

**MINISTÉRIO DA DEFESA
EXÉRCITO BRASILEIRO
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA
(Real Academia de Artilharia, Fortificação e Desenho)
SEÇÃO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**1º TEN IGOR LUCAS REINALDO
ASP OF R/2 YUGO NIHARI**

**CONCEPÇÃO DE CARRO DE COMBATE SOBRE
LAGARTAS MODERNO**

RIO DE JANEIRO

2020

**MINISTÉRIO DA DEFESA
EXÉRCITO BRASILEIRO
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA
(Real Academia de Artilharia, Fortificação e Desenho)
SEÇÃO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**1º TEN IGOR LUCAS REINALDO
ASP OF R/2 YUGO NIHARI**

CONCEPÇÃO DE CARRO DE COMBATE SOBRE LAGARTAS MODERNO

RIO DE JANEIRO

2020

1º TEN IGOR LUCAS REINALDO
ASP OF R/2 YUGO NIHARI

CONCEPÇÃO DE CARRO DE COMBATE SOBRE LAGARTAS MODERNO

Projeto de Fim de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica e de Automóvel do Instituto Militar de Engenharia como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Mecânico e de Automóvel.

Orientador: Cel Ricardo Teixeira da Costa Neto – D. Sc

Rio de Janeiro

2020

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

1º TEN IGOR LUCAS REINALDO

ASP OF R/2 YUGO NIHARI

CONCEPÇÃO DE CARRO DE COMBATE SOBRE LAGARTAS MODERNO

Projeto de Fim de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica e de Automóvel do Instituto Militar de Engenharia como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Mecânico e de Automóvel.

Orientador: Cel Ricardo Teixeira da Costa Neto – D. Sc

Aprovado em 26 de outubro de 2020 pela seguinte Banca Examinadora:

Cel Ricardo Teixeira da Costa Neto, D. Sc do IME – Presidente

Gen Bda R/1 Waldemir Cristino Rômulo, M. Sc do IME

Cel R/1 Victor Santoro Santiago, D. Sc do IME

Rio de Janeiro

2020

A presente obra é dedicada
ao Exército Brasileiro e a todos os membros da Força Terrestre, empregados
diuturnamente na defesa do País.

AGRADECIMENTOS

Aos nossos familiares, pelos esforços imensuráveis oferecidos a nós para que chegássemos até este ponto da vida.

Às nossas companheiras, pela compreensão e apoio incondicional nas noites e fins de semana dedicados a este trabalho.

Ao Instituto Militar de Engenharia, especialmente à Seção de Engenharia Mecânica, por ter proporcionado tantos anos de aprendizado, bem como relacionamentos que ficarão para a vida toda.

À Diretoria de Fabricação, por terem sido firmemente dispostos a ajudar no desenvolvimento deste trabalho, com informações sem as quais não seria possível seguir.

À Embraer, pela atenção dada ao trabalho, com sugestões e comentários que muito acrescentaram ao estudo desenvolvido, motivando-nos no trabalho diário.

“É muito melhor arriscar coisas grandiosas, alcançar triunfos e glórias, mesmo expondo-se a derrota, do que formar fila com os pobres de espírito que nem gozam muito nem sofrem muito, porque vivem nessa penumbra cinzenta que não conhece vitória nem derrota.”

Theodore Roosevelt

RESUMO

A existência e sobrevivência de uma Nação é garantida pela sua capacidade de defender a própria soberania, em seu respectivo território, contra ameaças, sejam elas internas ou externas. O Século XX, com as duas Grandes Guerras Mundiais, apresentou-se um cenário fértil para o desenvolvimento de novas tecnologias que reforçassem a referida capacidade de defesa. Neste contexto, surgem os Carros de Combate Principais (MBT, em inglês), cuja nomenclatura na doutrina brasileira é, simplesmente, Carros de Combate (CC). Com o fim iminente da parceria do Exército Brasileiro com a empresa alemã Krauss-Maffei-Wegman (KMW) em 2027, faz-se necessário a busca pela próxima geração de CC na Força Terrestre. Dessa maneira, este trabalho tem por finalidade apresentar uma configuração elementar de um carro de combate sobre lagartas em CAD 3D, com base nos novos conceitos de engajamento e buscando seguir as restrições impostas pelos Requisitos Técnicos Absolutos (RTA) regulamentados por EB-RTLI-04.062 (2020). Dado o maior tempo de projeto, alguns sistemas são abordados com maior ênfase, tais como suspensões, trem de força, blindagem e armamento principal. Com simulações eficientes e modelagens matemáticas baseadas na literatura clássica e moderna, toma-se decisões de projeto elementares. Assim, com essa concepção inicial, é possível partir para etapas detalhadas em trabalhos futuros.

Palavras-chave: Carro de Combate, Exército Brasileiro, Concepção, Viatura Blindada.

ABSTRACT

The existence and survivability of a Nation is guaranteed by its defense capacity of its sovereignty in its territory against threats, whether internal or external. The 20th Century, with the two Great World Wars, presented a fertile scenario for the development of new technologies that reinforced the previous cited defense capacity. In this context, the Main Battle Tanks rises, which nomenclature for the Brazilian doctrine is, simply, Carro de Combate (CC). With the imminent end of a partnership between the Brazilian Army and the German company Krauss-Maffei-Wegman (KMW) in 2027, it is necessary the search for the next generation MBT for the Brazilian Ground Force. In this way, this project aims to present a elementary configuration of a battle tank with tracks in 3D CAD, based on the new concepts of engagement and on the restrictions imposed by the Absolute Technical Requirements (RTA, in Portuguese) regulated by EB-RTLI-04.062 (2020). Given the longer time of project, some systems are prioritized, like suspensions, powertrain, armour, and main gun. With efficient simulations and mathematical models based on classic and modern literature, elementary decisions of project are made. Thus, from an initial concept, it is possible to start detailed steps in futures works.

Keywords: Main Battle Tank, Brazilian Army, Conception, Armoured Military Vehicle.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 3.1 MARK V: PRIMEIROS CARROS DE COMBATE A SEREM COLOCADOS EM CAMPO (OGORKIEWICZ, 1998)	27
FIGURA 3.2 DOIS CARROS DE COMBATE DESTRUÍDOS DURANTE A GUERRA DA CHECHÊNIA (AUTOR DESCONHECIDO, 1994-1996).....	27
FIGURA 3.3 AMEAÇAS MODERNAS AO VBC CC (RAHMAN ET AL, 2017)	30
FIGURA 3.4 LIMITE DE 91 T DISTRIBUÍDOS EM 11 EIXOS, RESULTANDO EM UM COMPRIMENTO MÁXIMO DE 30 M (CONTRAN, 2016).....	33
FIGURA 3.5 CAPACIDADE DE TRANSPOR OBSTÁCULOS (RAHMAN ET AL, 2017).....	34
FIGURA 3.6 BARRA DE TORÇÃO E BRAÇO DE SUSPENSÃO EM DIFERENTES INSTANTES	41
FIGURA 3.7 REPRESENTAÇÃO DE UM AMORTECEDOR	43
FIGURA 3.8 REPRESENTAÇÃO CONJUNTA DO AMORTECEDOR E DO BRAÇO DE SUSPENSÃO.....	44
FIGURA 3.9 DIAGRAMA DE CORPO LIVRE PAR UM VBC CC (MACLAURIN, 2018, MODIFICADO)	46
FIGURA 3.10 PRINCIPAIS MATERIAIS PARA BLINDAGEM	47
FIGURA 3.11 MUNIÇÃO DIVIDIDA POSICIONADA EM CARROSSEL (AUTOR DESCONHECIDO) ..	55
FIGURA 3.12 CARREGADOR AUTOMÁTICO PRESENTE NO K2 BLACK PANTHER (FIGHTING VEHICLES, 2020)	55
FIGURA 3.13 PENETRAÇÃO DE MUNIÇÃO FLECHA EM FUNÇÃO DO CALIBRE (LANZ E ODERMATT, 1992, ADAPTADO).....	57
FIGURA 4.1 MODELAGEM EM SIMULINK® DA DINÂMICA LONGITUDINAL	61
FIGURA 4.2 CURVA DE TORQUE DO MOTOR MT 892 (ADAPTADO DE MTU).....	61
FIGURA 4.3 TRANSPOSIÇÃO DE FOSSO HORIZONTAL	63
FIGURA 4.4 CURVA DE CONSUMO ESPECÍFICO EM FUNÇÃO DA ROTAÇÃO (ADAPTADO DE MTU)	65
FIGURA 4.5 DIAGRAMA DE BLOCOS PARA O MODELO BICICLETA DO VBC CC.....	68
FIGURA 5.1 MODELAGEM EM CAD 3D DO VBC CC MODERNO	72
FIGURA 5.2 POSICIONAMENTO DOS COMPONENTES MODELADOS	73
FIGURA 5.3 ALTURA DOS COMPONENTES CONSIDERADOS	73
FIGURA 5.4 VISTAS DO MOTOR MT 892 (MTU).....	74
FIGURA 5.5 VISTAS DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO (RENK).....	74
FIGURA 5.6 VELOCIDADE DO VEÍCULO EM FUNÇÃO DO TEMPO	76
FIGURA 5.7 SISTEMA DE SUSPENSÕES DO VBC CC.....	79

