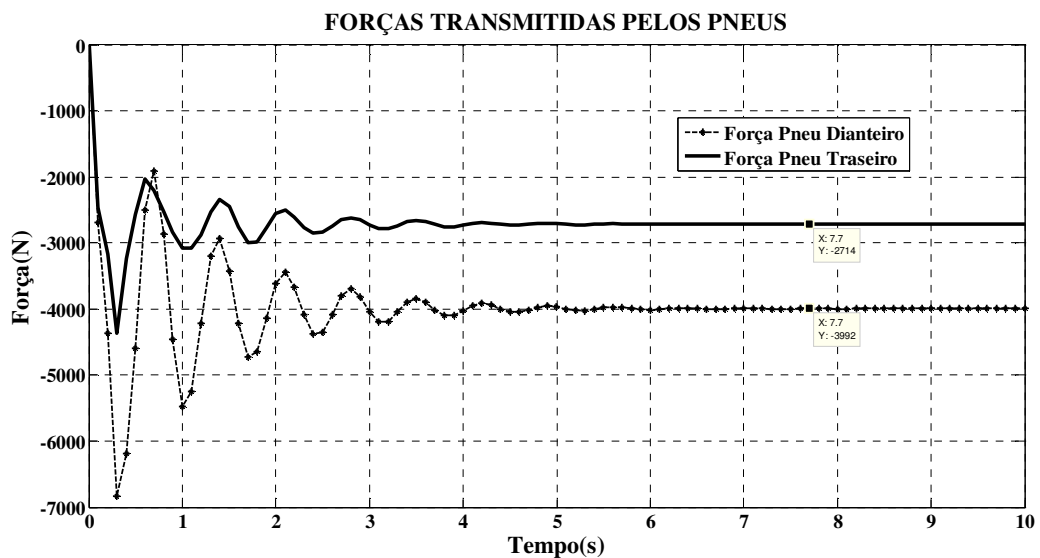


FIG.4.34- Forças transmitidas pelos pneus

Verifica-se que os resultados obtidos pela simulação computacional são exatamente os mesmos obtidos quando da utilização do Diagramas de Corpo Livre destes subsistemas, quando estes alcançam sua condição de equilíbrio estático, o que comprova a validade do modelo do acoplamento dos subsistemas componentes da viatura modelada em três dimensões.

4.3.2. MODELAGEM DO REPARO

Como nos demais subsistemas, o grafo multiligação e as equações do modelo de estado do Reparo não são modificados, mas suas matrizes referentes aos campos Inercial, Capacitivo e Resistivo sofrem mudanças em sua construção, visto que agora representam um modelo em três dimensões com cinco graus de liberdade por nó. Como esta estrutura está discretizada

com três nós e com base nos graus de liberdade de cada nó, conclui-se que esta estrutura será representada por uma Matriz 15 X 15. A FIG. 4.35 apresenta a matriz genérica de estrutura do Reparo e o seu modelo físico com seus respectivos graus de liberdade.

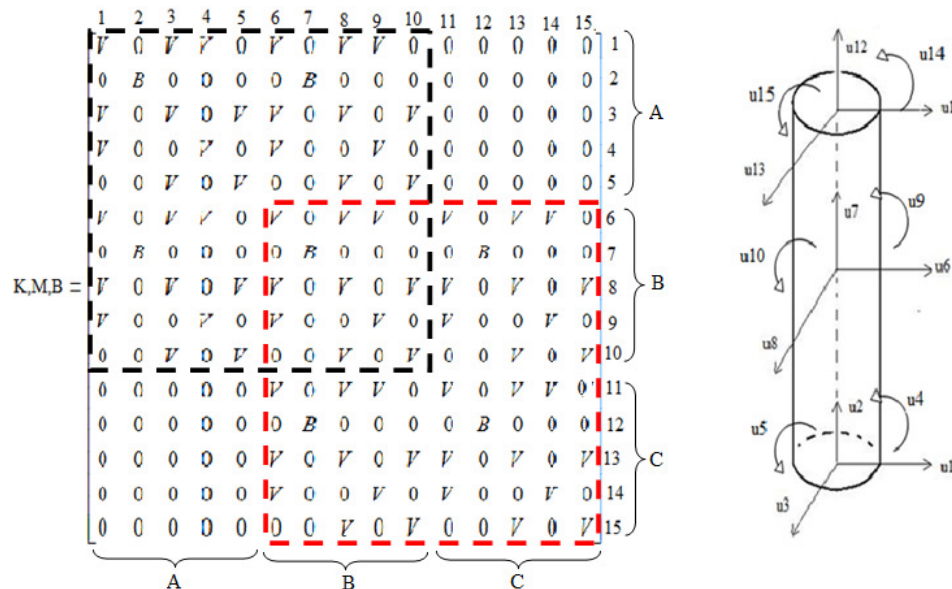


FIG. 4.35- Matriz genérica do reparo e seu modelo físico

Onde:

- A: Graus de liberdade u1, u2, u3, u4 e u5;
- B: Graus de liberdade u6, u7, u8, u9 e u10;
- C: Graus de liberdade u11, u12, u13, u14 e u15;

O tracejado em preto significa o primeiro elemento estrutural do reparo com seus graus de liberdade representados por “A” e “B” e o tracejado em vermelho, o segundo elemento estrutural, com seus graus de liberdade representados por “B” e “C”. As matrizes I , K e R , abaixo, apresentam o particionamento das matrizes de Massa, Rigidez e Amortecimento, respectivamente, à semelhança do modelo plano visto anteriormente, tendo como diferença as dimensões destas matrizes que agora são 5x5.

$$I = \begin{bmatrix} I_{11} & I_{12} & I_{13} \\ I_{21} & I_{22} & I_{23} \\ I_{31} & I_{32} & I_{33} \end{bmatrix} ; C^{-1} = K = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} \end{bmatrix} \text{ e } R = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{bmatrix}$$

A FIG.4.36 apresenta, a título de exemplo, a obtenção da matriz do campo inercial por meio do particionamento da matriz de massa da estrutura do reparo, visto que o procedimento é o mesmo para a obtenção das matrizes do campo capacitivo e resistivo, e a FIG.4.37 apresenta o modelo no Simulink correspondente.

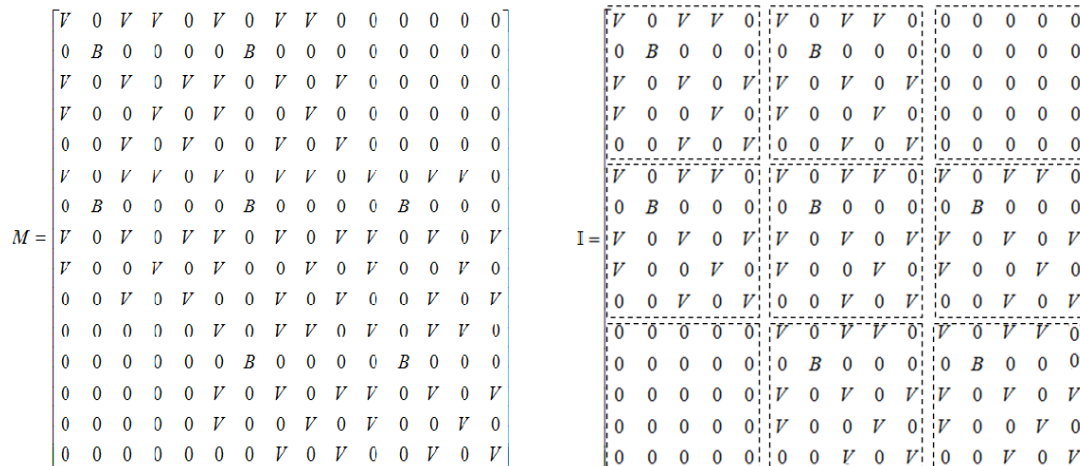


FIG.4.36 – Particionamento da matriz de Massa

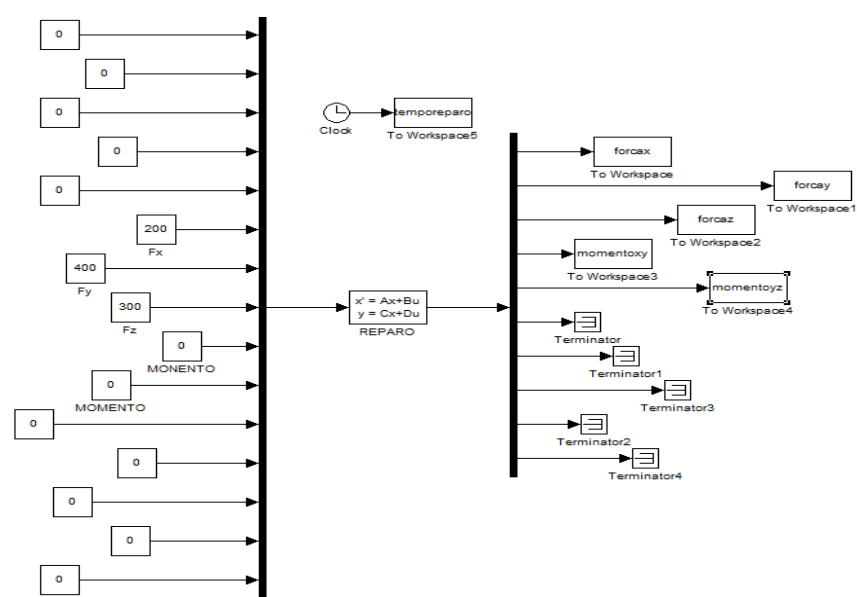


FIG.4.37 - Ligações do subsistema Reparo no Simulink

Para esta simulação, o reparo foi fixado a uma superfície plana (entradas em fluxo nulas), recebendo esforços constantes nas direções dos graus de liberdade u_1, u_2, u_3, u_4 e u_5 , representando as forças e momentos provenientes da metralhadora. O comportamento esperado é que o reparo transmita, na condição de equilíbrio estático, o valor destas forças e

os momentos por estas produzidos. As **FIG.4.38** e **FIG.4.39** apresentam os resultados das forças e momentos transmitidos pelo reparo, respectivamente.

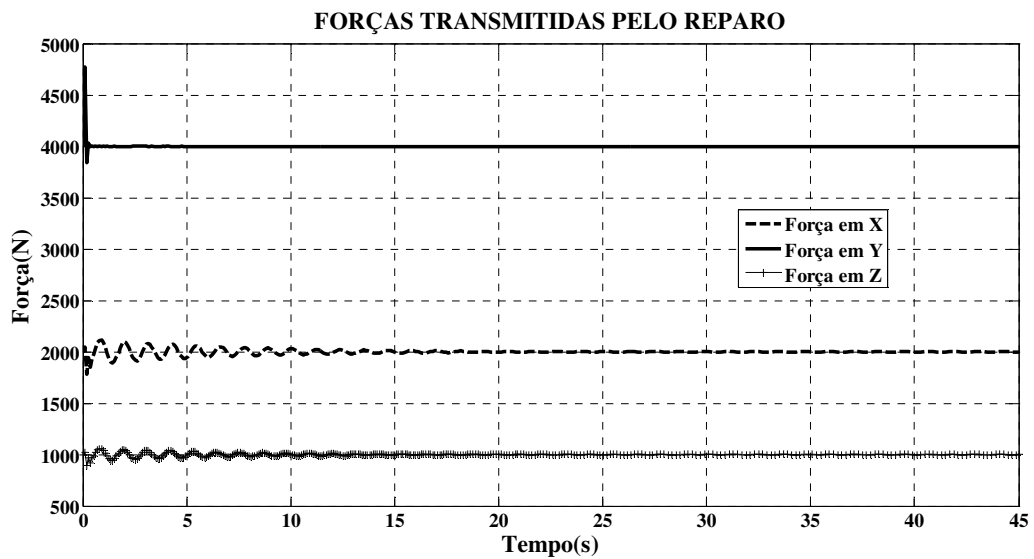


FIG.4.38 - Forças Transmitidas pelo reparo

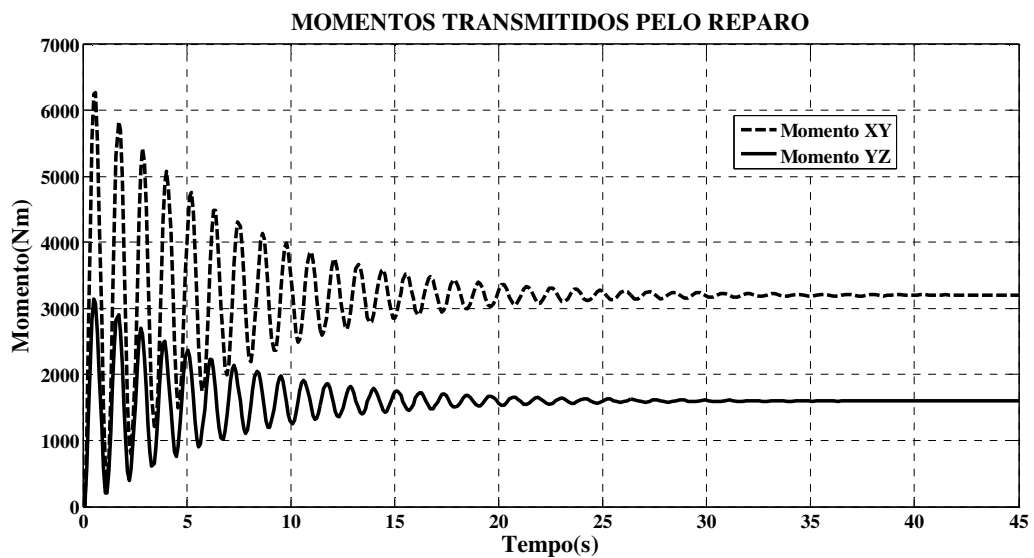


FIG.4.39 – Momentos transmitidos pelo reparo

Ao serem analisados os resultados obtidos pela simulação computacional, verifica-se que o valor final das forças e momentos transmitidos pelo reparo são exatamente aqueles obtidos pela análise estática, comprovando que o presente modelo representa com fidelidade o comportamento dinâmico do reparo.

O modelo da metralhadora será o mesmo utilizado na modelagem plana, somente sendo alterado seu transformador, que passará a ter cinco elementos, de forma a relacionar as forças oriundas da metralhadora com o ponto de fixação do reparo. Desta forma o próximo modelo a ser executado será o acoplamento dos subsistemas reparo e metralhadora.

4.3.3. MODELAGEM DO REPARO E DA METRALHADORA

Para este acoplamento é utilizado um transformador, responsável por unir uma grandeza escalar a uma vetorial, ou seja, a força produzida pela metralhadora, que é unidimensional, é decomposta nas direções de referência (eixos X, Y e Z) que é transmitida para o reparo. Além disso, como a metralhadora é unida ao reparo por meio de uma junta universal, não existe qualquer momento gerado pela metralhadora que seja transmitido ao reparo. Como o reparo trabalha com cinco graus de liberdade em cada nó, o ponto de fixação da metralhadora receberá um esforço com cinco componentes, que são exatamente as três componentes da força da Metralhadora e seus dois momentos nulos. A **FIG. 4.40** apresenta o acoplamento entre a metralhadora e o reparo. Estão destacados os graus de liberdade do reparo neste acoplamento (u_{11} , u_{12} , u_{13} , u_{14} e u_{15}) que estão relacionados aos componentes do vetor esforço provenientes da metralhadora.