FIGURA 5.8 COMPORTAMENTO DAS RIGIDEZES DA VIATURA	80
FIGURA 5.9 PADRÃO DE OBSTÁCULO PELA NORMA TOP 1-1-011 (ABARDEEN, 2012).....	81
FIGURA 5.10 OSCILAÇÕES DO CHASSI	81
FIGURA 5.11 PERTURBAÇÕES DE BASE NOS 7 EIXOS	82
FIGURA 5.12 VISTA EM CORTE DO CARRO DE COMBATE.....	84
FIGURA 5.13 MODELAGEM CAD 3D DO SISTEMA DE ARMAMENTO PRINCIPAL EMPREGADO .	85
FIGURA 5.14 VISTA FRONTAL DO COFRE DE MUNIÇÕES PRINCIPAL.....	86
FIGURA 5.15 MODELO 3D DO SISTEMA DE CARREGAMENTO	87
FIGURA 5.16 VISTA LATERAL DO SISTEMA DE CARREGAMENTO.....	87

LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1 RELAÇÃO DE MBT E SEU ARMAMENTO PRINCIPAL (ADAPTADO DE CANÉPPELE, 2018).....	57
TABELA 3.2 EXEMPLOS DE MUNIÇÃO E EMPREGO (ELBIT SYSTEMS E GENERAL DYNAMICS, 2010).....	58
TABELA 4.1 TIPOS DE SUSPENSÃO DOS CARROS DE COMBATE NO MUNDO.....	67
TABELA 5.1 PARÂMETROS OBTIDOS.....	75
TABELA 5.2 RELAÇÕES DE REDUÇÃO.....	75
TABELA 5.3 PARÂMETROS PARA O CÁLCULO DO VCI.....	77
TABELA 5.4 FATORES E RESULTADOS DE ÍNDICE DE CONE.....	78

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AMCP – *Army Materiel Command Pamphlet*

APFSDS – *Armor-Piercing, Fin-Stabilized Discarding-Sabot Tracer tank cartridge*

CG – Centro de Gravidade

CONTRAN – Conselho Nacional de Trânsito

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

DOP – *Depth of Penetration*

DQBRN – Defesa Química, Biológica, Radiológica e Nuclear

EB – Exército Brasileiro

END – Estratégia Nacional de Defesa

FFAA – Forças Armadas do Brasil

GM – Guerra Mundial

HEAT-T – *High-Explosive Anti-Tank Tracer tank cartridge*

HE-T – *High-Explosive Tracer tank cartridge*

HHA – *High Hardness Armour*

HUMS – *Health and Usage Monitoring System*

IED – *Improvised Explosive Device*

IM – Índice de Mobilidade

ISTAR – *Intelligence, Surveillance, Target Acquisition and Reconnaissance*

MBT – *Main Battle Tank*

OEE – Objetivos Estratégicos do Exército

OTAN – Organização do Tratado do Atlântico Norte

RCI – *Rating Cone Index*

REMAX – Reparo de Metralhadora Automatizado X

RHA – *Rolled Homogeneous Armour*

RO – Requisito Operacional

RTA – Requisito Técnico Absoluto

RTLI – Requisitos Técnicos, Logísticos e Industriais

SARC – Sistema de Armas Remotamente Controlado

TO – Teatro de Operações

VBC CC – Viatura Blindada de Combate Carro de Combate

VBTP – Viatura Blindada de Transporte de Pessoal

VCI – *Vehicle Cone Index*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	18
1.1 MOTIVAÇÃO	18
1.2 OBJETIVOS	18
1.3 APRESENTAÇÃO	18
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
2.1 EVOLUÇÃO DOUTRINÁRIA E ESPECIFICAÇÕES BÁSICAS.....	20
2.2 MOBILIDADE	22
2.3 PROTEÇÃO	22
2.4 PODER DE FOGO	24
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	25
3.1 EVOLUÇÃO DOUTRINÁRIA.....	25
3.2 ESPECIFICAÇÕES BÁSICAS	31
3.2.1 DIMENSÕES DO VEÍCULO	32
3.2.2 NÚMERO DE TRIPULANTES.....	33
3.2.3 PESO	33
3.2.4 CAPACIDADE DE TRANSPOR OBSTÁCULOS.....	34
3.3 PROPULSÃO E TRANSMISSÃO DE FORÇA	35
3.3.1 MOTOR.....	35
3.3.2 MOTOR DE PARTIDA.....	36
3.3.3 DINÂMICA LONGITUDINAL	37
3.3.4 TRAFEGABILIDADE	38
3.4 SUSPENSÕES.....	39
3.4.1 SUSPENSÃO COM BARRA DE TORÇÃO	40
3.4.2 SUSPENSÃO HIDROPNEUMÁTICA	42
3.4.3 AMORTECEDORES	42

3.4.4 RODAS DE APOIO	44
3.4.5 LAGARTAS	45
3.4.6 FREQUÊNCIAS NATURAIS	45
3.5 PROTEÇÃO	46
3.5.1 AÇOS PARA BLINDAGEM	48
3.5.2 MATERIAIS CERÂMICOS	49
3.5.3 COMPÓSITOS PARA BLINDAGEM	50
3.5.4 MATERIAIS REATIVOS PARA BLINDAGEM	51
3.5.5 ESTIMATIVAS DE PROJETO	51
3.5.6 REQUISITOS TÉCNICOS, LOGÍSTICOS E INDUSTRIAIS	52
3.6 PODER DE FOGO	53
3.6.1 SISTEMA PRINCIPAL	53
3.6.2 SISTEMA SECUNDÁRIO	58
3.6.3 REQUISITOS TÉCNICOS, LOGÍSTICOS E INDUSTRIAIS	59
4 MODELAGEM MATEMÁTICA.....	60
4.1 PROPULSÃO E TRANSMISSÃO DE FORÇA	60
4.1.1 DINÂMICA LONGITUDINAL	60
4.1.2 MOBILIDADE TÁTICA.....	63
4.1.3 AUTONOMIA.....	64
4.1.4 BATERIAS.....	66
4.2 SUSPENSÕES.....	67
4.2.1 MODELO DE RIGIDEZES VARIÁVEIS.....	68
4.2.2 MODELO DE RIGIDEZES MÉDIAS	69
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	72
5.1 DINÂMICA LONGITUDINAL	75
5.2 MOBILIDADE TÁTICA E ESTRATÉGIA.....	76
5.3 TRAFEGABILIDADE	77

5.4 AUTONOMIA.....	78
5.5 BATERIAS.....	78
5.6 SUSPENSÕES.....	79
5.7 CHASSI.....	83
5.8 SISTEMA DE ARMAMENTO.....	85
6 CONCLUSÃO.....	88
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	90

1 INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO

Como relatado por Guderian (1937), os carros de combate surgiram em um período no qual o tiro por repetição impactou fortemente o modelo de guerra convencional vigente no início do Século XX. Como forma de permitir o avanço da infantaria e a proteção contra os novos armamentos, os veículos blindados sobre lagartas revolucionaram o conceito de mobilidade durante todo o século supracitado.

No entanto, com a mudança de foco para a Guerra Fria e aumento de conflitos locais, o ambiente urbano passou a ser o principal, sendo a guerra não-convencional a nova realidade, como Horowitz e Shalmon (2009) e Posen (2007) retratam.

Surge, então, no contexto brasileiro, a necessidade de elaborar um conceito nacional de uma nova Viatura Blindada de Combate Carro de Combate (VBC CC) para atender às novas tendências de engajamento. Com o término de um ciclo em 2027, resultante do encerramento de contrato com a empresa alemã Krauss-Maffei-Wegmann e, possivelmente, do fim do ciclo de vida do Leopard 1A5 adquirido pelo Exército Brasileiro, abre-se a oportunidade para este desenvolvimento.

1.2 OBJETIVOS

Nesse contexto, este trabalho tem por finalidade apresentar uma configuração elementar de um carro de combate sobre lagartas em CAD 3D, com base nos novos conceitos de engajamento e buscando seguir as restrições impostas pelos Requisitos Técnicos Absolutos (RTA) regulamentados por EB-RTL1-04.062 (2020).

1.3 APRESENTAÇÃO

Inicialmente, na Seção 2, tem-se uma revisão bibliográfica rápida das principais fontes de consulta para a realização deste trabalho, dividida por área de estudo.

Na Seção 3, tem-se a fundamentação teórica de todo o trabalho, onde é feito um estudo doutrinário prévio, bem como de novas abordagens da área, a fim de ratificar ou retificar os RTA já regulamentados, justificando ou propondo sugestões de

melhoria, respectivamente. No entanto, o foco do trabalho não é investigar profundamente a formação de doutrinas militares ao redor do mundo, mas sim buscar trabalhos brasileiros e internacionais da área que reforcem as decisões de projeto. Em seguida, ainda na mesma Seção, são abordados os sistemas de propulsão e transmissão de força, suspensões, proteção e poder de fogo, além de especificações básicas, tais como o número de tripulantes e peso.

Na Seção 4, é desenvolvida a modelagem matemática necessária para a obtenção de resultados, a partir de informações retiradas diretamente da fundamentação teórica ou de manipulações de autoria própria dos condutores deste projeto. Assim, prepara-se para a obtenção de resultados.

Na Seção 5, por fim, mostra-se o resultado da aplicação direta de conceitos abordados tanto na fundamentação teórica como na modelagem matemática, com foco na tradução destes resultados em um modelo em CAD 3D.

É importante salientar que o trabalho não visa detalhar profundamente o projeto de todo o veículo, mas gerar a concepção inicial deste produto, com foco na garantia da soberania nacional e no tripé de desenvolvimento de um veículo blindado: mobilidade, proteção e poder de fogo, como destacado por Terry et al (1991), partindo de requisitos já definidos por EB-RTLI-04.062 (2020).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta Seção são ressaltadas as principais fontes bibliográficas do trabalho, bem como os pontos mais importantes das respectivas obras. Os temas abordados são: evolução doutrinária, especificações básicas, propulsão e transmissão de força, suspensões, proteção e poder de fogo.