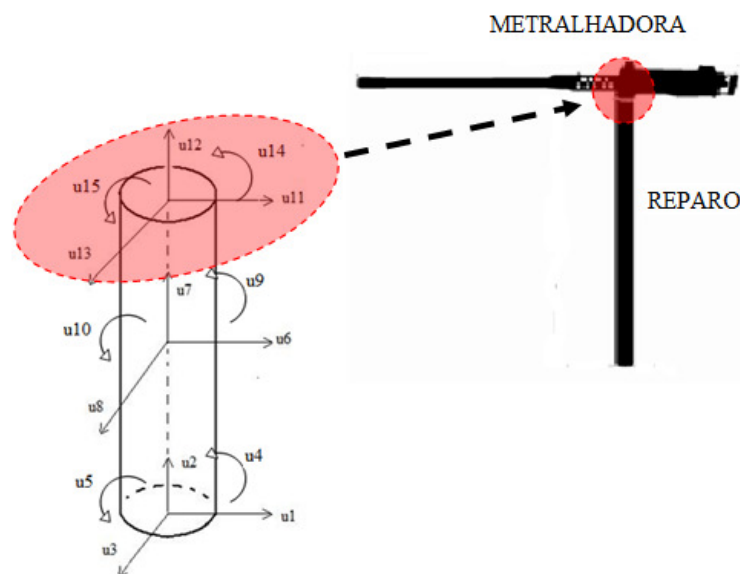


FIG. 4.40 – Acoplamento entre os subsistemas Reparo e Metralhadora.

A **FIG.4.41** apresenta o modelo no Simulink dos subsistemas reparo e metralhadora, acoplados.

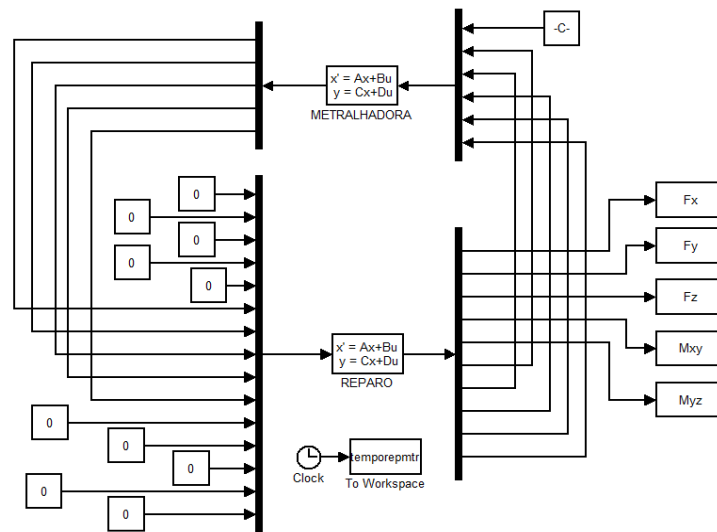


FIG.4.41 – Ligações dos subsistemas Reparo e Metralhadora

Como o reparo é uma estrutura discretizada em dois elementos estruturais, pela técnica adotada dos grafos de ligação, é possível avaliar o comportamento desta estrutura em cada um de seus nós, por meio dos seus respectivos graus de liberdade. Esta simulação obterá somente os valores das forças e momentos transmitidos pelo reparo no local de sua fixação. As entradas em fluxo no reparo serão nulas, significando desta forma, que o reparo estará fixado numa superfície plana horizontal, sem sofrer influência desta. As forças e momentos transmitidos pelo reparo deverão ser exatamente os valores das componentes da força da metralhadora e os momentos produzidos por estas, devido ao comprimento do reparo.

A **FIG.4.42** apresenta um esquema onde é observada a posição da força da metralhadora em relação aos eixos de referência, onde os ângulos Alfa e Beta representam sua elevação e direção, respectivamente.

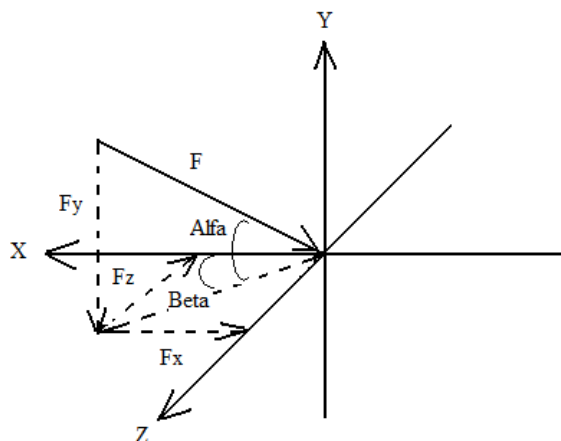


FIG.4.42 – Posição da força em relação aos eixos

Baseando-se na **FIG.4.42**, a simulação deste acoplamento é realizada, num primeiro momento, sem elevação da metralhadora e com zero grau de direção, com os resultados das forças e momentos transmitidos sendo apresentados nas **FIG.4.43** e **FIG.4.44**, respectivamente. Num segundo momento é realizada uma simulação com 30 graus de elevação e 60 graus de direção, com os resultados apresentados nas **FIG.4.45** e **FIG.4.46**. Os valores das forças e momentos transmitidos pelo reparo são exatamente os valores obtidos pela decomposição da força oriunda da metralhadora nas três direções de referência e suas relações com o comprimento do reparo, respectivamente.

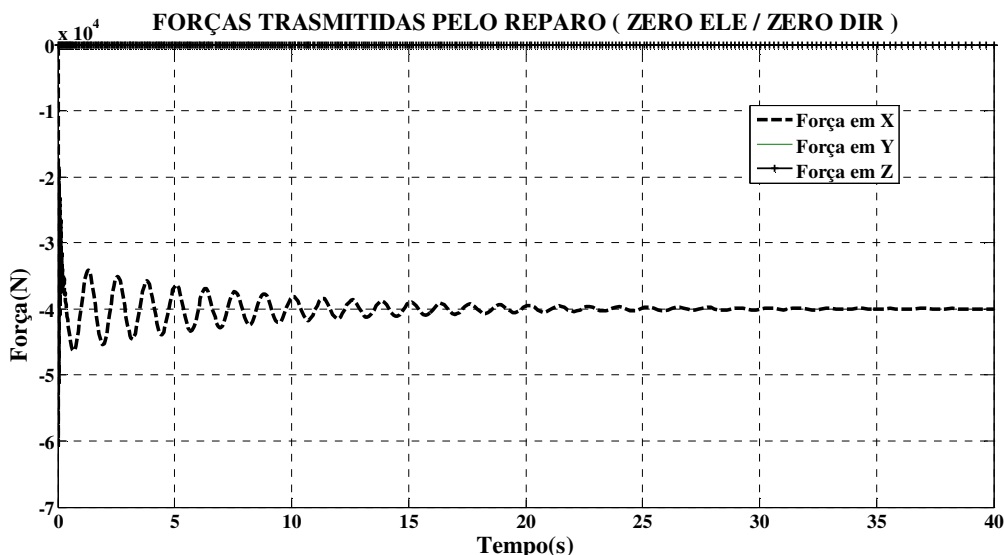


FIG.4.43 – Forças transmitidas pelo reparo (zero grau)

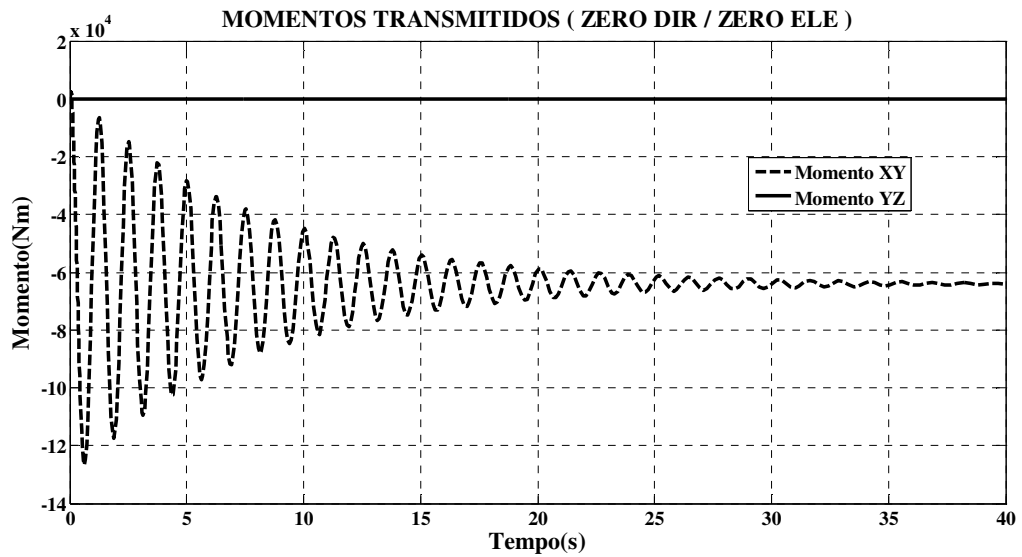


FIG.4.44 – Momentos transmitidos pelo reparo (zero grau)

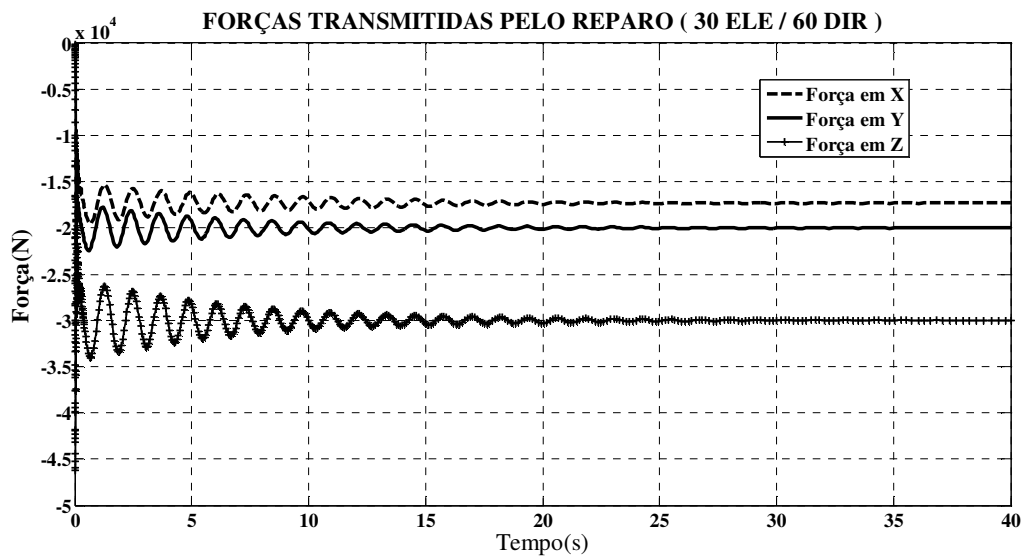


FIG.4.45 - Forças transmitidas pelo Reparo

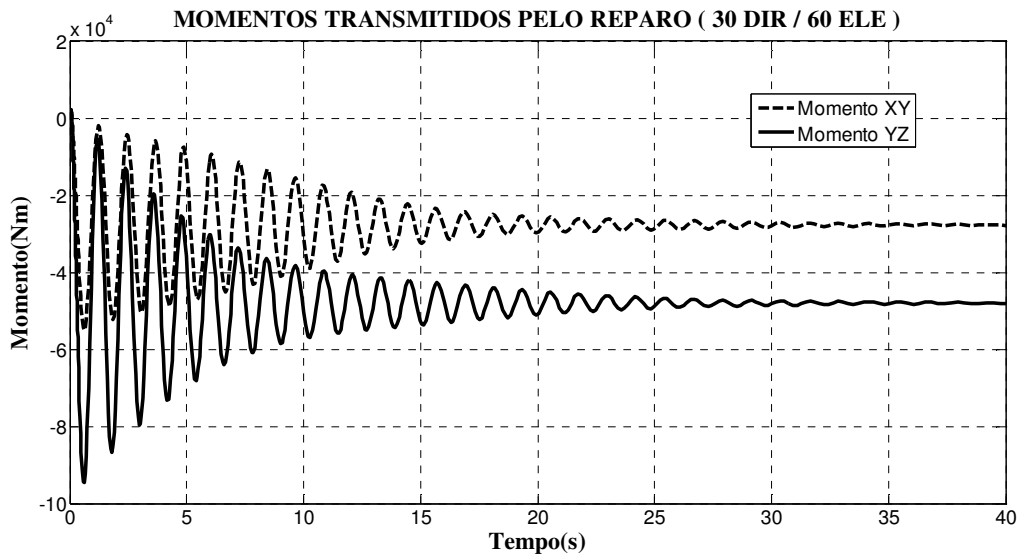


FIG.4.46 – Momentos transmitidos pelo Reparo

Após todas as simulações realizadas com os subsistemas “Reparo” e “Metralhadora” estando acoplados, pôde-se observar que os resultados obtidos pela simulação computacional retratam com fidelidade o comportamento dinâmico destes subsistemas, validando assim modelo computacional.

4.3.4. MODELAGEM E RESULTADOS DOS SUBSISTEMAS ACOPLADOS

A modularidade do grafo de ligação permitiu o acoplamento dos modelos mostrados na **FIG. 4.29**. A simulação é realizada de forma a retratar o comportamento de todos os subsistemas acoplados quando sujeitos aos esforços provenientes da metralhadora em diversas direções. A **FIG.4.47** apresenta o diagrama de blocos Simulink deste acoplamento.