2.1 EVOLUÇÃO DOUTRINÁRIA E ESPECIFICAÇÕES BÁSICAS

Guderian (1937) é uma obra clássica traduzida para o português pela Biblioteca do Exército e publicada em 2009, onde se aborda os desafios no desenvolvimento de forças blindadas, suas táticas e poder operacional no período 1914-1937. Salienta-se a necessidade, desde cedo, de forte investimento em veículos blindados para o cumprimento com sucesso de missões. Por meio de sua metodologia de avaliação, é possível aplicar o mesmo processo de análise aos tempos atuais.

A AMCP 706-357 (1970) é um panfleto técnico elaborado pelo Exército dos Estados Unidos da América para abordar questões técnicas relacionadas ao chassi e à carcaça de veículos militares.

Ogorkiewicz (1998) é uma obra clássica a respeito da evolução tecnológica de carros de combate no século XX, bem como Terry et al (1991). Ambos desenvolvem o estudo de carros de combate partindo dos primórdios, quando os primeiros veículos desse tipo foram lançados, em 1916, e debatem à luz de uma ótica moderna a respeito de doutrina operacional, tática e estratégica.

Posen (2007) aborda a necessidade de encarar a realidade não-convencional dos conflitos modernos, especificamente por parte dos Estados Unidos da América. Percorrendo os principais fatos do fim do Século XX, é possível ver a evolução dos conflitos nessa direção.

Horowitz e Shalmon (2009) destacam o papel das forças armadas dos Estados Unidos da América no novo panorama mundial, comentando estratégias futuras. Dada a semelhança doutrinária em alguns aspectos com as forças brasileiras, mesmo havendo diferenças nítidas, esse estudo contribui para a formação de uma nova doutrina nacional.

A Estratégia Nacional de Defesa (2012) define a forma como se alcançam os objetivos fixados para Defesa Nacional, sendo o documento de mais alto nível para nortear os planejamentos e ações referentes às ameaças externas, bem como definir objetivos práticos de combate para forças blindadas, por exemplo.

Annes (2017) faz um estudo detalhado sobre as opções que o Exército Brasileiro tem após o fim do contrato do atual Leopard 1 A5 BR. Assim, ressalta a importância do início e financiamento imediato de um projeto nacional, para fins da conquista de soberania em níveis condizentes com a importância geopolítica do Brasil.

Age of Tanks (2017) aborda, por meio de um documentário, a evolução das forças blindadas ao longo do tempo, constituindo-se de relatos de veteranos dos principais países envolvidos no desenvolvimento dessa arma e com comentários históricos a respeito dos aprendizados conquistados.

Rahman et al (2017) abordam os novos conceitos de engajamento para o projeto de um veículo blindado sobre lagartas moderno, apoiando a necessidade de revolução do modelo que há atualmente, e não de evolução. Para isso, aborda-se fundamentalmente características básicas, como tripulação, peso, dimensões, e características específica de alguns subsistemas, como tipo de armamento e trafegabilidade.

Carvalho e Carvalho (2019) tratam da tecnologia e da fabricação de subsistemas de um CC, com base nos critérios de custo e criticalidade. Dessa maneira, hierarquiza os subsistemas a serem nacionalizados, iniciando por bens consumíveis, como munições.

EB-RTLI-04.062 (2020) define Requisitos Tecnológicos, Logísticos e Industriais para a concepção de um veículo blindado sobre lagartas, formalmente chamado de Viatura Blindada de Combate Carro de Combate (VBC CC). Dessa forma, é possível já obter limitantes para as especificações técnicas do projeto a ser abordado

2.2 MOBILIDADE

Terry et al (1991) e Ogorkiewicz (1998) abordam os principais subsistemas mecânicos de um carro de combate, salientando aspectos a serem observados durante o projeto, o que inclui motor, transmissões e lagartas, por exemplo.

Diskett (2008) aborda as principais decisões a respeito do dimensionamento elétrico de um veículo blindado leve ou médio.

Dhr and Sankar (1995) fazem um estudo de veículos com lagartas em terreno não-deformável e com velocidade constante, a fim de comparar experimentos com simulações de um modelo de dinâmica vertical.

Jazar (2008) foca sua abordagem em veículos de passeio. No entanto, a análise de vibrações realizada, juntamente com as hipóteses simplificadoras, pode ser facilmente estendida para veículos pesados e com maior quantidade de eixos.

Fathy e Salem (2009) fazem uma modelagem multicorpos de um carro de combate sobre lagartas que utiliza barra de torção como suspensão. Dessa maneira, faz-se uma análise detalhada do modelo matemático tanto da barra de torção como de um amortecedor hidráulico, que também é comumente utilizado para essa aplicação.

Ata (2014) modela o sistema de suspensões de um carro de combate de maneira completa em diagrama de blocos, a fim de obter a resposta do sistema a perturbações de base diversas.

Maclaurin (2018) trata com profundidade dos principais componentes de suspensão de veículos fora-de-estrada, como lagartas, pneus e rodas. Por ser um livro recente, traz diversos dados úteis de carros de combate ao redor do globo, possíveis de serem utilizados como referência para um novo projeto.

2.3 PROTEÇÃO

Monaco (2004) aborda sobre os materiais modernos já utilizados no Brasil para fins de blindagem, inclusive de veículos militares, até o começo dos anos 2000.

Assis (2007) desenvolve um estudo comparativo de cerâmicas e compósitos para uso estrutural. Nesse contexto, a alumina aparece como um material cerâmico bastante utilizado mundialmente.

Gorni (2008) desenvolve um estudo profundo sobre diferentes tipos de aços avançados de alta dureza, muito empregados na indústria. Dessa forma, relaciona-se as microestruturas com as propriedades mecânicas dos aços mais usados no Brasil, bem como tece-se comentários sobre o fator econômico nessa área.

Chagas et al (2015) abordam a utilização de blindagem cerâmica de alumina para veículos militares. Dessa forma, por meio de ensaios balísticos, propõe-se melhorias práticas de arranjo e proteção desse material.

Akella e Naik (2015) abordam de maneira geral a evolução do uso de materiais compósitos como blindagem ao redor do mundo. Dessa forma, busca-se concluir que materiais compósitos são vantajosos frente a aços e cerâmicas.

Hazell (2016) aborda de forma moderna as principais formas de blindagem empregadas em diversos meios: humanos, veículos, aeronaves e encouraçados. O objetivo é fornecer uma visão geral da teoria e da prática moderna.

Singh et al et al (2017) abordam as novas tendências de blindagem no mundo, levando em consideração a seguinte dicotomia: melhor blindagem e menor peso para melhoria de desempenho. Uma série de materiais avançados são analisados de acordo com suas propriedades mecânicas, como aços e polímeros de blindagem, materiais explosivos não-reativos e reativos.

Oliveira et al (2019) abordam o desempenho de um aço de alta dureza de produção nacional, do tipo CrNiMo, chamado de VCB3Ti, sendo empregado como blindagem para veículos militares. Para isso, utiliza-se ensaios de impacto, dureza e dobramento, conforme normatizado. Esse trabalho constitui a continuação da análise feita por Souza et al (2016) e por Oliveira (2015).

2.4 PODER DE FOGO

MIL-HDBK-684 (1995) é um documento do governo estadunidense cujo objetivo é concentrar informações tecnológicas que tornem os carros de combate mais resistentes e que minimizem os efeitos na respectiva tripulação.

Way (2006) aborda sobre os tipos de carregamento em veículos militares, apontando veículos históricos que utilizavam distintos sistemas.

Osinski (2006) estuda detalhadamente o veículo russo T-64, apresentando algumas de suas características, bem como pontos fortes e fracos, e que são essenciais para o entendimento e desenvolvimento de um carro de combate de última geração.

Canéppele (2018) conduz uma análise crítica sobre os possíveis rumos na escolha do substituto do Leoapard 1 A5 BR, atual carro de combate brasileiro e cujo contrato está em seus últimos anos de validade.

Bastos (2020) descreve e comenta a respeito do novo canhão de 130 mm desenvolvido pela empresa alemã Rheinmetall e que possui capacidade de tornar ultrapassado os canhões de 105 e 120 mm.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta Seção, são comentados os principais conceitos de maneira direta e objetiva e que são encontrados na literatura ou em outras fontes do meio acadêmico. A divisão é feita da seguinte maneira: evolução doutrinária, especificações básicas, propulsão e transmissão de força, suspensões, sendo estes dois últimos parte do conceito de mobilidade, e, por fim, proteção e poder de fogo.

3.1 EVOLUÇÃO DOUTRINÁRIA

Segundo Guderian (1937), existem fatores primordiais para a formação de uma doutrina: a posição geográfica de um país, o grau de vulnerabilidade de suas fronteiras, as matérias-primas disponíveis, o parque industrial instalado e o potencial militar comparado aos vizinhos geográficos. Nessa ideia, ao se falar especificamente de forças blindadas, é necessário ainda a delimitação de um objetivo claro de uso, que pode ser selecionado utilizando os conceitos abordados ao longo desta Seção.

No entanto, para a compreensão da nova doutrina de engajamento, a compreensão dos primórdios do desenvolvimento dos carros de combate é salutar. Nesse sentido, a necessidade de forças blindadas surge durante a Primeira Guerra Mundial (1ª GM), na qual a Guerra baseada no Efeito de Choque não é mais suficiente, dada a evolução tecnológica dos armamentos, com surgimento de metralhadoras, aviação, gases venenosos e artilharia avançada. Como adaptação da época, surge a Guerra de Posição, mas ainda resultando em muitas baixas desnecessárias.

Nesse contexto, cresce a importância dos carros de combate na penetração da linha inimiga, permitindo o avanço simultâneo da infantaria e sendo auxiliados por ela. Combinados com o efeito surpresa, essa nova tecnologia é primeiramente empregada em 1916 e é uma das grandes responsáveis pela derrota alemã na 1ª GM, ao garantir o retorno do Efeito de Choque, quando empregada em grande quantidade. O primeiro modelo empregado em guerra foi fabricado pelos ingleses, sendo chamado de Mark I. A **Figura 3.1** retrata já o 5º modelo do veículo, mas ainda durante a guerra e muito semelhante à primeira versão.

Assim, é interessante salientar algumas conclusões técnicas que Guderian (1937) faz, em diferentes contextos do combate, mas ainda em seu período de atuação, no fim da década de 1930:

- a) para fins de reconhecimento operacional, a velocidade é decisiva, então utiliza-se veículos sobre rodas com suspensões e direção independentes;
- b) para fins de reconhecimento tático, o veículo necessita atravessar qualquer campo, utilizando, então, meia-lagarta e tração integral;
- c) para fins de reconhecimento de combate, exige-se veículos sobre lagartas com total mobilidade em terrenos com obstáculos;
- d) a eficácia, espaço ocupado e maneiras como poderiam ser montados são critérios mais importantes, relativos aos armamentos, do que o número em si de armas;
- e) semieixos independentes, pneumáticos e à prova de balas permitem maior trafegabilidade;
- f) a capacidade de se mover é facilitada por um sistema de direção em todas as rodas ou, para o caso dos carros de reconhecimento pesados, por um sistema de direção traseiro;
- g) rodas sobressalentes em um eixo morto ajudam a proteger o veículo de choques em terrenos muito irregulares;
- h) retirando do comandante do carro a tarefa de operar o canhão, este tripulante pode ter uma visão 360° independente do movimento da torre;
- i) em geral, deve-se fazer um *trade-off* entre velocidade e capacidade de transpor obstáculos. Para priorização do último aspecto, os veículos passam a ser mais pesados, chegando até a 90t, mas capazes de transpor taludes de 45°, obstáculos de até 3m de altura, cruzar valas de até 6m de largura e atravessar valas de até 3,5m de profundidade.

Com a evolução da doutrina, passa-se a defender uma força totalmente blindada, na qual os carros de combate são auxiliados pela infantaria, artilharia, comunicações e engenharia motorizadas, que também se deslocariam em veículos blindados. Essa conclusão pode ser tirada justamente devido às necessidades que o engajamento moderno apresenta. Dessa forma, a forte contribuição de Guderian (1937), ainda mais para os dias atuais, é o pensamento tático e operacional focado

no meio no qual o carro de combate se insere. Assim, é possível convertê-los em requisitos técnicos para a concepção de um novo modelo.



Figura 3.1 Mark V: Primeiros carros de combate a serem colocados em campo (Ogorkiewicz, 1998)



Figura 3.2 Dois carros de combate destruídos durante a Guerra da Chechênia (Autor desconhecido, 1994-1996)

Após a Segunda Guerra Mundial, no entanto, o meio se altera significativamente, bem como a capacidade das armas antitanque, gerando a sensação de obsolescência. Com a utilização no ambiente urbano para conter revoltas

locais, ou para combater guerrilhas armadas, o carro de combate mostra-se muito vulnerável, perdendo sua vantagem ofensiva e agressiva, conforme Ogorkiewicz (1998) relata e como retratado na **Figura 3.2**.

Mesmo nesse cenário desfavorável, essa arma bélica ainda pode mostrar seu valor e adaptar-se ao ambiente moderno. Dentre uma das vantagens adquiridas, pode-se citar a blindagem contra efeito radioativo, permitindo a preparação das principais nações para um possível conflito nuclear, que estava bastante iminente durante o período da Guerra Fria. Como os próprios veteranos franceses, russos, americanos e ingleses relatam em *Age of Tanks* (2017), este período foi muito instável e cheio de conflitos locais, resultantes de efeitos negativos ainda da Segunda Guerra Mundial, o que exigiu elevada adaptabilidade.

Com o fim da União Soviética e redução de conflitos que exigissem o uso desse tipo de ofensiva, o carro de combate passa a evoluir a passos curtos, apenas agregando mais tecnologia, como eletrônica, controle e sensoriamento. Isso também faz com que a literatura clássica dos anos 90 sobre o assunto ainda seja bem atual, em termos de projeto básico. Seguindo a tendência que surgiu na segunda metade do Século XX, as condições de engajamento tendem cada vez mais a serem relacionadas à guerra irregular. Este ponto é reforçado por Posen (2007), que afirma que a globalização, a difusão de pequenas armas eficientes, a propagação do conhecimento tecnológico e o crescente fortalecimento de identidade e religioso faz a guerra irregular se tornar cada vez mais a realidade do futuro. No entanto, como destacado no debate de Horowitz e Shalmon (2009), deve-se atentar à manutenção das capacidades de combate na forma convencional, uma vez que é difícil prever o futuro, assim como os analistas dos anos 1900 não previram as duas Grandes Guerras Mundiais.

Além disso, no que se refere a parte de projetos, Rahman et al (2017) acrescenta uma abordagem *bottom-up* para certos requisitos técnicos, de forma que não apenas as condicionantes externas sejam consideradas, mas também pontos específicos de projeto, como o peso. Desse modo, pode-se agregar doutrina e especificação técnica desde o início, o que é mais uma realidade atual.

Para o entendimento de novas concepções básicas da doutrina de blindados necessária para as atuais condições de engajamento, é importante ainda, segundo Rahman (2017), abordar os conceitos de:

- a) Trafegabilidade: diz respeito à capacidade de transpassar uma variada gama de terrenos, como areia, barro e terreno molhado. Esse aspecto auxilia na definição do tipo de lagarta, na quantidade de rodas, na capacidade trativa e na avaliação do centro de gravidade (CG). Para o caso do Brasil, pelos mais variados terrenos, necessita-se de uma ampla abrangência;
- b) Mobilidade Tática: este conceito está intimamente ligado à capacidade do veículo de ultrapassar obstáculos, como valas e degraus, que serão abordados mais detalhadamente na seção seguinte. Juntamente com a Trafegabilidade, este conceito define as principais capacidades do veículo no ambiente de emprego;
- c) Sobrevivência: este conceito está diretamente ligado ao peso e ao volume do veículo. Isto ocorre por ter relação com a proteção balística empregada, conforme reforçado por Singh et al (2017), o que será abordado posteriormente, e como resposta aos diversos tipos de ameaças atuais, como mostrado na **Figura 3.3**. Além disso, a pintura utilizada também interfere nesse conceito, mas não diz respeito ao escopo deste trabalho. No entanto, com o tempo, de acordo com Hazell (2016), os MBT passaram a possuir silhueta reduzida com o objetivo de facilitar a camuflagem, sendo a massa reduzida redirecionada para a espessura da blindagem na parte frontal;

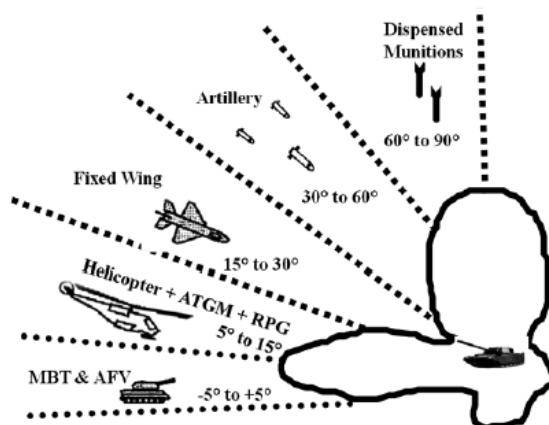


Figura 3.3 Ameaças Modernas ao VBC CC (Rahman et al, 2017)

- d) Inteligência (ISTAR): trata-se de um conjunto de ferramentas de suporte à tomada de decisão de natureza multidimensional, avançada e que auxilia a todos os níveis de comando, desde o estratégico até o operacional. Dessa forma, pode-se tomar conhecimento em tempo real da situação de combate. No caso brasileiro, diz respeito ao Comando e Controle no mais alto nível, já empregado pela Força Terrestre em alguns contextos;
- e) Modularidade: essa ideia diz respeito à capacidade de adaptação do veículo a diferentes contextos ao acrescentar ou remover partes do veículo, que são modularizadas e de fácil acesso. Dessa forma, pode-se obter diferentes configurações em um mesmo veículo de modo fácil e eficiente;
- f) Transportabilidade: para o emprego deste tipo de veículo, em geral, é necessário haver o transporte via aérea ou marítima. Nesse contexto, dadas as atuais limitações espaciais dos transportes das FFAA, deve-se considerar este fator como limitante de projeto, como será abordado na seção seguinte. Está intimamente ligado ao conceito de mobilidade estratégica, segundo o EB20-MF-03.109 (2018).

Considerando esses conceitos doutrinários e técnicos, a Estratégia Nacional de Defesa (2012) aborda a necessidade da prioridade ao desenvolvimento de capacitações tecnológicas independentes e livres, ao máximo, de produtos estrangeiros, o que inclui veículos blindados modernos adequados à situação geopolítica atual. Isso inclui capacidade igual ou superior às forças blindadas vizinhas e coerência com as tendências militares atuais.

Como abordado por Carvalho e Carvalho (2019), uma maneira eficaz de iniciar a nacionalização é a partir dos consumíveis do veículo, como munições, considerando sempre a dicotomia entre custo e criticalidade. Após isso, dado o contexto de guerra cibernética atual, deve-se focar nos sistemas de comunicação e de pontaria, vitais para o bom funcionamento do veículo. Dessa forma, cria-se o espaço de tempo necessário para o domínio de tecnologia nas partes duráveis do veículo, como chassi, estrutura, suspensões e armamento principal.