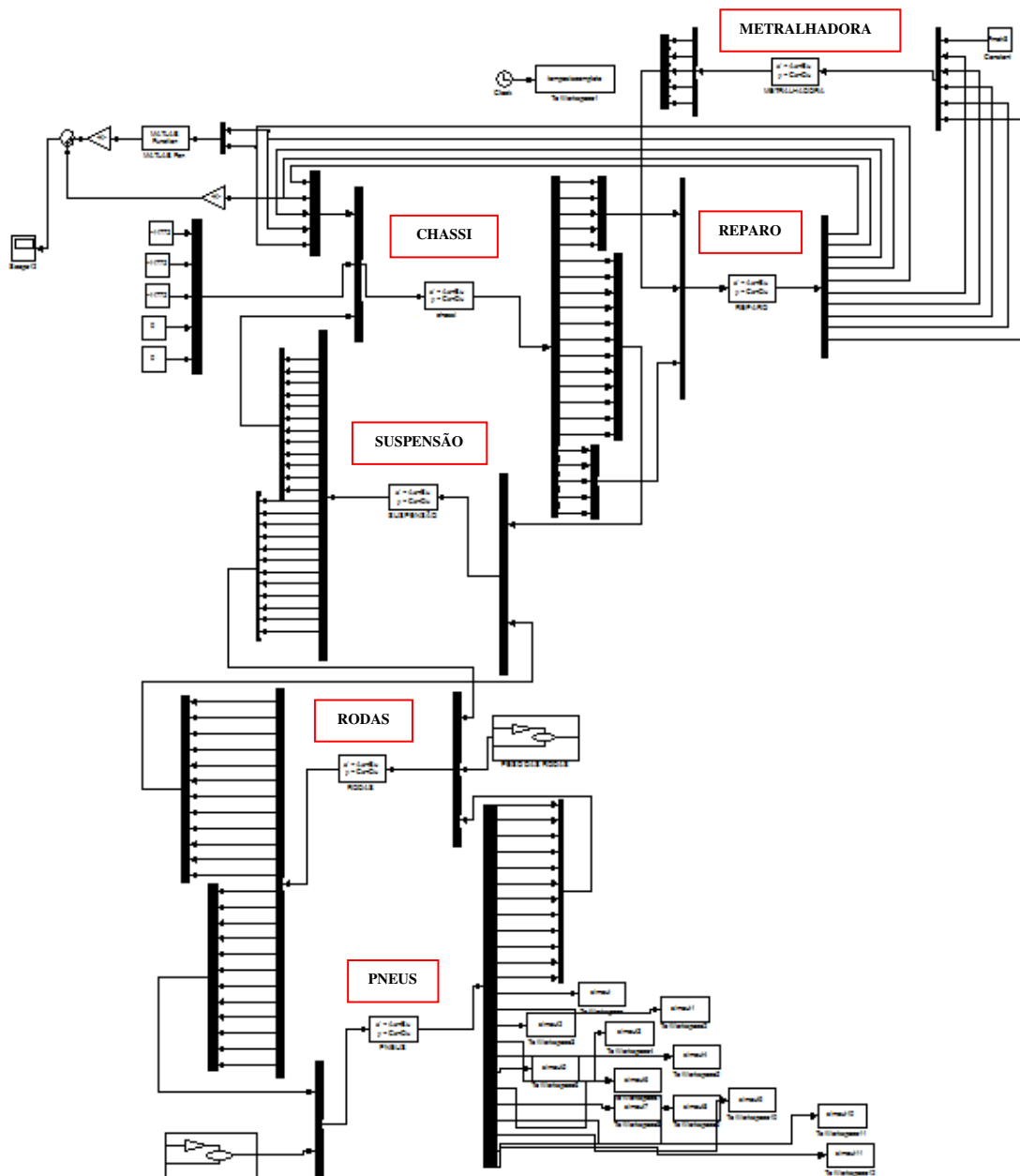


FIG.4.47 – Acoplamento dos subsistemas

As simulações são realizadas com a viatura parada sobre uma superfície horizontal, sujeita apenas aos pesos do chassi, das rodas e à força produzida pela metralhadora. Numa primeira análise, esta força é considerada constante e de valor igual ao obtido por meio da pressão máxima durante a realização do disparo. O objetivo desta análise é testar o modelo. Será obtido o valor da tensão transmitida pelo reparo para o chassi, bem como o valor das forças transmitidas pelos pneus de acordo com a direção e elevação da metralhadora,

conforme **FIG.4.42**. Numa segunda análise, a força gerada pela metralhadora é modelada por uma seqüência de pulsos retangulares que possuem a mesma amplitude da força utilizada na primeira análise, ainda com objetivo de testar o modelo, porém agora com uma função que representa uma sequência de repetições desta força, sugerindo uma rajada da metralhadora. Por fim, é feita uma simulação com uma função representativa da força real proveniente da metralhadora, obtida a partir de sua curva de pressão, cuja função polinomial que a define é apresentada a seguir. Para sua obtenção os diversos valores de pressão e seus respectivos tempos, obtidos pelo método Valier Heydenreich, são utilizados na ferramenta conhecida por “Polyfit” do MatLab, que determina quais os coeficientes deste polinômio.

$$P = 277t^5 - 4261t^4 + 12279t^3 - 13731t^2 + 6125t - 0.0000061$$

Esta curva é semelhante à curva de pressão obtida pelo método da balística cuja curva de pressão foi apresentada na **FIG.4.22**. A **FIG.4.48** apresenta as curvas geradas pela função polinomial acima mencionada e pelo método da balística, onde se pode observar a semelhança entre as duas.

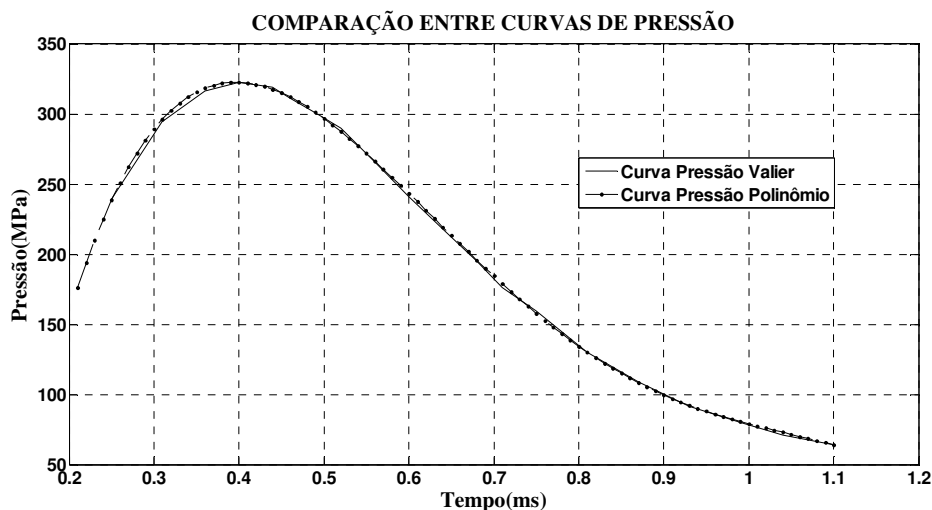


FIG.4.48 - Comparação entre as curvas de pressão.

A partir da curva de pressão gerada pelo polinômio é obtida a curva da força representativa de um disparo da metralhadora, que é apresentada na **FIG.4.49**.

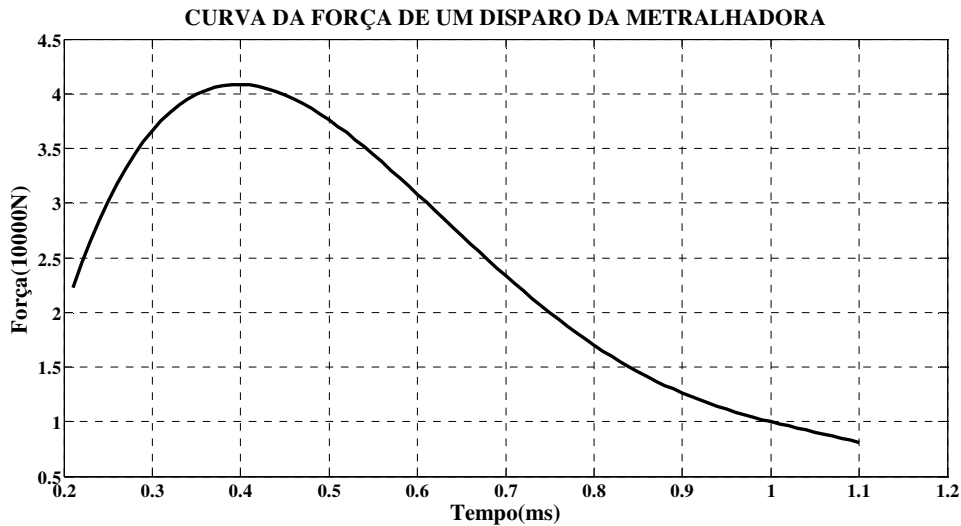


FIG.4.49 – Curva da força da metralhadora

Por esta curva é observado que a força do disparo assume diversos valores durante o tempo em que a munição permanece no interior do cano da metralhadora. Um dos requisitos de segurança de um suporte para metralhadoras é que este possa suportar a máxima força proveniente da metralhadora, porém no presente trabalho não é analisado qual material será selecionado para confecção do reparo. O objetivo é que sejam conhecidas as tensões por ele transmitidas para o chassi. A **FIG.4.50** apresenta um esquema representativo do engaste do reparo no chassi, onde são observados os cinco graus de liberdade do reparo neste local, que são u_1, u_2, u_3, u_4 e u_5 (a), relacionados aos respectivos componentes do esforço transmitido para o chassi, F_x, F_y, F_z, M_{xy} e M_{yz} (b), respectivamente, ou seja, três forças e dois momentos.

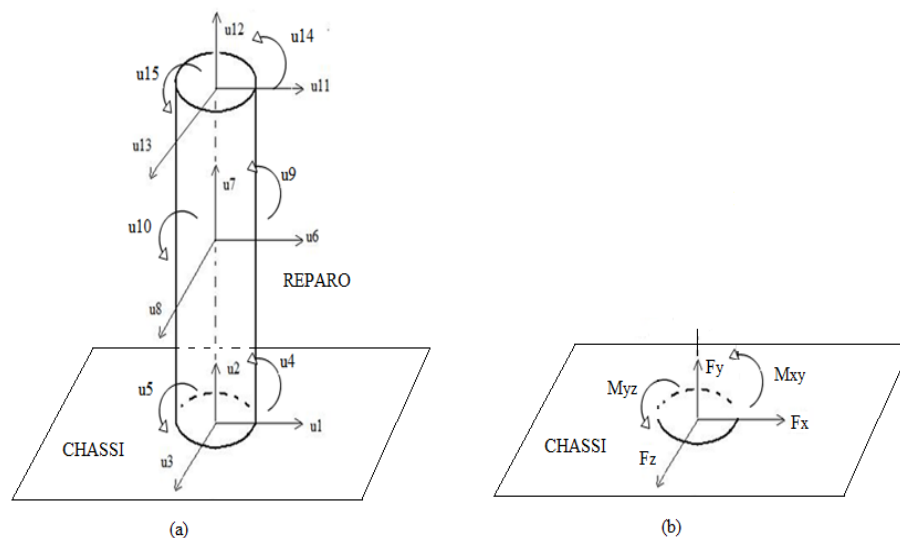


FIG.4.50 – Engaste do reparo ao chassi

De acordo com o esquema acima, as forças F_x e F_z produzem tensões de cisalhamento, enquanto a força F_y produz uma tensão normal. Os momentos M_{xy} e M_{yz} produzem tensões relacionadas aos efeitos de torção nos planos XY e YZ, respectivamente. Como as tensões de cisalhamento possuem valores desprezíveis, quando comparadas à tensão normal, estas não são consideradas no presente modelo. A tensão final na base do reparo é obtida pelo somatório da tensão normal e daquelas produzidas pelos momentos.

4.3.4.1. RESULTADOS PARA OS SUBSISTEMAS ACOPLADOS (FORÇA CONSTANTE)

Para este modelo é utilizada a força relacionada à pressão máxima de 322MPa, ocorrida durante o disparo, obtida por meio de sua curva de pressão, que corresponde a uma força de aproximadamente 40000N. A metralhadora está na posição cuja elevação e direção são nulas. A tensão na base do reparo para o chassi devido a esta força segue apresentada na **FIG.4.51**.

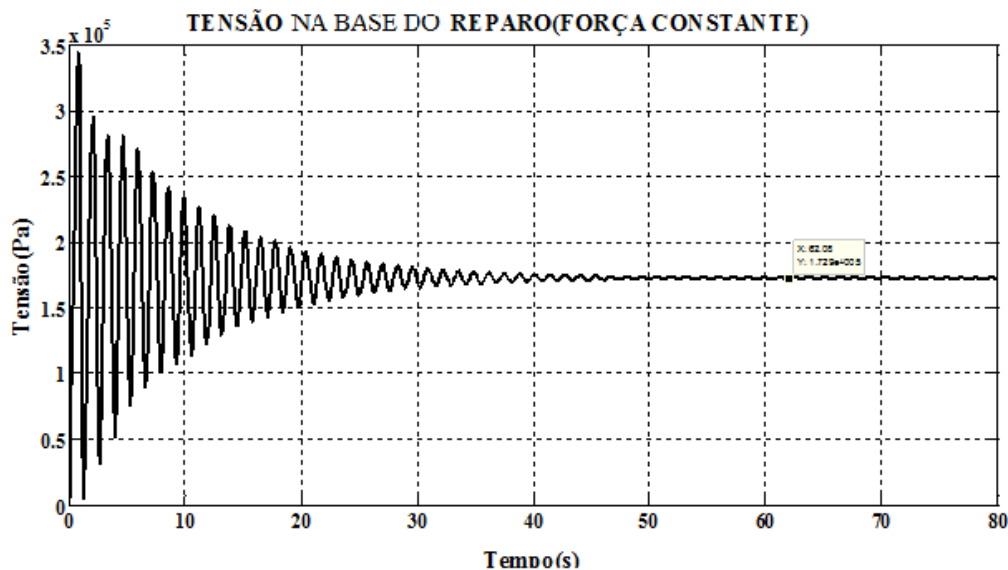


FIG.4.51 – Tensão resultante atuante na seção de ligação do reparo no chassi

A próxima simulação é realizada sem elevação e com direção de zero, 90 e 270 graus, de forma que o modelo corresponda a estas variações na direção da metralhadora. Os resultados das forças transmitidas pelos pneus dianteiros e traseiros para o solo são apresentados na **FIG.4.52**, **FIG.4.53** e **FIG.4.54**, respectivamente.

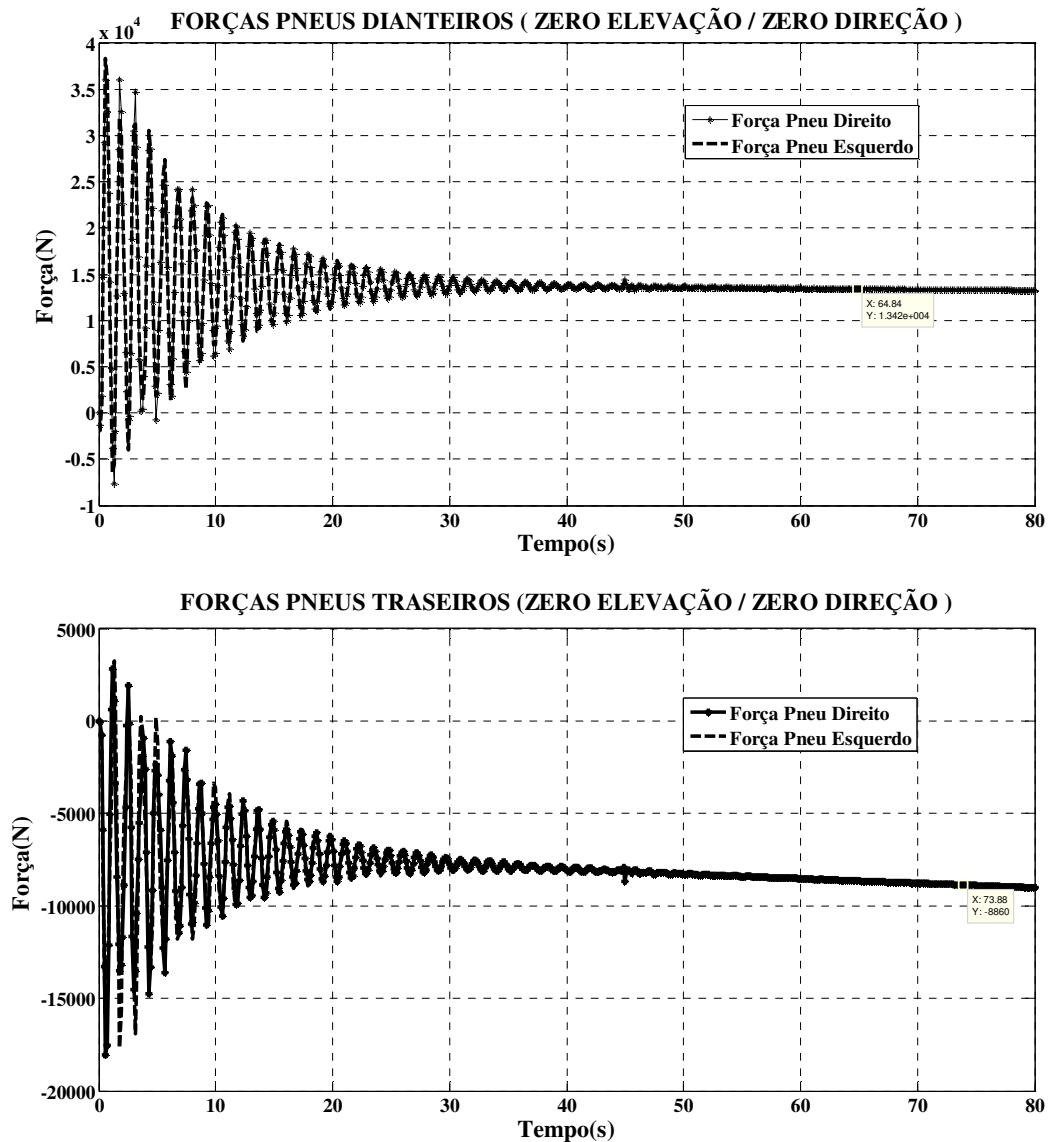


FIG.4.52 – Forças transmitidas pelos pneus (zero grau)

Com esta simulação, pode-se observar que os pneus direito e esquerdo dianteiros transmitem valores de força iguais e os traseiros se comportam da mesma forma, sendo este, justamente o comportamento esperado. Observando-se o sinal positivo das forças transmitidas pelos pneus dianteiros, conclui-se que estes perderiam o contato com o solo, porém estes valores foram obtidos somente para que o modelo fosse testado e que seu comportamento fosse coerente com a direção e elevação consideradas, o que de fato ocorreu.