Alinhado a isso, Annes (2017) ressalta a importância de um projeto independente para os blindados brasileiros. Como o término do contrato do Leopard 1 A5 com a empresa alemã Krauss-Maffei-Wegmann ocorre em 2027, não há tempo hábil para um projeto nacional, já que países que já estão nesse ramo levam cerca de 10 anos. Dessa forma, a solução seria uma nova aquisição, mas já com o projeto sendo desenvolvido para o ciclo seguinte, que se estima ser por volta de 2037.

Por fim, em complemento a isso, já existe um delimitador que segue os aspectos doutrinários brasileiros: os requisitos definidos na EB-RTLI-04.062 (2020). Mesmo encarados como limitantes, tal regulamento facilita o desenvolvimento do projeto, uma vez que já é a tradução de Requisitos Operacionais (RO) e doutrinários em requisitos de projeto, seguindo os Objetivos Estratégicos do Exército (OEE) traçados na Estratégia Nacional de Defesa (2012). Dessa maneira, este trabalho busca, além de se apoiar nessas condicionantes, desenvolver sugestões de melhoria com base nos conceitos doutrinários abordados anteriormente.

3.2 ESPECIFICAÇÕES BÁSICAS

No que diz respeito às características básicas do veículo, busca-se especificar, segundo os RTA constantes em EB-RTLI-04.062 (2020):

- a) dimensões do veículo;
- b) número de tripulantes;
- c) peso;
- d) capacidade de transpor obstáculos.

3.2.1 DIMENSÕES DO VEÍCULO

Ao longo do tempo, com a automatização de tarefas e busca por redução de peso, os carros de combate passaram a abrigar um menor número de tripulantes e a possuir equipamentos eletrônicos ou mecânicos de menor porte. Isso permitiu a redução do espaço interno e, conseqüentemente, do tamanho total do veículo. No entanto, para não prejudicar a capacidade de ultrapassar obstáculos, também é necessário um tamanho mínimo de comprimento, como é abordado na parte de Dinâmica Longitudinal deste trabalho.

Os RTA 19, 20 e 21 balizam as dimensões externas do carro de combate. Assim, ele deverá possuir largura máxima de 4 m, vão livre mínimo de 0,4 m e altura máxima de 3 m.

Além disso, para fins de transportabilidade, que está fortemente ligada à mobilidade estratégica, é importante considerar as limitações dimensionais dos meios para transporte do VBC CC, como a AMCP 706-357 (1970) reforça. Para o caso do presente trabalho, as linhas férreas são uma das opções viáveis. De acordo com ABNT NBR 12915 (2019), as dimensões máximas do material rodante devem ser de 3,31 m de largura e 4,93 m de altura, no caso de veículos ferroviários de bitola larga. No entanto, deve-se lembrar que há uma tolerância nessa medida, dado que, segundo a mesma norma, a largura mínima para a via permanente para veículos ferroviários de bitola larga é de 4,90 m.

Para deslocamento em estradas, também é importante considerar as normas vigentes na América do Sul, região de maior possibilidade de emprego dos veículos. Como as vias são projetadas para veículos de no máximo 2,60 m, segundo o DNIT (2012), deve-se ter, pelo menos, 5,20 m de faixa de rodagem total, considerando uma via com pelo menos duas faixas, o que é suficiente. Contudo, o maior limitante não é largura, mas o peso do veículo. A resolução CONTRAN nº 640 de 14/02/2016 permite que veículos de até 91 t trafeguem no país, respeitando as limitações da **Figura 3.4**. É necessário salientar que nem todas as estradas e pontes possuem capacidade para suportar este limite, por estarem de acordo com normas anteriores, o que torna necessário a verificação antes de realizar um trajeto específico.



Figura 3.4 Limite de 91 t distribuídos em 11 eixos, resultando em um comprimento máximo de 30 m (CONTRAN, 2016)

3.2.2 NÚMERO DE TRIPULANTES

Para Rahman et al (2017), um *Main Battle Tank* (MBT) revolucionário possui apenas 3 tripulantes, na região inferior dianteira do veículo, a fim de aumentar o grau de proteção dos indivíduos e para reduzir espaço interno. Um exemplo atual que vai de acordo é o T-14 Armata, último lançamento do Exército Russo. Isso é permitido devido aos sistemas de automatização de tiro e recarregamento das armas empregadas.

De acordo com EB-RTLI-04.062 (2020), RTA 22, o veículo deve ser dimensionado para acomodação de 4 tripulantes, sendo 1 comandante, 1 atirador, 1 auxiliar de atirador e 1 motorista, dada as necessidades do EB. Portanto, considera-se, implicitamente, armas com carregamento não-automáticas e com necessidade de assessoramento para o tiro.

3.2.3 PESO

Como salientado por Ogorkiewicz (1998), grande parte do peso de um veículo militar (40-60%) vem da sua blindagem, cuja área necessária depende diretamente do espaço interno do veículo. Portanto, muitas variáveis de projeto estão ligadas ao peso total.

Além disso, o peso do veículo blindado influencia diretamente na transportabilidade, trafegabilidade e autonomia. Para a próxima geração de VBC CC busca-se a redução do seu peso de combate, sendo o desafio alcançar tal feito sem comprometer a blindagem ou sacrificar recursos essenciais para a supremacia em um eventual combate terrestre, como aborda Rahman et al (2017).

Assim, ao invés de considerá-lo como um fator consequente, é fundamental adotá-lo como variável inicial e restritiva de projeto. Alinhado a isso está a RTA 18, especificando um teto para o peso de combate de 50 toneladas.

3.2.4 CAPACIDADE DE TRANSPOR OBSTÁCULOS

A capacidade de transpor rampas é vital para o emprego do carro de combate em diferentes terrenos. Os RTA 2, 3 e 4 especificam a necessidade da capacidade de dar partida e transpor, com peso de combate, rampas longitudinais de até 60% de inclinação, tanto à frente quanto à ré e em ambas as direções e rampas laterais de 30% de inclinação, à direita ou à esquerda.

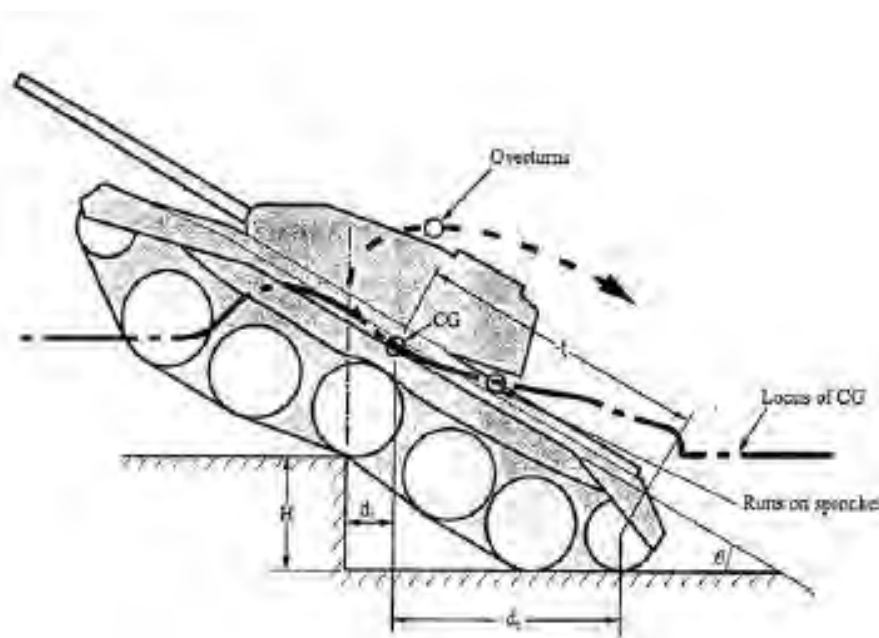


Figura 3.5 Capacidade de transpor obstáculos (Rahman et al, 2017)

A mobilidade tática está diretamente relacionada à capacidade de transpor obstáculos e trincheiras. A geometria da lagarta e das rodas e a posição das polias tensoras devem ser modeladas de forma a obedecer aos RTA 5 e 6, que especificam a necessidade de transpor obstáculo vertical de 1 m de altura (como ilustrado na **Figura 3.5**) e fossos horizontais de 2,5 m de largura. A capacidade de cumprir tais requisitos é objeto de estudo da análise de dinâmica longitudinal do veículo, em seções posteriores do presente trabalho.

Além disso, segundo o RTA 23 de EB-RTLI-04.062 (2020), é necessário haver a possibilidade de fixar um dispositivo de retroescavadeira ou arado na dianteira, compatível com a largura do veículo, a fim de ser utilizado em operações relacionadas à mobilidade.

3.3 PROPULSÃO E TRANSMISSÃO DE FORÇA

O trem de força de um veículo está diretamente relacionado à dinâmica longitudinal. Segundo Jazar (2008), a máxima aceleração de um veículo qualquer é limitada por dois fatores: máximo torque que chega às rodas de apoio e máxima tração desenvolvida pelos pneus. O primeiro aspecto está ligado tanto ao motor quanto à transmissão, enquanto o segundo está ligado aos pneus ou outro meio de contato com o solo que, no caso do presente trabalho, são as lagartas.

Além disso, há a parte elétrica, que possui papel fundamental para a partida do motor, bem como substituí-lo quando o VBC CC se encontra no modo de *silence watch*. Todos esses componentes são estudados a seguir.

3.3.1 MOTOR

Em geral, veículos blindados necessitam de motores altamente potentes, dado o peso elevado. Cresce em importância a busca por elevada razão potência/peso, a fim de proporcionar um mínimo de acréscimo de peso ao veículo, sem prejudicar a satisfação dos requisitos técnicos de velocidade, aceleração e transposição de obstáculos.