A próxima simulação será realizada com 90 graus de direção. O comportamento esperado é que os pneus do lado direito da viatura transmitam forças com intensidades maiores que os pneus do lado esquerdo, justamente pelo fato da metralhadora estar totalmente com seu cano voltado para o lado esquerdo da viatura.

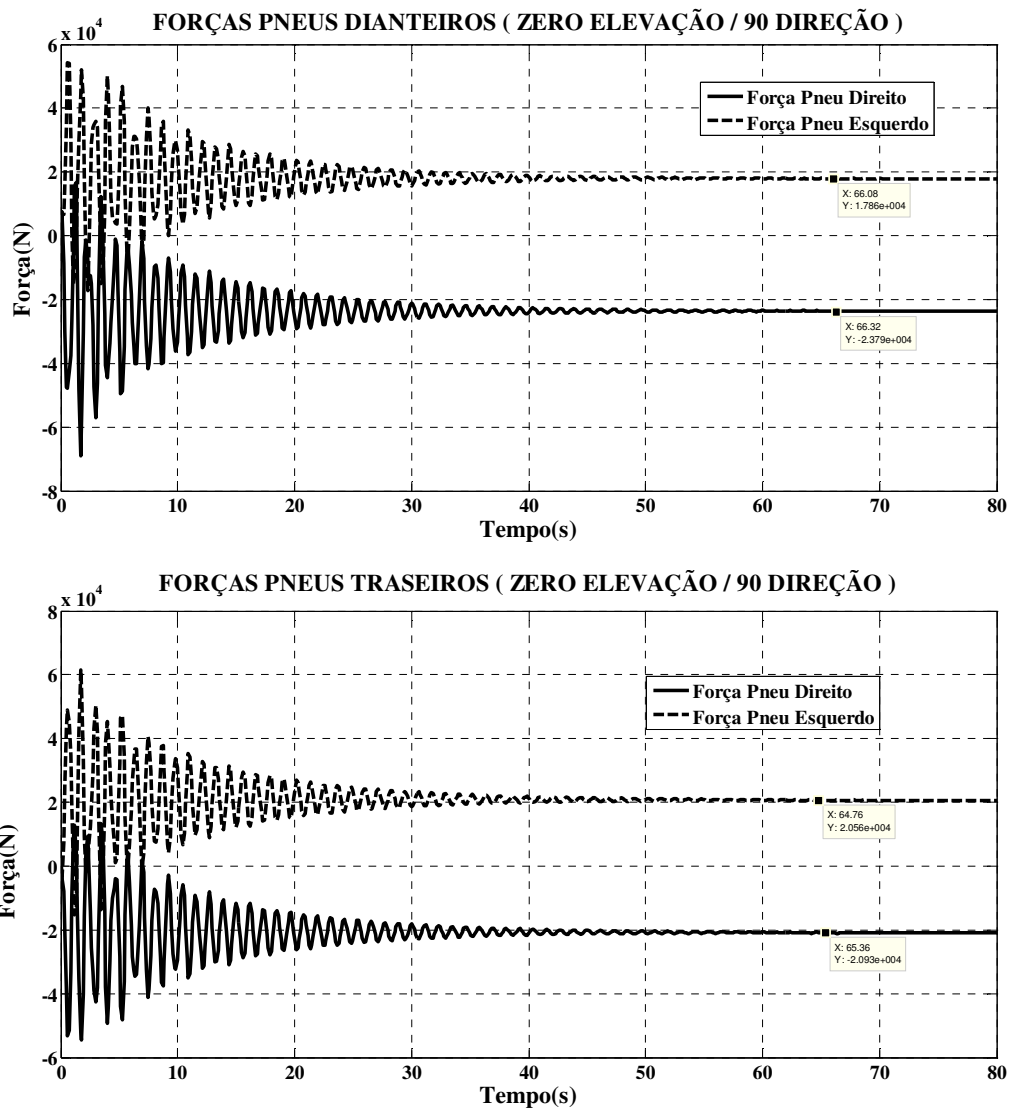


FIG.4.53 – Forças transmitidas pelos pneus (90 graus)

Com a mudança de direção de zero para 90 graus foi observado que a intensidade e o sentido das forças acompanharam esta mudança, com resultados que retratam exatamente o comportamento esperado do sistema, uma vez que, para direção de 90 graus, as forças transmitidas pelos pneus do lado direito assumiram valores maiores do que as transmitidas pelos pneus do lado esquerdo. Uma observação a ser feita é que, para esta direção, os pneus do lado esquerdo da viatura perderiam o contato com a superfície, uma vez que o sinal das forças transmitidas por estes teve o sinal alterado. Como na análise anterior, esta foi feita somente para teste do modelo.

A próxima análise a ser feita é com direção de 270 graus. Desta vez, espera-se que o sistema se comporte da forma oposta de como se comportou para direção de 90 graus, com os pneus do lado esquerdo transmitindo forças maiores do que os do lado direito.

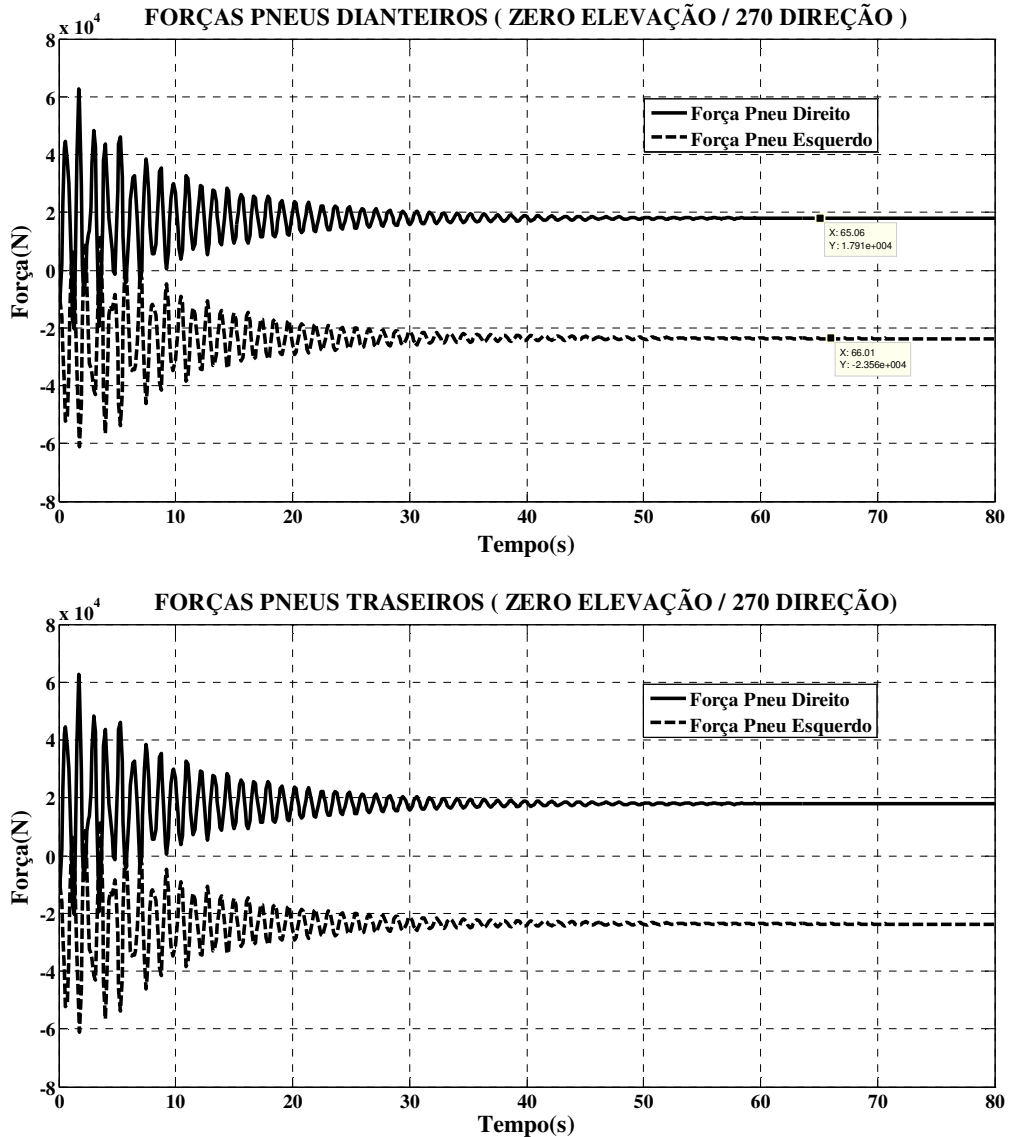


FIG.4.54 – Forças transmitidas pelos pneus (270 graus)

Devido à mudança na direção de 90 para 270 graus, pôde-se observar que a intensidade e sentido das forças acompanharam esta mudança, com resultados que retratam exatamente o comportamento esperado do sistema, visto que para direção de 270 graus, as forças transmitidas pelos pneus do lado esquerdo foram maiores do que as transmitidas do lado direito, ou seja, valores e sentidos opostos daqueles obtidas para 90 graus.

4.3.4.2. RESULTADOS PARA OS SUBSISTEMAS ACOPLADOS (FORÇA EM PULSO)

O objetivo desta simulação é testar o modelo, porém não mais com uma força constante e sim uma função periódica, de forma que seu comportamento dinâmico possa ser analisado, uma vez que as simulações anteriores analisavam o sistema somente quando este encontrava sua condição de equilíbrio. Como função periódica, é considerada uma seqüência de pulsos retangulares, pelo fato de ser uma função que se assemelha a uma seqüência de repetições da curva de força da metralhadora (rajada), obtida pelo método da balística anteriormente mencionado, conforme pode ser observado na **FIG.4.55**.

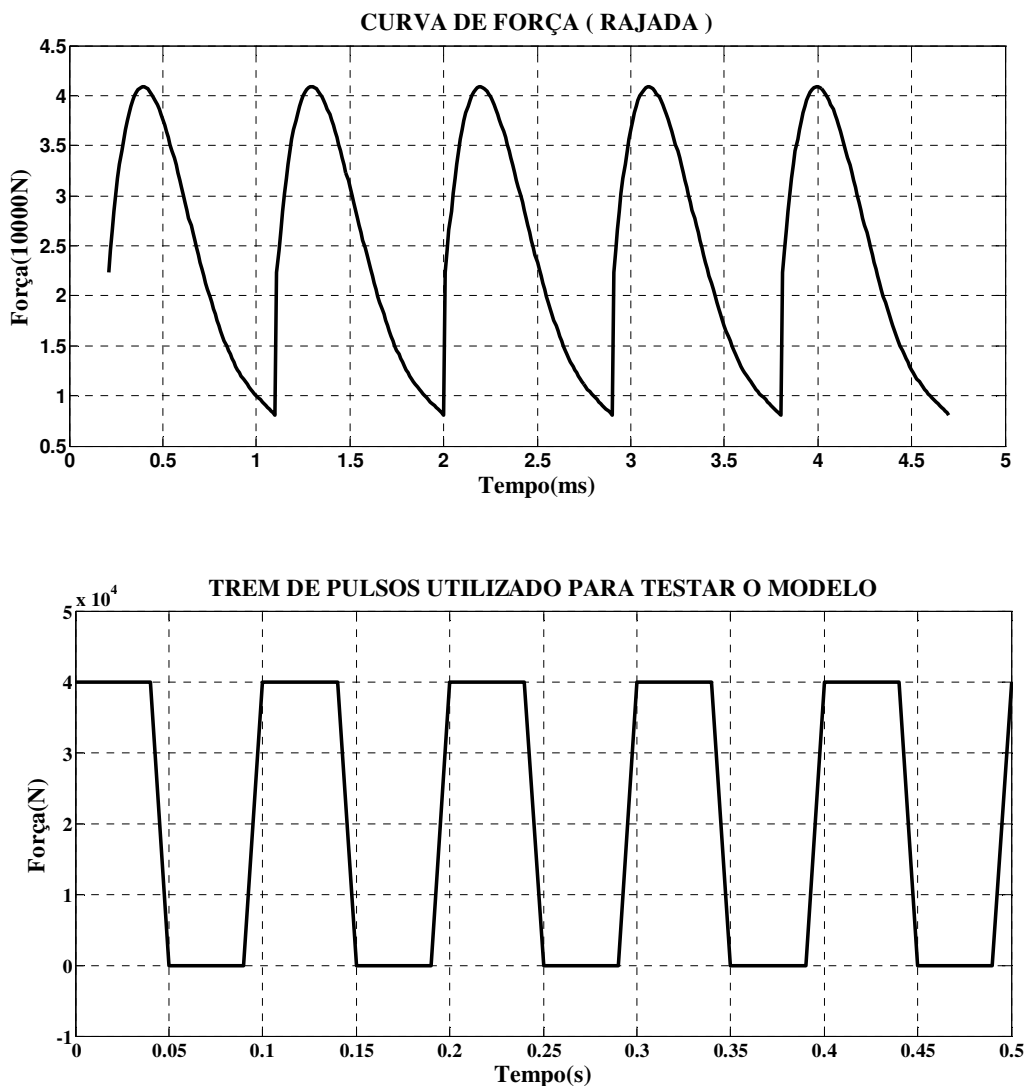


FIG.4.55 – Curva de forças e o sinal utilizado para testar o modelo

A amplitude de cada pulso tem o mesmo valor da força máxima transmitida durante o disparo, ou seja, aproximadamente 40000N. Cada pulso tem a duração de 0,1 segundos, enquanto que o período de duração da força da metralhadora é de 0,001 segundos. A simulação é realizada aplicando-se este sinal como entrada do sistema, com a metralhadora estando na posição cujos ângulos de elevação e direção sejam nulos. Como resultado desta simulação, é verificada a tensão transmitida pelo reparo para o chassi, bem como as forças transmitidas pelos pneus para o solo. Inicialmente, é apresentada a curva representativa da tensão na base do reparo para o chassi e uma ampliação desta para que se possam verificar com mais facilidade os valores obtidos, conforme apresentado na **FIG.4.56**.

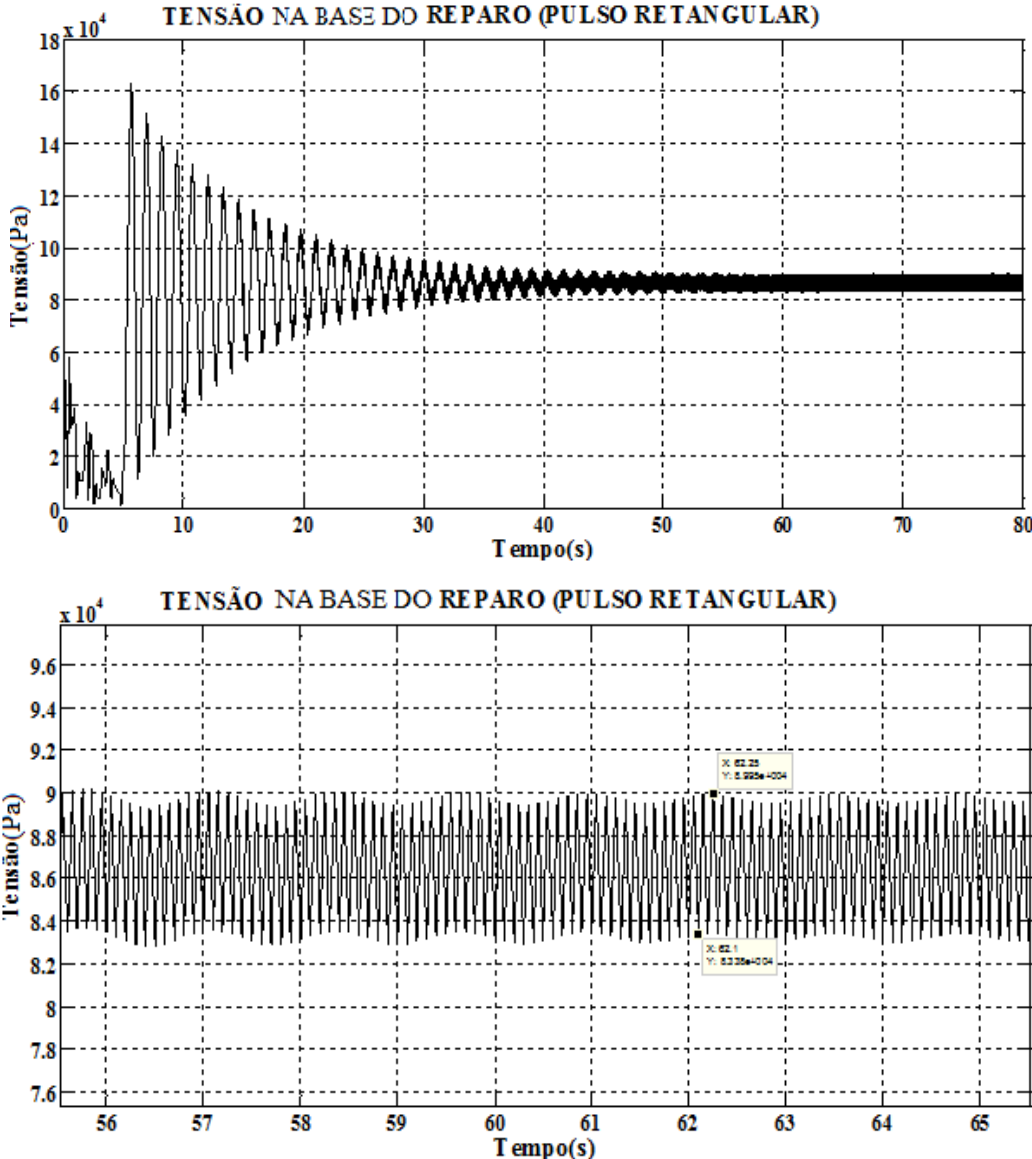


FIG.4.56 – Tensão na base do reparo e uma ampliação desta

Tendo sido obtidos os valores da tensão provocada pelo pulso retangular, será realizada uma comparação desta com aquela provocada pela força constante, conforme **FIG.4.57**. O objetivo desta comparação é verificar se o valor da tensão transmitida para o chassi foi reduzido, quando utilizada a força em forma de pulso.

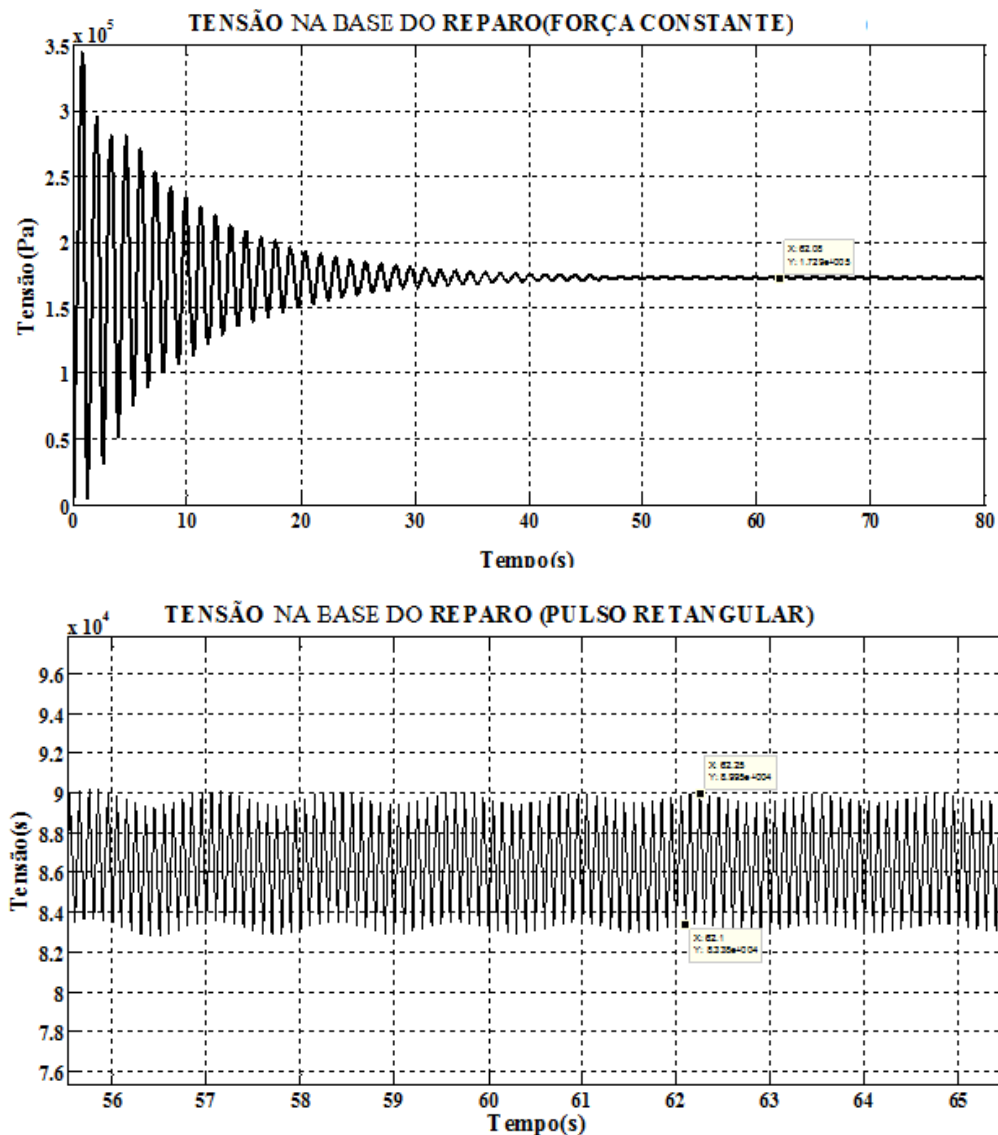


FIG.4.57 – Comparação entre as tensões na base do reparo

Realizando uma comparação entre as duas curvas, percebe-se que a força em forma de pulso, apesar de sua amplitude ser igual ao valor da força máxima transmitida, as tensões por elas geradas e transmitidas pelo reparo são de intensidades diferentes, sendo a gerada pela força como pulso, de menor intensidade. Pelo fato do período de duração do pulso, considerado nesta simulação, ser pequeno (0,1 segundo), a força transmitida pela

metralhadora não consegue alcançar o patamar da amplitude, retornando ao início do pulso. Percebe-se que o valor da tensão transmitida pela função pulso varia entre valores $8,3 \times 10^4$ Pa e $8,9 \times 10^4$ Pa, enquanto que o valor da tensão transmitida pela força constante, estando na condição de equilíbrio, é de $1,7 \times 10^5$ Pa, o que permite dizer que quanto menor for o período do pulso, menor será o valor da tensão transmitida pelo reparo para o chassi.

4.3.4.3. RESULTADOS PARA OS SUBSISTEMAS ACOPLADOS (FORÇA REAL)

Por meio da função polinomial que representa a pressão oriunda do disparo da metralhadora, apresentada novamente a seguir, pôde-se gerar a curva representativa de uma sequência de disparos da metralhadora (rajada), que é apresentada na **FIG.4.58**. Esta simulação será feita com a metralhadora na posição cuja elevação e direção são nulas, onde será observada a tensão transmitida pelo reparo para o chassi, cujo gráfico é apresentado na **FIG.4.59**. A função equação representativa da força é obtida a partir da multiplicação do polinômio abaixo, relativo à curva de pressão, pela área da câmara da metralhadora, onde esta pressão atuará diretamente. O comportamento esperado da tensão na base do Reparo é que ela se comporte com um valor alto no início da simulação e ao final, devido à alta frequência de tiro da metralhadora, este valor oscile em torno de uma grandeza bem menor. Apesar do polinômio abaixo ter sido obtido utilizando-se vários pontos da curva de pressão, este ainda precisa ser refinado, visto que os valores obtidos de pressão para os respectivos valores de tempo ainda precisam ser melhorados, porém o presente polinômio será utilizado para testar o sistema.

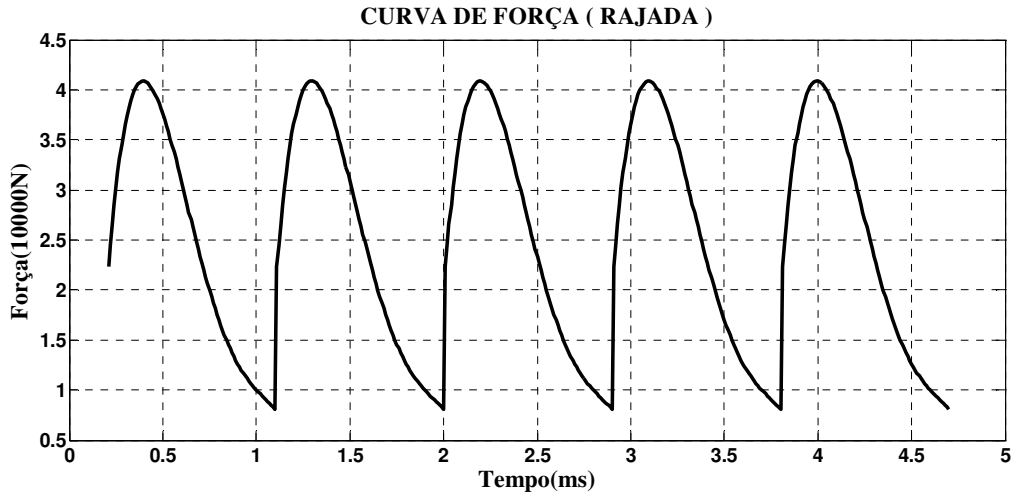


FIG.4.58 – Curva de uma rajada da metralhadora

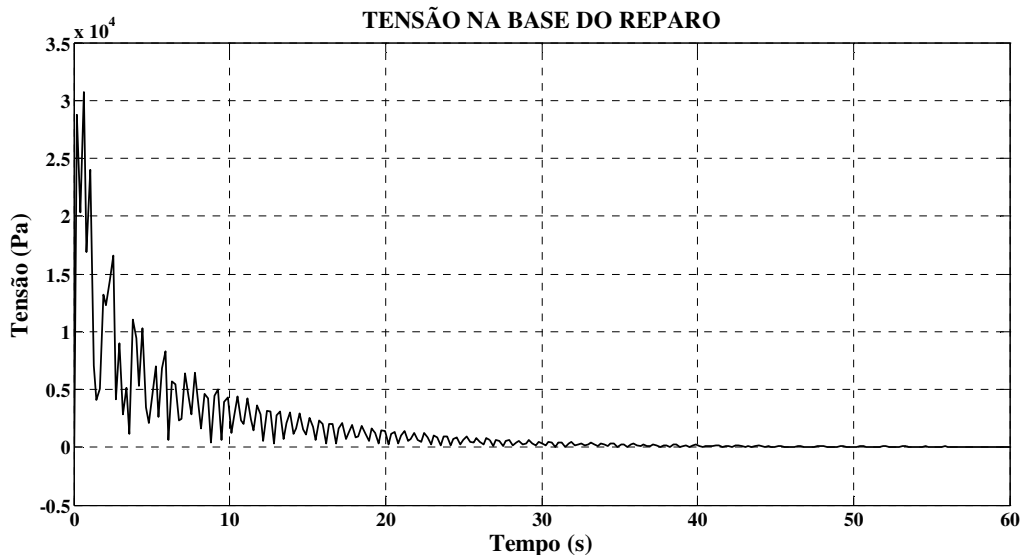


FIG.4.59 – Tensão produzida na base do Reparo

É possível observar na **FIG.4.59**, que na base do Reparo o valor da tensão no início da simulação alcança um valor elevado e ao final a tensão diminui para valores sensivelmente inferiores, exatamente como o esperado.

Para melhor visualizar o valor da tensão na base do Reparo quando o sistema alcança a condição de equilíbrio, é apresentado na **FIG.4.60** uma ampliação do gráfico desta tensão, onde pode se verificar que a esta passa a oscilar com amplitude máxima de 60 Pa.