Segundo Ogorkiewicz (1998), apenas cerca de 60% da potência do motor consegue ser utilizada para movimentar o veículo. Isso ocorre devido às perdas com a utilização de sistemas auxiliares ligados no motor, como refrigeração e parte elétrica. Além disso, apenas cerca de 90% da energia que chega na transmissão é passada para as lagartas. Por fim, há perdas com a resistência ao rolamento e de gradiente, resultando na porcentagem mostrada inicialmente.

De acordo com EB-RTLI-04.062 (2020), nos RTA 12, 16 e 17, o motor deve:

- a) possuir autonomia de 400 km;

- b) poder ser ligado a temperatura mínima de -1 °C;
- c) ser posicionado na traseira do veículo;
- d) ser compatível com diversos tipos de combustíveis.

Para o caso do Exército Brasileiro, os combustíveis mais comumente utilizados são, de acordo com Diretoria de Abastecimento do Exército Brasileiro (D Abst, 2020) e a experiência:

- a) óleos diesel B do tipo S10, S50 e S500;
- b) gasolina comum e do tipo C;
- c) querosene iluminante e de aviação.

3.3.2 MOTOR DE PARTIDA

Quando o motor já está em funcionamento, todos os sistemas elétricos do veículo funcionam a partir da energia proveniente do alternador. No entanto, quando o motor está desligado, surge a necessidade de uma fonte alternativa para fornecer energia elétrica a alguns sistemas veiculares. Dentre esses sistemas, encontra-se o motor de partida, dado que, segundo Diskett (2008), a energia armazenada em uma bateria serve essencialmente para o(a):

- a) motor de partida;
- b) modo *silence watch*;
- c) HUMS.

Para garantir que o motor de partida seja atendido quando o motor precisar ser ligado, mesmo havendo o consumo de alguns componentes, como aqueles do HUMS, deve-se fazer o dimensionamento da bateria.

De acordo com EB-RTLI-04.062 (2020), nos RTA 69, 70 e 78:

- a) o banco de baterias deve fornecer uma tensão de 24 V nominais;
- b) deve-se utilizar baterias de 12 V;
- c) o sistema elétrico deve sustentar o funcionamento da torre, com motor desligado, por no mínimo 3 horas;
- d) o sistema elétrico deve sustentar o funcionamento da torre, com motor ligado e veículo parado em marcha lenta, por no mínimo 15 min, considerando regime de utilização 1/1/8 (transmissão/ recepção/ espera) por 24 horas ininterruptas.

3.3.3 DINÂMICA LONGITUDINAL

Para especificações básicas do tamanho de um motor, ainda é necessária uma análise de dinâmica longitudinal do veículo. Para checagem de requisitos de aceleração e baseando-se em Ogorkiewicz (1998) e Terry (1991), a resultante das forças resistivas é dada pela Eq. (3.1).

$$F_R = mg (f_R \cos\alpha + \sin\alpha) + m(1 + \lambda)a \quad (3.1)$$

Sendo:

- a) primeira parcela é a combinação da resistência ao rolamento e do gradiente:
 m é a massa total, g é a aceleração da gravidade, α é o ângulo de rampa e f_R é o coeficiente de resistência ao rolamento;
- b) segunda parcela é a resistência inercial: λ é o coeficiente de inercia rotacional e a é a aceleração do veículo.

Mesmo possuindo elevada área frontal (média de 8 m²) e coeficiente de arrasto próximo de 1, Ogorkiewicz (1998) salienta que a resistência aerodinâmica em carros de combate é desprezível em relação às outras. Isso ocorre porque as velocidades máximas atingidas são relativamente baixas, por volta de 60 km/h. Dessa forma, é desprezada nos cálculos para fins deste trabalho.

O coeficiente de resistência ao rolamento varia de acordo com a velocidade do veículo e é dado pela Eq. (3.2).

$$f_R = C_1 + C_2V \quad (3.2)$$

Para veículos com lagartas de borracha e com pino duplo, $C_1 = 0,030$. Para lagartas de metal e pino simples, $C_1 = 0,025$ e para pinos selados e lubrificados, $C_1 = 0,015$. Para grande parte dos casos, $C_2 = 0,009$, de acordo com Ogorkiewicz (1998). Para considerar as deformações do solo, recomenda-se que essa resistência seja multiplicada pelo fator 1,5, segundo o mesmo autor.

Por fim, é fundamental atender aos Requisitos Técnicos Absolutos (RTA) estabelecidos em EB-RTLI-04.062 (2020). Além das especificações básicas já citadas na Seção 3.2, é indispensável, segundo os RTA 8, 9, 10, 11 e 12, o VBC CC:

- a) atingir 32 km/h em 8 s;
- b) manter 60 km/h em uma inclinação de 1%;
- c) manter 20 km/h em marcha a ré e em uma inclinação de 1%;
- d) sustentar velocidade menor que 4 km/h em uma inclinação de 1%.

3.3.4 TRAFEGABILIDADE

A interação do VBC CC com solos deformáveis deve ser levada em consideração para a verificação do dimensionamento das lagartas e rodas de apoio. De acordo com Wong (2001), a modelagem precisa dessa interação é complexa. Assim, modelos empíricos foram desenvolvidos.

Uma das metodologias empregadas é a do *Vehicle Cone Index* (VCI). O VCI é um índice que pode ser comparado com outro índice, o *Rating Cone Index* (RCI) para avaliar a viabilidade de transposição do terreno pelo carro de combate. Enquanto o VCI é calculado a partir de parâmetros do veículo em si, o RCI deve ser obtido experimentalmente no local, utilizando um penetrômetro cônico. De acordo com o *Field Manual* No. 5-430-00-1 (1994), o penetrômetro irá medir a resistência ao cisalhamento de solos macios.

Ainda segundo Wong (2001), para o cálculo do VCI, deve-se primeiro encontrar o Índice de Mobilidade (IM), dado pela Eq. (3.3).

$$IM = \left(\frac{FPC \cdot FP}{FL \cdot FG} + FCR - FDS \right) \cdot FM \cdot FT_r \quad (3.3)$$

Tal que, para carros de combate de 50 toneladas têm-se que o Fator de:

- a) Pressão de contato (FPC) é dado pelo peso do veículo, em libras, dividido pela área das lagartas em contato com o solo, em polegadas;
- b) Peso (FP) é 1,8;
- c) Lagarta (FL) é 1% da largura da lagarta, em polegadas;
- d) Garra (FG) é 1;
- e) Carga na Roda (FCR) é 10% do peso do veículo, em libras, dividido pelo número de rodas de apoio e pela área de uma sapata, em polegadas quadradas.

- f) Distância ao Solo (FDS) é 10% do vão entre o corpo do veículo e o solo, em polegadas;
- g) Motor (FM) é 1;
- h) Transmissão (FTr) é 1.

A partir do IM , pode-se calcular o VCI considerando uma ou cinquenta passadas do VBC CC, conforme as Eq. (3.4) e (3.5).

$$VCI_1 = 7 + 0,2 \cdot IM - \left(\frac{39,2}{IM + 5,6} \right) \quad (3.4)$$

$$VCI_{50} = 19,27 + 0,43 \cdot IM - \left(\frac{125,79}{IM + 7,08} \right) \quad (3.5)$$

Um VBC CC com maior VCI possuirá maior trafegabilidade. Assim, durante o seu dimensionamento, o ajuste das medidas visando elevar o VCI viabiliza o emprego do carro de combate em uma quantidade superior de terrenos. Segundo o Field Manual No. 5-430-00-1 (1994), a maioria dos carros de combate médios possuem VCI_1 e VCI_{50} nas faixas de 26 a 30 e 60 a 69, respectivamente. Já carros de combate de grande porte possuem valores nas faixas de 31 a 35 e 70 a 79, respectivamente.

3.4 SUSPENSÕES

O sistema de suspensões de um veículo sobre lagartas engloba toda a estrutura inferior que permite o amortecimento e absorção de perturbações verticais, o que inclui: molas, amortecedores, rodas de apoio, lagartas e componentes complementares.

De acordo com Ogorkiewicz (1998), as barras de torção, após a 2ª Guerra Mundial, passaram a ser o tipo predominante de suspensão empregada, devido à sua leveza e elevada performance, que são capazes de armazenar grande quantidade relativa de energia por unidade de peso. No entanto, podem ser de difícil manutenção ou troca ao serem danificadas por minas. Além disso, possuem elevada fragilidade superficial quando altamente tensionadas. Assim, ao longo do fim do Século XX, o tipo hidropneumático passa a ser uma opção de substituição, fazendo com que, atualmente, esses dois tipos sejam os mais empregados. Ambos são detalhados a seguir. As suspensões ativas são uma nova realidade, mas ainda não são altamente

difundidas, e com pouco conhecimento na área, não constituindo, assim, parte do escopo deste trabalho.

Portanto, nesta Seção, inicialmente, esses tipos principais são estudados, seguidos do estudo de amortecedores e de rodas de apoio e lagartas. Por fim, faz-se uma rápida fundamentação sobre frequências naturais, que são uma típica forma de obtenção de rigidezes.

3.4.1 SUSPENSÃO COM BARRA DE TORÇÃO

Uma suspensão adequada proporciona um considerável curso útil, bem como elevada rigidez de mola na situação de máxima compressão (*bump*), a fim de evitar impactos excessivos nos batentes. Para barras de torção, Ogorkiewicz (1998) salienta dois pontos que podem permitir isto: comprimento adequado da barra e resistência mecânica elevada.

O comprimento efetivo da barra pode ser aumentado por meio da utilização de barras em paralelo, resultando em um comprimento equivalente maior, já que a largura do carro de combate é um limitante. No entanto, este artifício eleva o peso do veículo e gera pontos específicos de fragilidade.