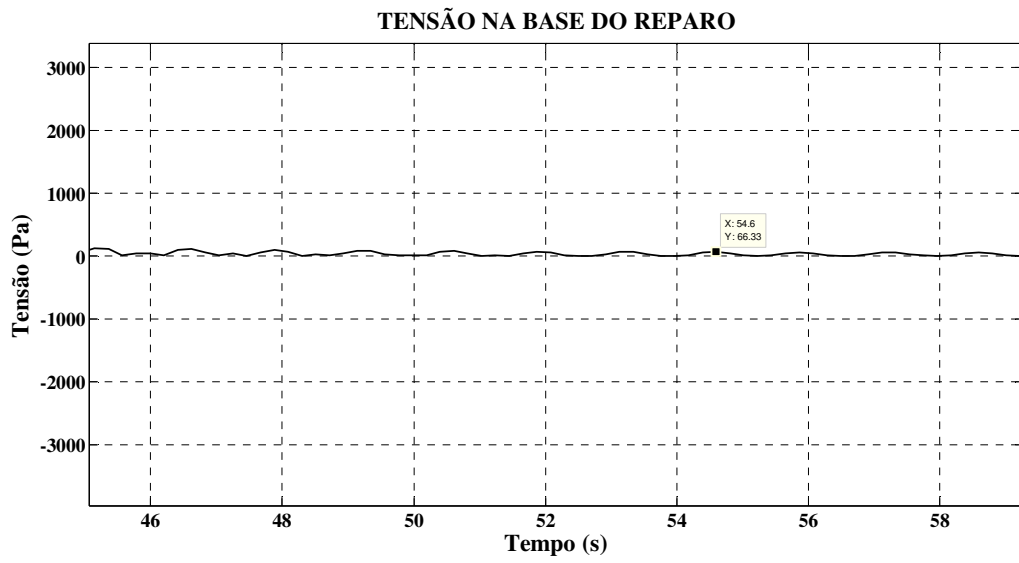


FIG.4.60 – Ampliação do gráfico da tensão na base do Reparo.

5. ASPECTOS CONSTRUTIVOS DO REPARO E SUA INSTALAÇÃO

Diante do fato de que o modelo computacional deste trabalho retrata o comportamento dinâmico de um sistema composto por uma viatura, um reparo e uma metralhadora calibre .50 (12,7mm), é possível mensurar valores de forças e momentos em vários pontos da viatura, particularmente as forças transmitidas pelos pneus para o solo. Outra medição importante para este modelo são as tensões no local de fixação do reparo, que são provocadas pelas forças e momentos gerados pelo disparo da metralhadora. A medição destas tensões tem como objetivo conhecer se neste ponto de fixação é possível ser instalado o reparo, ou caso negativo, ser criada outra forma de instalação de uma estrutura que suporte estas tensões.

Para este modelo foi utilizado um reparo tubular engastado ao chassi da viatura para que os valores acima mencionados pudessem ser mensurados de forma mais simples e rápida, porém a instalação deste tipo de reparo na posição utilizada na simulação não se torna muito prática por alguns aspectos. O primeiro deles é o valor das tensões, que neste local é muito elevado e o chassi provavelmente não suportaria. Outro fator é que o tanque da viatura Agrale Marruá fica sob o assoalho, ocupando praticamente toda área situada na parte de trás dos bancos dianteiros, onde foi posicionado o reparo para esta simulação, o que torna perigoso concentrar valores altos de tensões num único ponto, praticamente em cima do tanque de combustível.

Todas as simulações realizadas neste trabalho até agora foram feitas com a máxima força gerada pelo disparo da metralhadora, obtida conforme a curva de pressão apresentada na **FIG.4.22**. Desta forma todos os resultados obtidos trataram das condições mais extremas que esta viatura poderá suportar com a munição utilizada, visto que existem outros tipos de munição, como apresentado pela **TAB.1.3**, onde a CBC disponibiliza diversos tipos de munição deste calibre.

Este capítulo tem como objetivo sugerir maneiras de serem instalados tipos de reparo que podem ser utilizados, com esta metralhadora, sobre a viatura Agrale Marruá AM-1, de forma que as tensões transmitidas para o chassi, ocasionadas pela forças provenientes do disparo da metralhadora, possam ser suportadas. A **FIG.5.1** apresenta diversas viaturas que possuem características semelhantes à Agrale Marruá AM-1 utilizada neste trabalho, equipadas com diversos tipos de reparo para metralhadora calibre .50.



FIG.5.1 – Vários tipos de viatura com reparos para metralhadora cal.50

De todas as viaturas apresentadas na **FIG.5.1**, pode-se verificar que as metralhadoras são instaladas em reparos com duas configurações básicas, uma em estrutura de tubos com vários

pontos de fixação e outra com o reparo em forma de viga fixada num único ponto do chassi.

A **FIG.5.2** apresenta alguns modelos de reparo de metralhadora calibre .50 para utilização de viatura.



FIG.5.2 – Modelos de reparos

Em face dos tipos de viaturas e reparos observados e principalmente da viatura em questão suportar os esforços gerados pela metralhadora, são sugeridos dois tipos de reparo para instalação da metralhadora calibre .50 na viatura Agrale Marruá AM-1. O primeiro reparo sugerido é do tipo viga tubular maciça para ser fixada no chassi da viatura, conforme é apresentado na **FIG.5.3**. Este tipo de reparo é fixado por meio de parafusos em sua base e

possui um reforço de barras próximo à sua base, que também são aparafusadas à superfície do veículo.

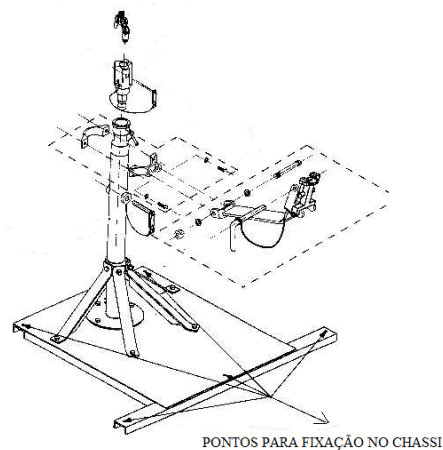


FIG.5.3 – Reparo em forma de viga

Este tipo de reparo é de fácil instalação e não necessita de grandes mudanças estruturais na viatura, sendo basicamente necessário instalar um reforço no assoalho para ser fixado e que seja retirada a estrutura tubular para segurança dos ocupantes, conhecida como “Santo Antônio”, de forma que o atirador possa movimentar livremente à metralhadora. Esta estrutura de reparo apresenta algumas desvantagens. A posição para instalação é praticamente no centro da viatura, fazendo com que o espaço interno da viatura se torne limitado, pelo fato do atirador necessitar de espaço para poder operar a metralhadora e girá-la por 360 graus. Outra desvantagem é o fato das tensões transmitidas pelo reparo para a viatura serem concentradas numa única posição. Outra desvantagem é a retirada da estrutura de proteção da viatura, deixando mais vulneráveis seus ocupantes em caso de acidentes, conforme é apresentado na **FIG. 5.4**, está instalado uma estrutura de reparo tipo viga numa viatura Agrale Marruá AM-1.



FIG. 5.4 – Estrutura do reparo como viga

O segundo tipo de reparo a ser sugerido é uma estrutura circular, como um trilho, onde a metralhadora pode ser fixada para percorrer 360 graus, conforme apresentado na **FIG.5.5**.

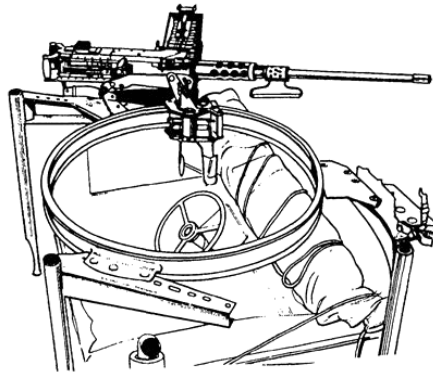


FIG.5.5 – Reparo como estrutura circular

Este tipo de reparo requer uma estrutura maior para ser fixado, que deverá ser fixada ao chassi da viatura em vários locais, de forma a distribuir as tensões provenientes da metralhadora em mais de um ponto. Este reparo requer mudanças mais significativas na viatura, como a retirada da estrutura de proteção da viatura e a instalação desta outra. A **FIG.5.6** apresenta duas viaturas Land Rover Defender, semelhantes às utilizadas pela Marinha do Brasil, com dois tipos de estruturas tubulares instaladas no chassi, cada uma equipada com um reparo circular, onde podem ser observadas suas estruturas para suporte deste tipo de reparo. A primeira apresenta uma estrutura fixada em vários pontos na parte traseira e somente com um ponto de fixação na parte frontal (a), enquanto a segunda é fixada em dois pontos na parte frontal da viatura (b).



(a)



(b)

FIG.5.6 – Viaturas Land Rover equipadas com reparo circular

A vantagem deste tipo de reparo é que ele distribui as tensões, provenientes do disparo da metralhadora, em vários pontos do chassi, evitando desta forma uma concentração de tensões

num único ponto. Ele permite uma melhor utilização do espaço interno da viatura para guarda e instalação de equipamentos, como para que o atirador aproveite melhor o espaço para o manuseio da metralhadora, além de proporcionar melhor estabilidade para a metralhadora do que o reparo tipo viga, em função de seus diversos pontos de fixação ao chassi da viatura. Sua desvantagem é a complexidade para montagem e instalação, pois requer mais pontos de apoio e requer uma modificação mais detalhada da viatura, como por exemplo a adaptação do “Santo Antônio” para o recebimento do Reparo. Em se tratando da Agrale Marruá, o modelo AM-1 utilizado neste trabalho, não é fabricada com reparo para metralhadora, porém o fabricante disponibiliza outro modelo, AM-11 REC, equipado com um reparo circular para suporte de metralhadoras. A **FIG.5.7** apresenta os modelos AM-1 (a) e AM-11 REC (b).



FIG. 5.7. Viaturas AM-1 e AM-11 REC

A sugestão para instalação deste tipo de reparo é que seja produzido um modelo para ser instalado na viatura AM-1, utilizada neste trabalho, já que esta possui dimensões e característica semelhantes às das viaturas Land Rover Defender apresentadas na **FIG.5.6**, que utilizam o reparo tipo circular. A instalação destes reparos implicaria em modificações no presente modelo, visto que haverá mais de um local de fixação no chassi, conforme uma geometria de instalação para cada caso. Para o reparo tipo viga, mencionado na **FIG.5.3**, o local de fixação ao chassi deverá ser reforçado e o reparo aparafusado a esta superfície. No caso do reparo tipo circular, haverá também vários pontos de fixação ao chassi. Estas geometrias de instalação implicarão em modificações nas equações do modelo de estado do chassi, uma vez que a relação entre o centro de gravidade do chassi e o local de fixação do reparo é definida por meio de um multitransformador (**TF2**), conforme as equações do modelo de estado chassi, apresentadas na seção 4.2.2. Como haverá vários pontos de fixação para cada tipo de reparo, este transformador que é uma matriz, será alterado de acordo com o número de pontos de fixação no chassi.

6. CONCLUSÕES

O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um procedimento de modelagem modular utilizando a Técnica dos Grafos de Ligação, por meio da utilização de diagramas de blocos, utilizando o programa MatLab/Simulink, para simulação e análise do comportamento dinâmico de um sistema constituído por uma viatura leve sobre a qual são instalados uma metralhadora calibre .50 (12.7mm) e seu suporte.

Para alcançar este objetivo, o capítulo quatro tratou da modelagem dos subsistemas no plano e em três dimensões. Optou-se pela modelagem via grafos multiligação, uma vez que tanto os grafos, quanto o equacionamento dos modelos de estado dos subsistemas seriam integralmente utilizados no modelo em três dimensões. Todas as simulações realizadas ao longo deste trabalho trataram exclusivamente da dinâmica vertical dos subsistemas separadamente e do acoplamento destes. Os efeitos oriundos da dinâmica lateral e longitudinal, devido às forças transmitidas pela metralhadora quando girada em torno do eixo vertical, foram analisados considerando-se os efeitos de rigidez e amortecimento dos pneus e suspensões naquelas direções.

Para modelagem do reparo foi adotado o procedimento desenvolvido por Da SILVA e SPERANZA NETO (1993), pelo qual o modelo dinâmico da estrutura, discretizado pelo Método dos Elementos Finitos, é integralmente aproveitado pela Técnica dos Grafos de Ligação, utilizando a generalização dos elementos dessa técnica para representar, através de campos, as relações constitutivas associadas aos elementos estruturais, facilitando o acoplamento desses elementos ao sistema.

A metralhadora foi modelada de forma que seus componentes principais envolvidos no seu funcionamento foram tratados num modelo simplificado Massa-Mola-Amortecedor. O valor da força proveniente do disparo foi obtido por meio da curva de pressão da metralhadora, definida pelo método balístico conhecido como VALLIER HEYDENREICH.

Os testes realizados com o sistema sujeito à ação da força constante da metralhadora foram coerentes com o comportamento esperado. Os resultados das forças transmitidas pelos pneus corresponderam às mudanças de direção e elevação da metralhadora. Em seguida foi realizada uma simulação onde a força da metralhadora foi considerada um pulso retangular,

por se assemelhar à curva de força da metralhadora. Nesta simulação foi observado que o valor da tensão transmitida pelo reparo para o chassi é menor do que aquela transmitida quando utilizada a força constante da metralhadora. Por último, foi realizada simulação final com a força real proveniente da metralhadora, obtida pelo método balístico já mencionado.

Graças à característica de modularidade tanto da técnica empregada na modelagem, quanto da ferramenta de simulação, os modelos podem ser sofisticados sem qualquer dificuldade adicional, de acordo com a profundidade desejada.

Todos os resultados apresentados durante este estudo foram obtidos por meio de simulações computacionais, utilizando parâmetros de trabalhos semelhantes. Seria extremamente desejável que se pudessem realizar, a partir de agora, comparações dos resultados obtidos pela simulação por meio de trabalhos experimentais, visando aferir, ajustar e refinar os modelos desenvolvidos, de forma que os resultados das simulações realizadas neste trabalho sejam validados.

A função matemática que retrata o disparo real da metralhadora ainda necessita ser submetida à análise numérica para que seus resultados possam ser mensurados de forma mais precisa. Pela técnica dos grafos de ligação os modelos poderão ser sofisticados sem qualquer dificuldade adicional, de acordo com a profundidade desejada.

Sugere-se que o trabalho tenha prosseguimento, visto que abrange várias áreas da mecânica, como também da balística. Por exemplo, é possível realizar a análise de frequência do sistema, verificando possibilidade de haver ressonância, como também podem ser obtidos seus modos de vibração com a metralhadora atirando ou não. Podem ser realizadas simulações com a viatura trafegando em vários tipos de terreno, com a metralhadora atirando.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMCP 706-260, United States Army, 1970, EUA.

ASSANIS, D., FILIPI, Z., GRAVANTE, S., GROHNKE, D., GUI, X., LOUCA, L. RIDEOUT, G. STEIN, J. e WANG, Y. **Validation and Use of SIMULINK Integrated, High Fidelity, Engine-In-Vehicle Simulation of the International Class VI Truck**, SAE 2000 World Congress Detroit, Michigan, 2000.

ANDRADE, B. L. B., **Análise das interações Dinâmicas entre Sistemas Mecânicos Lineares Contínuos e Discretos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Instituto Militar de Engenharia, 1995.

BANERJEE, N., SAHA, A.K., KARMAKAR, R., BHATTACHARYYA, R., **Bond graph modeling of a railway truck on curved track**, Department of Mechanical Engineering, National Institute Technology, West Bengal, Índia, 2008.

BEER, F. P., JOHNSTON, J. e E. Russel. **Resistência dos Materiais**. 3. ed. Makron Books, 1995. 1255 p. ISBN 85-34603-44-8.

BREEDVELD, P.C, **Multibond graph elements in physical systems**. Journal of the Franklin Institute, 319 (1-2). Pp 1-36. ISSN 0016-0032.

BROWN, J.C, ROBERTSON, A.J, SERPENTO, S.T, **Motor Vehicle Structures**, Society of Automotive Engineers, Warrendale, EUA, 2002.

CALDAS, A.C.I.L., **Validação de um Sistema de Aquisição de dados para Reconstrução de Traçados de Veículos Terrestres**, Dissertação (Mestrado em Metrologia) - Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2008

CARLUCCI, E. D. e JACOBSON, S.S, **Ballistics Theory and Design of Guns and Ammunition**, 2007, EUA.

COMPANHIA BRASILEIRA DE CARTUCHOS, **Munições para Fuzis e Metralhadoras**, Calibre.50 Browning (12,7x99mm). Disponível: http://www.cbc.com.br/municoes/muni_fuzimetra/index.php?acao3_cod0=6f4f08300ee639dd2ea39c562a1659ab [capturado em 05 de março de 2010]

- COSTA NETO, R. T., **Modelagem e Integração dos Mecanismos de Suspensão e Direção de Veículos Terrestres Através do Fluxo de Potência**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2008.
- DA SILVA, F.R. e FERREIRA, F.G., **Proposta de uma Metodologia Modular para a Modelagem e Simulação de Sistemas Mecânicos apresentada no 16º POSMEC** (Simpósio de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica), Uberlândia, 2006.
- DA SILVA, F. R., SPERANZA NETO, M., **Metodologia de Construção do Grafo de Ligação para Sistemas Estruturais**, XII COBEM, v. I, Brasília, Brasil, p. 57-60, 1993.
- Da SILVA, F. R. **Procedimentos para a Análise Estrutural Dinâmica Através da Técnica Generalizada dos Grafos de Ligação**. Tese (Doutorado em Ciências) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, 1994.
- FERREIRA, F. M., Da SILVA, F. R., **Computational Block-diagram Execution of Multiport Fields Models with Causal Considerations**. In: 18th COBEM, Ouro Preto, Brasil, 2005.
- FILIPPINI, G., NIGRO, N. e JUNCO, S. **Vehicle Dynamics Simulation Using Bond Graphs**, Universidad Nacional de Rosario, Argentina, 2006.
- FERREIRA, F. M., **Modelagem de sistemas mecânicos utilizando procedimentos modulares**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2006.
- FIGUEIREDO, E. S. **Análise e redução de vibrações em pontes rodoviárias** (Mestrado em Engenharia Mecânica), UFRJ, Rio de Janeiro, 2007.
- FILHO, G. L. T, MARTINS, A, e LAURENT, R, **O Uso da Técnica dos Grafos de Ligação na Simulação de Sistemas Hidráulicos em Regime Transitório**, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2002.
- GAWTHROP, P. J e BEVAN, G. P., **A Tutorial Introduction for Control Engineers**, IEEE Control Systems Magazine, 2007.
- GILLESPIE, D. T., **Fundamentals of vehicle dynamics**, SAE, EUA, 1992.
- LEITE, I. C., **Análise Dinâmica de Veículos com Estrutura Flexível através de Técnicas Modulares de Modelagem**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2007.

LOUCA, L.S., STEIN, J.L e RIDEOUT, D.G, **Generating Proper Integrated Dynamic Models for Vehicle Mobility Using Bond Graph Formulation**. University of Michigan, 2000.

KARNOPP, Dn. C., ROSENBERG. R C., MARGOLIS, Donald L. **System Dynamics: a Unified Approach**. New York: John Wiley & Sons, 1990.

KNOB, M. J. **Estudo de Trafegabilidade Aplicado a Veículos de Roda em Transporte e Tração**. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul, 2010.

MABIE, H. H, e REINHOLTZ, C. F., **Mechanisms and Dynamics of Machinery**, Virginia Polytechnic Institute and State University, EUA, 1987.

Manual Viatura Agrale Marruá, Caxias Do Sul, 2008.

Manual do Curso de Mecânico de Armamento do Corpo de Fuzileiros Navais, Centro de Instrução Almirante Sylvio de Camargo, Rio de Janeiro, 2007.

MERA, J.M., VERA, C., ESPERILLA. J.J., **Influence of the Roll Axis in Vehicle Dynamics. Bond Graph Models**, Universidad Politécnica de Madri, Espanha.

PUGLIESI, M. **MANUAL COMPLETO DO AUTOMÓVEL**, Livraria Editora Ltda, São Paulo, 1976.

REIMPELL, J. Stoll, H., **The Automotive Chassis: Engineering Principles**, Reed Elsevier and Professional Publishing Ltd, Londres, 2001.

RILL.G., **Vehicle Modeling by Subsystems**, University of Applied Sciences Galgenbergstr, Germany, 2006.

SANTOS, E.F. **Análise e Redução de Vibrações em Pontes Rodoviárias**. Tese – (Doutorado em Ciências em Engenharia civil), UFRJ, Rio de Janeiro, 2007.

SOUZA, E. M., **Interação Dinâmica Veículo-Estrutura em Pequenas Pontes Rodoviárias**. Dissertação - (Mestrado em Ciências em Engenharia civil), UFRJ, Rio de Janeiro, 2007.

VILELA, D., **Aplicação de Métodos Numéricos de Otimização ao Problema Conjunto de Dirigibilidade e Conforto Veicular**. Tese – (Doutorado em Engenharia Mecânica), USP, São Paulo, 2010.

VALIER HEYDENREICH, Disponível: <http://www.earmi.it/balistica/balinter.htm> [capturado em 02 de fevereiro de 2011].

WONG, J. Y, **Theory of Ground Vehicles**, Wiley-Interscience, Third Edition, Nova York, EUA, 2001.

8. APÊNDICE

8.1. GRAFOS DE LIGAÇÃO (BOND GRAPHS)

Como o presente trabalho utilizará a técnica dos Grafos de Ligação se torna importante que seus principais conceitos sejam objeto de comentário.

8.2. ORIGEM DOS GRAFOS DE LIGAÇÃO

Conforme mencionado por FILHO, MARTINS e LAURENT, 2002, os Grafos de Ligação foram criados em 1959 pelo professor Henry Paynter do Departamento de Engenharia Mecânica do Instituto de Tecnologia de Massachusetts (MIT), USA. Desde a sua criação, centenas de artigos e livros foram publicados por Henry Paynter e outros nos Estados Unidos e no resto do mundo. Alguns deles se referem às técnicas e teorias matemáticas dos Grafos de Ligação, outros à aplicação do método em diferentes campos, e ainda alguns ao desenvolvimento de programas de computador usando este método. O professor Henry Paynter após ter usado intensivamente a técnica dos diagramas de blocos em problemas de servocontroles e de simulação, sentiu a necessidade da existência de métodos de abordagens generalizados e sistemáticos, que além de operacionalizar as modelagens matemáticas de sistemas complexos, atendessem as necessidades específicas das várias áreas da engenharia e que permitisse equacionar a interação de sistemas de natureza física distinta, tais como elétrica, mecânica, hidráulica, pneumática e térmica ou combinações dessas ou outras.

O esforço de Paynter no desenvolvimento da teoria geral de engenharia de sistemas começou em 1950, com a esperança de que a energia e a potência fossem as variáveis dinâmicas fundamentais, que permitissem todas as interações físicas. Uma das razões da criação da técnica dos Grafos de Ligação, de acordo a Paynter foi para generalizar o conceito de diagrama de circuito elétrico, como também para eliminar algumas de suas limitações. Seu treinamento e experiência em sistemas hidroelétricos de potência fizeram surgir certas idéias e mais particularmente uma conscientização das fortes analogias existentes entre: Transmissão: condutos de fluido e linhas elétricas, Transdução: turbinas e geradores, Controle: reguladores de velocidade e de tensão. Quando estes dispositivos análogos foram reduzidos a equações com a de simulação de computadores as diferenças se tornaram completamente indistintas. Enquanto Paynter trabalhava neste projeto foi influenciado por muitas pessoas e teorias até que surgiu no dia 24 de abril de 1959 a técnica dos Grafos de Ligação como uma disciplina

formal. Esta técnica foi amplamente difundida na década de 1960 por Dean Karnopp e Ronald Rosenberg, professores nas universidades da Califórnia e de Michigan, respectivamente.

8.3. SISTEMAS, SUBSISTEMAS E COMPONENTES

Segundo KARNOPP, ROSENBERG e MARGOLIS, 1990, para modelar um sistema é necessário quebrá-lo em partes menores que podem ser modeladas, talvez estudadas experimentalmente e em seguida montar um modelo do sistema a partir das partes. Muitas vezes, a quebra do sistema é convenientemente realizada em várias fases. Os componentes principais do sistema são chamados subsistemas e as partes primitivas do subsistema são denominados componentes. É claro, a hierarquia de componentes subsistema, e o sistema nunca poderia ser absoluta, pois até mesmo a parte mais primitiva de um sistema pode ser modelada com tantos detalhes que seria um subsistema complexo. Basicamente, um subsistema é uma parte de um sistema que será modelado como um sistema em si, isto é, o subsistema será dividido em partes que interagem entre si. Um componente, por outro lado, é modelado como uma entidade e não é entendido como sendo composto de partes mais simples. é preciso saber como o componente interage com outros componentes e é preciso ter uma caracterização do componente, mas de outra forma, é tratado como uma “Caixa Preta”, sem qualquer necessidade de saber o que lhe fez agir de determinada forma. Como exemplo é apresentado na **FIG.3.1** uma típica válvula servo. Claramente, a válvula é composta de uma variedade de componentes elétricos, mecânicos e hidráulicos que trabalham em conjunto para produzir a resposta dinâmica da válvula. Para este subsistema os componentes podem ser o motor de torque, as molas mecânicas, os amplificadores hidráulicos e a válvula carretel. Uma análise dinâmica do subsistema pode revelar a fraqueza na concepção do subsistema, que pode exigir a substituição do outro subsistema ou uma reconfiguração do sistema global. Por outro lado, uma análise pode indicar que, do ponto de vista do sistema global, os subsistemas podem ser caracterizados como simples componentes.

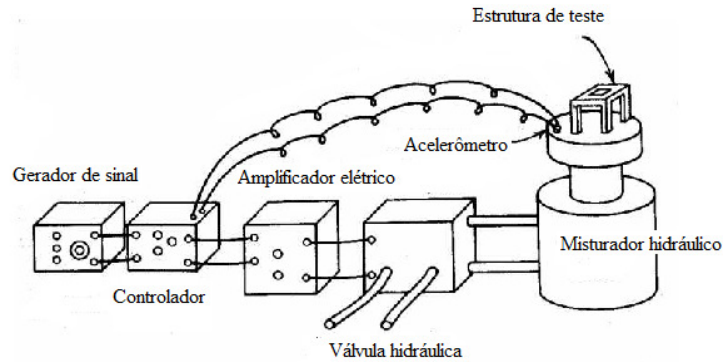


FIG.8.1-Esquema de válvula servo

8.4. TÉCNICA DOS GRAFOS DE LIGAÇÃO

A técnica dos Grafos de Ligação possui nove elementos básicos que são as fonte de esforço “Se”, fontes de fluxo “Sf”, os resistores “R”, os capacitores “C”, as inércias “I”, os transformadores “TF”, os giradores “GY” e as junções "O" e "1", que representam respectivamente os geradores de potência, os dissipadores, os acumuladores de energia e os elementos de acoplamento. Esses elementos combinados convenientemente descrevem o modelo físico de um sistema através de uma representação gráfica usando simbologia própria, que além de permitir a visualização das conexões entre vários elementos componentes do sistema, traz implícito todo o equacionamento do modelo. Um modelo de Grafos de Ligação está formado por componentes ou subsistemas conectados por ligações (*bonds*) que representam o fluxo de potência entre eles, ou seja, é nestas ligações que ocorre a transmissão de potência. São utilizadas nesta metodologia quatro variáveis generalizadas:

- Variável de potência: esforço (e) e fluxo (f).
- Variável de energia (Integral): quantidade de movimento (p) e de deslocamento (q).

As variáveis de esforço $e(t)$ e de fluxo (f) são chamadas variáveis de potência porque o produto dessas duas variáveis consideradas como funções do tempo é igual à potência instantânea que flui entre os dois componentes conectados pela ligação conforme indicado na equação 1.

$$Pot(t) = e(t).f(t) \quad (1)$$

O elemento fundamental desta técnica é o de ligação, representado por uma meia seta onde são indicadas as variáveis de energia ou de estado devidamente indexadas. Através da

meia seta, conforme se mostra na **FIG.8.2**, a ligação permite indicar o sentido da potência que flui de um elemento para outro.

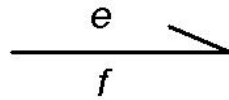


FIG.8.2. Representação de uma ligação

A potência será positiva se, "e" e "f" forem positivos. Será negativa se uma das ditas variáveis for negativa. Através de uma barra causal é mostrada a relação necessária entre a causa e efeito, ou seja, a entrada e saída da troca de energia entre dois elementos. Essa causalidade é indicada através de uma barra vertical inserida em uma das extremidades da ligação, de forma a indicar o sentido do esforço "e". Em sentido contrário fica subentendido o fluxo "f". Na **FIG. 8.3** são apresentados os dois tipos causalidade numa ligação.

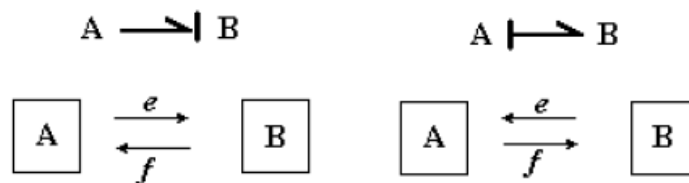


FIG.8.3- Causalidades numa ligação

Cabe ressaltar que a causalidade e o sentido da potência em uma ligação independem um do outro, ou seja, a causalidade indica a relação de causa e efeito entre as variáveis de potência, definindo qual variável é entrada e qual é saída na ligação, enquanto que a meia seta indica em qual sentido a potência é positiva, ou seja, o sentido em que ambas as variáveis de potência são positivas ou ambas negativas, conforme definição de referenciais previamente estabelecidos, normalmente tendo como base as variáveis de fluxo.

Como a Técnica dos Grafos de Ligação permite uma modelagem abordando sistemas com domínios físicos distintos e que interajam entre si, a **TAB 3.1** apresenta as variáveis de potência e energia em seus domínios. Observa-se que nem todos os sistemas físicos admitem a existência destas quatro variáveis, ou mesmo a definição de potência como o produto de esforço e fluxo.

TAB 8.1- Domínio Físico e Variáveis de Potência e de Energia.

DOMINIO FÍSICO	Esforço (e)	Fluxo (f)	Quantidade de movimento (p)	Deslocamento (q)
MECÂNICO DE TRANSLAÇÃO	Força [N]	Velocidade [m/s]	Quantidade de Movimento [N.s]	Posição [m]
MECÂNICO DE ROTAÇÃO	Toque [N.m]	Velocidade Angular [rad/s]	Quant. de Movimento [N.m.s]	Ângulo [rad]
ELÉTRICO	Voltagem [V]	Corrente [A]	Enlace de Fluxo [V.s]	Carga [C]
HIDRÁULICO	Pressão [Pa]	Vazão Volumétrica [m ³ /s]	Quant. de Mov. de Pressão [Pa/s]	Volume [m ³]
TERMODINÂMICO	Temperatura [K]	Fluxo de Entropia [W/K]	_____	Entropia [J/K]
MAGNÉTICO	Força Magnetomotiva [A]	Derivada de Campo [Wb/s]	_____	Densidade do Campo [Wb]
DIFUSÃO	Potencial Químico [J/mole]	Fluxo Molar [mole/s]	_____	Quantidade [mole]
REAÇÃO QUÍMICA	Afinidade [J/mole]	Taxa de Reação [mole/s]	_____	Avanço [mole]

A **TAB.8.2** apresenta um resumo dos elementos, equações constitutivas e atribuição de causalidade.