Já a resistência mecânica adequada é conquistada por meio do uso de materiais que permitem elevados ângulos de rotação sem sofrerem fratura por cisalhamento ou por fadiga. Além disso, processos modernos, como a refusão por escória eletrolítica, permitem a elevação da resistência à fadiga por cisalhamento. Essa evolução, como relatado por Ogorkiewicz (1998), é possível de ser vista no Leopard 2, cujo curso total é de 350 mm, bem maior que os 200 mm típicos do período da 2ª GM.

Para o dimensionamento da barra de torsão, Maclaurin (2018) destaca que existem alguns principais fatores que reduzem a tensão máxima de cisalhamento:

- a) braços de suspensão maiores;
- b) barras mais resistentes, seja pelo maior diâmetro ou maior módulo de elasticidade;
- c) maior número de rodas.

Para a modelagem de uma barra de torção, é preciso achar seu valor de rigidez equivalente vertical. Para isso, utiliza-se a abordagem feita por Fathy e Salem (2009). Seja uma barra de torção de comprimento L , momento polar de inércia J e módulo de elasticidade transversal G acoplada a um braço de comprimento a . A **Figura 3.6** mostra uma representação do conjunto descrito pela lateral do veículo.

Define-se o ângulo β_0 como o ângulo formado entre o braço e a direção horizontal na situação de eixo descarregado. Nesse caso, o ponto A representa a posição do centro da roda.

Para a obtenção da equação constitutiva de cada mola, supõe-se um deslocamento angular β , um deslocamento vertical da roda f_w e uma força P_w de acordo com o referencial ISO 4130 (2007), de forma que o ponto B represente a posição do centro da roda.

Na posição de máximo deslocamento vertical da roda, a posição de seu centro é representada pelo ponto C e o ângulo β assume um valor $\beta_{m\acute{a}x}$.

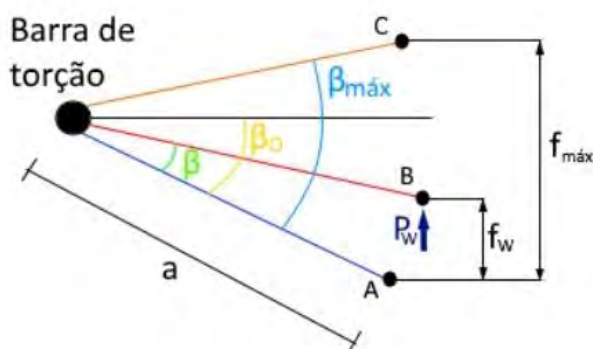


Figura 3.6 Barra de Torção e Braço de Suspensão em diferentes instantes

Como obtido por Fathy e Salem (2009), tem-se a carga vertical atuando na roda, dada pela Eq. (3.6).

$$P_w = \frac{\pi d^4 G}{32 a L} \cdot \frac{\beta}{\cos(\beta_0 - \beta)} \quad (3.6)$$

Além disso, por meio de relações geométricas da **Figura 3.6**, é possível obter o deslocamento vertical f_w da roda na Eq. (3.7).

$$f_w = a \cdot \sin(\beta_0) - a \cdot \sin(\beta_0 - \beta) \quad (3.7)$$

Para o modelo de meio carro, considera-se molas lineares e de eixo vertical. Para este tipo de mola, é válida a relação da Eq. (3.8).

$$F = kx \quad (3.8)$$

sendo F a força vertical e x o deslocamento vertical.

A partir das Eq. (3.6) e (3.7), variando os valores de β , é possível construir um gráfico P_w por f_w , obtendo uma curva não linear que é a relação constitutiva do modelo de suspensão adotado. Para simplificar a modelagem, pode-se tomar o valor médio, dado pela Eq. (3.9).

$$k_{s,m\u00e9dio} = \frac{P_w}{f_w} \quad (3.9)$$

3.4.2 SUSPENSÃO HIDROPNEUMÁTICA

A grande vantagem deste tipo de suspensão é a grande não-linearidade da força que é suportada em função da deflexão, segundo Ogorkiewicz (1998). Para pontos próximos à posição estática, é possível obter baixa rigidez equivalente e, conseqüentemente, baixas frequências naturais. Por outro lado, para pontos próximos ao limite de *bump*, a rigidez equivalente é bem mais elevada, evitando impactos desnecessários com os batentes.

Além disso, este tipo costuma ser bem mais leve e ocupar bem menos espaço que uma barra de torção. Dessa forma, pode ser um fato decisivo no momento de se definir qual categoria será utilizada. Por possuir um fluido interior, este pode ser canalizado por uma bomba, de forma a ser transferido de uma unidade para outra, caso necessite-se alterar o ângulo do *pitch*.

3.4.3 AMORTECEDORES

Os dois principais objetivos dos amortecedores são: controlar a ressonância e reduzir a transmissão de forças. Dessa forma, de acordo com Ogorkiewicz (1998), a razão de amortecimento gira em torno de 0,2 e 0,4 para amortecedores hidráulicos, que são os mais comuns.

Uma outra questão dos amortecedores diz respeito ao posicionamento e quantidade. Em geral, a frequência mais problemática, de acordo com Ogorkiewicz (1998) é a de *pitch*, por ser mais reduzida e mais incômoda. Dessa forma, no passado, utilizava-se amortecedores apenas na roda de apoio dianteira e na traseira. No entanto, à medida que a velocidade máxima de um carro de combate passa a ser maior, o *bounce* se torna importante e o veículo passa a ter amortecedores nas outras rodas. Então, como ressaltado por Dühr e Sankar (1995), há a necessidade de amortecedores em todas as rodas de um veículo desse tipo.



Figura 3.7 Representação de um Amortecedor

Da mesma forma que para a rigidez, pode-se obter um coeficiente de amortecimento equivalente vertical, de acordo com Fathy e Salem (2009). Um esquema mostrando a disposição espacial de um dos amortecedores pode ser visto na **Figura 3.7**.

Quando é imposto ao amortecedor um deslocamento no eixo vertical z a uma certa velocidade positiva \dot{z} , o amortecedor está sujeito a um deslocamento x e a uma velocidade positiva \dot{x} , e reage produzindo uma força de intensidade $F = c\dot{x}$ de sentido oposto ao da velocidade.

Como o eixo do amortecedor possui uma inclinação γ em relação à direção vertical, deve-se obter a força vertical associada a um deslocamento vertical da roda.

O coeficiente de amortecimento resultante na direção vertical c_s é a razão entre a força de reação vertical e a velocidade de deslocamento vertical, conforme a Eq. (3.10) dada por Fathy e Salem (2009).

$$c_s = \frac{F_y}{\dot{z}} = c \cdot \cos^2 \gamma \quad (3.10)$$

No entanto, quando a suspensão trabalha, o ângulo γ varia. Dessa forma, será necessária uma análise semelhante àquela da Seção 3.4.1 para a obtenção de um coeficiente de amortecimento médio. A **Figura 3.8** mostra o arranjo espacial do amortecedor juntamente com o braço de barra de torção. O ponto D é o ponto de ancoragem do amortecedor no chassi, enquanto os pontos A, B e C representam o centro da roda. O amortecedor é representado como a linha ligando o ponto D a cada um dos pontos A, B e C.

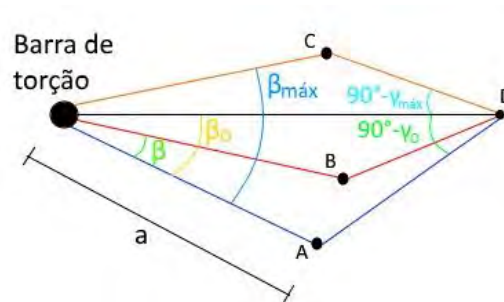


Figura 3.8 Representação conjunta do amortecedor e do braço de suspensão

Para os limites geométricos de operação, calcula-se o valor médio m da função $\cos^2\gamma$. O valor médio para o coeficiente de amortecimento vertical é dado, então, pela Eq. (3.11).

$$c_{s,m\u00e9dio} = c \cdot m \quad (3.11)$$

3.4.4 RODAS DE APOIO

De acordo com Ogorkiewicz (1998), quanto maiores as rodas de apoio de um VBC CC, menor a resistência ao rolamento, o que favorece o deslocamento do veículo. No entanto, o menor diâmetro das rodas, o que implica maior quantidade de unidades, melhora a distribuição de peso, reduzindo pontos de concentração de pressão. Portanto, diâmetros entre 600 mm e 800 mm são os mais utilizados, com 5 a 7 rodas em cada lado.

Em geral, a roda é metálica e envolvida por uma fina camada sólida de borracha, com cerca de 50 mm de espessura, como aponta Ogorkiewicz (1998), e com uma largura adequada de, no máximo, 150 mm. A pequena espessura reduz o

superaquecimento gerado pelas perdas por histerese da borracha, enquanto a maior largura contribui para a melhor distribuição de carga.

3.4.5 LAGARTAS

Além das rodas de apoio, um outro importante componente da massa não-suspensa é a lagarta, cujas duas principais funções, segundo Ogorkiewicz (1998) são: distribuir a pressão do veículo sobre o solo, evitando atolamentos; transmitir a força de tração proveniente do motor para o solo, a fim de deslocar o veículo. Além disso, a lagarta é composta por várias placas, chamadas comumente de sapatas, que podem ser simples ou duplas, e que são conectadas por pinos simples ou duplos. Esse arranjo é essencial para definir a pressão sobre o solo e a durabilidade do sistema. Essas conexões por pinos podem ser secas ou com bucha. No primeiro tipo, de acordo com Maclaurin (2018), há a desvantagem de acelerado desgaste em ambientes úmidos e abrasivos, mesmo utilizando manganês na composição do material. Já no segundo, são utilizadas buchas de borracha, o que confere maior durabilidade, mas maior custo.