TAB. 8.2- Representação e equações dos elementos

Fonte de esforço	Se \longrightarrow	$e(t) = E(t)$
Fonte de fluxo	Sf \longrightarrow	$f(t) = F(t)$
Resistor	R \longleftarrow R \longleftarrow	$e = \phi_R(f)$ $f = \phi_R^{-1}(e)$
Capacitor	C \longleftarrow C \longleftarrow	$e = \phi_C^{-1}(\int f dt)$ $f = \frac{d}{dt} \phi_C(e)$
Inércia	I \longleftarrow I \longleftarrow	$f = \phi_I^{-1}(\int e dt)$ $e = \frac{d}{dt} \phi_I(f)$
Transformador	$\xrightarrow{1} \begin{matrix} :m \\ \text{TF} \end{matrix} \xrightarrow{2}$ $\xrightarrow{1} \begin{matrix} :1/m \\ \text{TF} \end{matrix} \xrightarrow{2}$	$e_1 = m e_2$ $f_2 = m f_1$ $e_2 = e_1/m$ $f_1 = f_2/m$
Girador	$\xrightarrow{1} \begin{matrix} :r \\ \text{GY} \end{matrix} \xrightarrow{2}$ $\xrightarrow{1} \begin{matrix} :1/r \\ \text{GY} \end{matrix} \xrightarrow{2}$	$f_2 = r e_1$ $f_1 = r e_2$ $e_2 = f_1/r$ $e_1 = f_2/r$
Junção 0	$\xrightarrow{1} \begin{matrix} 0 \\ \uparrow \\ 3 \end{matrix} \xleftarrow{2}$	$e_2 = e_1$ $e_3 = e_1$ $f_1 + f_2 + f_3 = 0$
Junção 1	$\xrightarrow{1} \begin{matrix} 1 \\ \uparrow \\ 3 \end{matrix} \xleftarrow{2}$	$f_2 = f_1$ $f_3 = f_1$ $e_1 + e_2 + e_3 = 0$

8.5. GRAFOS MULTILIGAÇÃO

A técnica dos Grafos de Ligação foi desenvolvida para representar modelos de parâmetros considerados escalares, relacionando apenas uma variável de entrada com uma de saída, caracterizando os elementos de uma porta. Entretanto, existem inúmeros problemas de engenharia onde não se pode adotar a hipótese de parâmetros escalares para se representar certo fenômeno. Neste caso, as propriedades dinâmicas relacionam mais de uma variável de entrada com outras tantas de saída, caracterizando, para modelos lineares, uma relação constitutiva matricial, representada por elementos de mais de uma porta, ou multiportas. Além disso, é sempre possível descrever um modelo desenvolvido com base em elementos de parâmetros concentrados em uma forma vetorial, pela simples organização das equações

constitutivas na forma matricial. Assim, de modo a representar em grafos de ligação esses casos (lineares) caracterizados por relações matriciais, aumentando a sua potencialidade e versatilidade, foi criada uma extensão dos elementos básicos da técnica, onde existe mais de uma ligação na entrada e na saída dos elementos. Estes elementos são os campos armazenadores e dissipadores, as junções vetoriais, os multitransformadores e multigiradores e a estrutura de junção, que na verdade é a união dos elementos de junção e de acoplamento. A **FIG. 8.4** compara os elementos básicos de uma porta com os multiportas e introduz a notação multiligação.

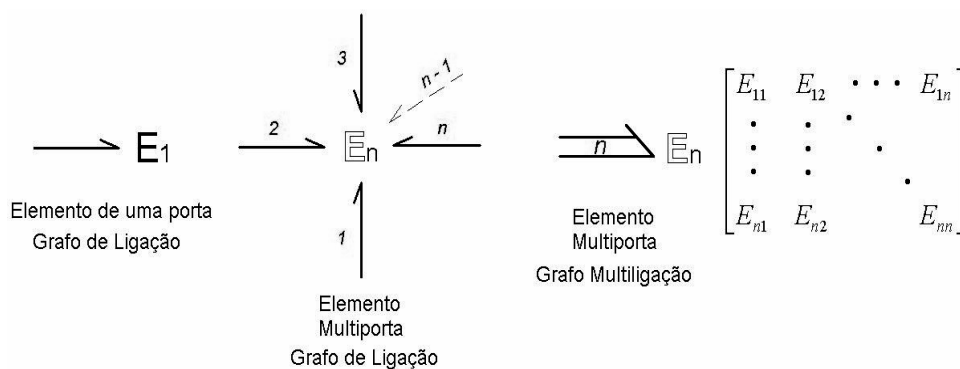


FIG. 8.4. Esquema de uma multiligação

Deve-se notar que estes elementos generalizados mantêm as mesmas características daqueles de uma porta, apenas possuem mais portas de entrada e saída e a equação constitutiva relaciona todas as variáveis envolvidas nas ligações. Na **TAB.3.3** são apresentadas as notações dos campos multiportas e dos elementos de junções vetoriais sem a atribuição das causalidades, visto que estas somente poderão ser atribuídas após o conhecimento de todo o sistema, tendo em vista que pode haver uma causalidade mista associada a uma determinada ligação, o que implicaria no particionamento da multiligação.

TAB. 8.3- Representação dos elementos nas multiligações

Elemento generalizado	Representação
Fonte de esforço	$S_e \Rightarrow$
Fonte de fluxo	$S_f \Rightarrow$
Campo Resistivo	$R \Leftarrow$
Campo Capacitivo	$C \Leftarrow$
Campo Inércia	$I \Leftarrow$
Multitransformador	$\Rightarrow \begin{matrix} : [N] \\ TF \end{matrix} \Rightarrow$
Multigirador	$\Rightarrow \begin{matrix} : [N] \\ GY \end{matrix} \Rightarrow$
Junções vetoriais	$\Rightarrow \underline{J} \Rightarrow$ \Uparrow

Os grafos multiligação são uma representação ou notação compacta dos grafos de ligação, utilizada quando se trabalha com os campos ou elementos multiportas. Uma multiligação é a generalização vetorial de uma ligação simples, e foi proposta por BREEDVELD (1985a), que definiu a maioria de seus elementos e conceitos. Com a utilização de campos multiportas, mais de um par de variáveis de entrada e saída pode ser conduzido em uma ligação, de acordo com o esquema da **FIG. 8.5**, onde a ordem da multiligação corresponde ao número de ligações simples que ela representa. Esta forma vetorial e compacta de representação faz com que uma grande condensação na representação do modelo do sistema por grafos de ligação e, por conseguinte, por diagramas de blocos, seja obtida.

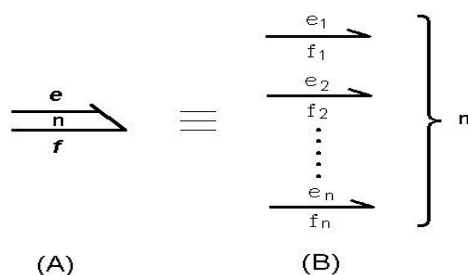


FIG. 8.5 Junção vetorial. (A) – representação de uma junção vetorial de ordem n. (B) – equivalente em junções escalares.

No presente trabalho é definida a utilização da representação multiligação como sendo a forma preferencial para a construção de modelos, pois, como já fora mencionado, esse caso é caracterizado por relações matriciais, aumentando desta forma a sua potencialidade e versatilidade, além de apresentar com melhor clareza as ligações existentes, poupando assim uma série de ligações simples e cruzamento destas que dificultariam o entendimento do presente modelo, como exemplificado por DA SILVA,(1994), onde o autor apresenta os dois grafos representantes da dinâmica vertical de um veículo terrestre, como pode ser observado na **FIG. 8.6**, o grafo por ligações simples (a) e por multiligação (b), podendo ser observada a simplicidade do grafo multiligação (b) em relação ao grafo de ligação simples(a).

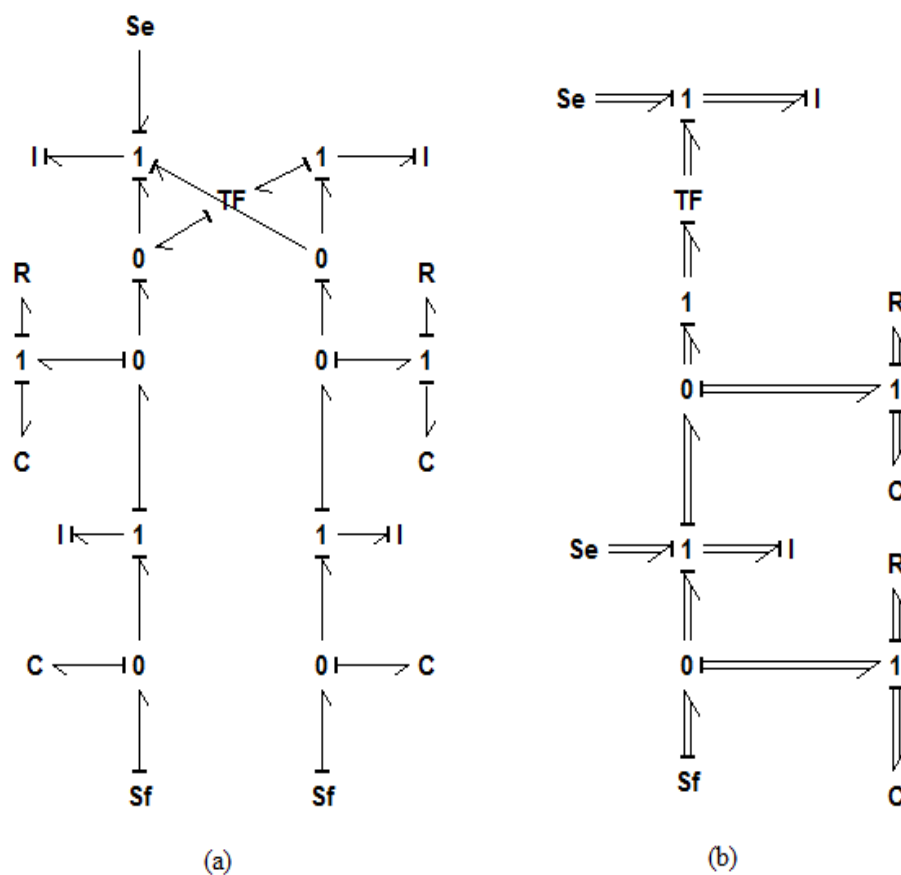


FIG.8.6- Grafo de ligação (a) e Grafo Multiligação (b)

8.6. MODELO DE ESTADO

Após o entendimento de como está caracterizado o problema e da técnica que será utilizada para modelagem matemática dos sistemas dinâmicos propostos, é necessário determinar as equações diferenciais do modelo de estado linear destes sistemas dinâmicos, que serão expressas por:

$$\begin{aligned}\dot{X} &= AX + BU \\ Y &= CX + DU\end{aligned}\tag{2}$$

Onde:

X é o vetor de variáveis de estado,

A é a matriz de estado,

U é o vetor de entradas,

B é a matriz de entradas,

Y é o vetor de saídas,

C é a matriz que relaciona o estado com a saída e

D é a matriz que relaciona as entradas com a saída.

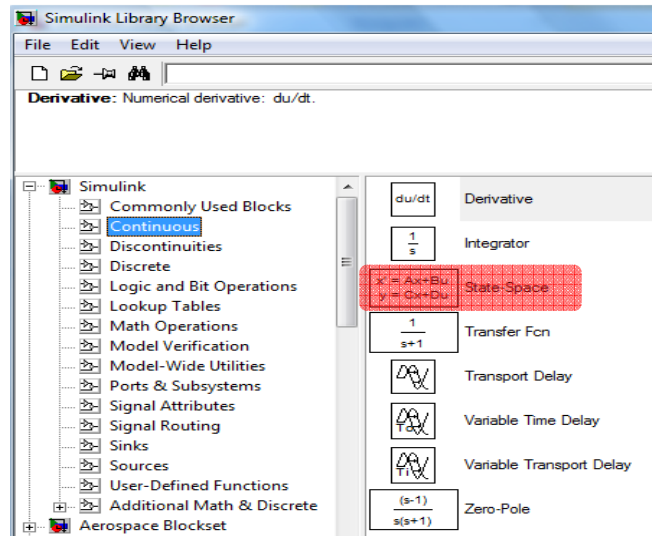
A técnica dos grafos de ligação possibilita a identificação imediata das variáveis de estado, com base na causalidade atribuída ao grafo e, o modelo dinâmico na forma de estado, é desenvolvido a partir das equações constitutivas dos elementos componentes do grafo, manipuladas conveniente e ordenadamente. As variáveis de saída também podem ser obtidas das equações constitutivas dos elementos, e também neste caso, apesar de dependerem do interesse do analista, pode-se estabelecer um procedimento ordenado para sua determinação, como no caso das equações de estado.

Para um melhor entendimento do equacionamento é importante serem definidas o que são as variáveis de estado:

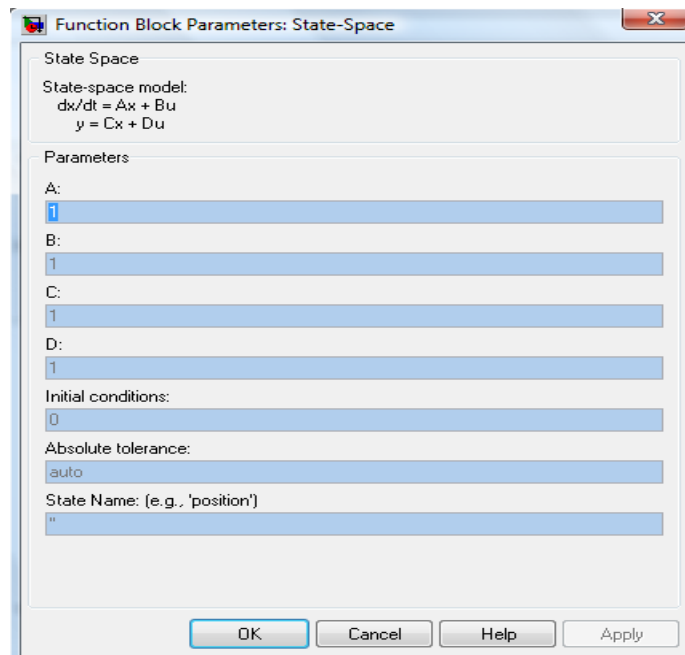
“As variáveis de estado são aquelas variáveis suficientes para prever o comportamento do sistema no tempo, dadas as entradas e as condições iniciais. Na maioria das vezes elas formam também o conjunto necessário para a análise do comportamento dinâmico do sistema, o que significa dizer que elas compõem o conjunto de variáveis (matematicamente independentes) capaz de representar a dinâmica do sistema.”

8.7. IMPLEMENTAÇÃO

Após a formulação do Modelo de Estado e seu código computacional no MatLab, será utilizado o Simulink, onde será selecionado o bloco “STATE SPACE” (a) e em seguida as matrizes “A”, “B”, “C” e “D” serão inseridas em “Parameters” (b), conforme apresentado na **FIG. 8.7.**



(a)



(b)

FIG.8.7- Sequência utilizada no Simulink