Para a definição do passo da lagarta, é importante considerar que passos maiores possibilitam menor peso, embora gerem maior angulação de cada sapata e consequente elevação de ruídos e vibrações, como Maclaurin (2018) retrata.

3.4.6 FREQUÊNCIAS NATURAIS

As frequências naturais do chassi de um veículo são fundamentais para definir o nível de conforto para seus tripulantes, seja ele leve ou pesado. De acordo com Ogorkiewicz (1998), as frequências de *bounce* giram em torno de 1 Hz, enquanto que a de *pitch* usualmente assume valores mais reduzidos, por volta de 0,8 Hz.

Um dos modelos mais adotados, por sua simplicidade e eficácia, é o Modelo Bicicleta, no qual o veículo é observado lateralmente, de modo a se obter as frequências de *bounce* e de *pitch*, apenas. Mesmo desconsiderando não-linearidades e batentes, é um modelo de rápida obtenção de resultados para uma avaliação geral do sistema de suspensão, que é um dos objetivos desse trabalho.

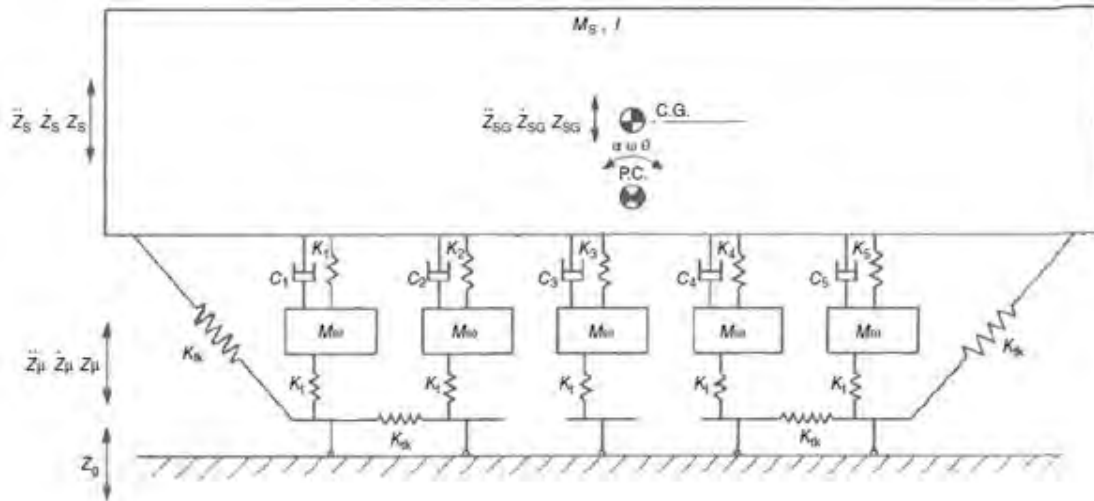


Figura 3.9 Diagrama de Corpo Livre par um VBC CC (Maclaurin, 2018, modificado)

Dessa maneira, o diagrama de corpo livre do sistema fica como observado na **Figura 3.9**.

As hipóteses adotadas, de acordo com o Maclaurin (2018), são:

- chassi rígido;
- ângulos de *pitch* são pequenos;
- os movimentos da suspensão são perpendiculares ao chassi;
- os pneus possuem um único ponto de contato com o solo;
- o terreno é rígido;
- o amortecimento dos pneus e da lagarta são desprezados.

A partir disso, pode-se achar as frequências naturais do sistema. Aprofundando um pouco mais o modelo, considerando rigidezes não-lineares, é possível modelar um diagrama de blocos, para observação do comportamento do veículo para diferentes perturbações de base, como será visto posteriormente.

3.5 PROTEÇÃO

A proteção de um veículo blindado envolve muitos aspectos, como proteção interna, defesa contra RPG, sistema antiminas e até mesmo, para o cenário atual, contra dispositivos improvisados (IED, em inglês). Contudo, este trabalho se limita à discussão da blindagem utilizada e, nos resultados, apenas ao material e estimativa de espessura da estrutura.

Dadas as especificações do restante do veículo, consideradas indispensáveis, pode-se projetar uma blindagem adequada, que proteja todos os outros subsistemas, mas também seguindo os requisitos necessários de espaço, desempenho e segurança.

A Blindagem de um VBC CC, em geral, é definida pela capacidade de destruição dos armamentos utilizados pelo inimigo. Dessa forma, ao longo do Século XX, a capacidade de proteção para os tripulantes desta arma foi questionada, colocando o seu uso em severo risco.

Diversos materiais já foram sugeridos e empregados para blindagem, dentre eles ligas de alumínio (empregadas no M113) e até mesmo ligas de magnésio, de acordo com Hazell (2016). No entanto, segundo Oliveira (2015) e Singh et al (2017), os principais materiais utilizados pelos carros de combate são:

- a) Aços para Blindagem: Homogênea Laminada, Média Dureza, Alta Dureza, com Alto Teor de Nitrogênio;
- b) Materiais Cerâmicos: à base de alumina;
- c) Compósitos para Blindagem: Laminados com Vidro e tipo Kanchan;
- d) Materiais Reativos: Explosivos e Não-explosivos.



Figura 3.10 Principais materiais para blindagem

Como um resumo, antes de uma análise mais detalhada, Horsfall (2008) apresenta os materiais de acordo com 3 principais propriedades, como visto na **Figura 3.10**.

3.5.1 AÇOS PARA BLINDAGEM

De acordo com Hazell (2016), os aços em geral são os materiais mais utilizados para blindagem, devido à resistência mecânica, dureza, resistência à fadiga, fácil fabricação, soldabilidade e baixo custo.

A primeira categoria a ser abordada é a de aços para blindagem homogênea laminada, mais conhecido como RHA, que é sua sigla em inglês. Formando uma estrutura martensítica temperada e endurecida, era o tipo mais comumente utilizado, por ser de baixo custo relativo, ter boa resistência e ser de fácil obtenção, segundo Singh et al (2017). Contudo, foi substituída por aços melhores e se tornou a referência de comparação para o principal teste da área: o DOP (Profundidade de Penetração, em inglês).

A segunda categoria é de aços para blindagem de média dureza, que são obtidos através da otimização de tratamentos térmicos sequenciais no RHA. Dessa forma, é possível obter, de acordo com Singh et al (2017), uma dureza 50% maior e penetração de 20% a 25% menor. No entanto, mesmo apresentando uma maior resistência mecânica e dureza, a desvantagem obtida é a menor resistência ao impacto e redução do grau de soldabilidade.

A terceira categoria, segundo o mesmo autor, é de aços para blindagem de alta dureza, conhecidos como HHA, que é sua sigla em inglês. Estes são indicados para suportar o impacto de um projétil perfurante de alta energia cinética, devido sua dureza, que chega a ser quase o dobro do RHA. Isso faz com que a profundidade de penetração caia drasticamente. Além disso, segundo Oliveira et al (2019), este material evita o estilhaçamento da blindagem, por agregar dureza e tenacidade interna. Portanto, é um dos mais utilizados atualmente para a finalidade de blindagem de veículos, quando com a composição e tratamento térmico adequados.

Como abordado por Monaco (2004), alguns aços de origem nacional brasileira já foram utilizados em blindagem, e eram uma combinação dos dois anteriores, também chamados de cladeados, isto é, com uma camada externa de alta dureza e uma interna de alta tenacidade, de fabricação da Usiminas. No entanto, com o desmonte da indústria bélica nacional, esse processo de nacionalização perdeu força.

Mesmo assim, no fim de 2017, um novo aço desenvolvido pela Usiminas foi homologado para emprego em chapas no Guarani, o VBTP do Exército Brasileiro. O material, chamado de USIPROT 500, deu origem a placas que atendem as normas de MIL DTL 46100E, que é referência mundial. Contudo, as placas fabricadas resistem apenas a tiros de calibre 7,62 mm perfurante a 100 m, com angulação de 0 graus. A espessura é omitida deste trabalho por motivos de confidencialidade.

Por fim, como uma nova tendência ainda em estudo, há os aços para blindagem com alto teor de nitrogênio e baixo teor de carbono, obtendo grande vantagem devido ao reduzido peso. Quando comparado ao RHA, de acordo com Singh et al (2017), possui desempenho balístico 35% melhor contra munições menores e melhora de 10% contra munição de alta energia cinética.

Mesmo com suas desvantagens, o aço ainda é o principal material para blindagem de veículos sobre lagartas, sendo também o de maior possibilidade de nacionalização, devido a sua boa relação custo-benefício, como abordado por Gorni (2008).

3.5.2 MATERIAIS CERÂMICOS

Os materiais cerâmicos, segundo Akella e Naik (2015), são bem mais leves e resistentes ao impacto do que metais, mas de alto custo de processamento, em geral, devido à necessidade de elevadas temperatura e pressão.

Monaco (2004) relata que blindagens de cerâmica à base de alumina foram inicialmente testadas por volta do começo dos anos 2000 no Brasil, mas acabaram perdendo força com o enfraquecimento da base industrial de defesa.

A alumina, por possuir elevada dureza e ser de fácil obtenção, segundo Assis (2007), torna este material a principal cerâmica utilizada para fins de blindagem atualmente. Em geral, esse material é usado como blindagem adicional, constituindo-se de placas cerâmicas justapostas sobre um polímero, segundo Chagas et al (2015), que são colocadas sobre a blindagem fixa de aço.

Dessa forma, como sugestão de resultados ótimos, deve-se utilizar o poliuretano como polímero, bem como acrescentar um dispositivo de proteção de

interface sobre o mosaico cerâmico formado, a fim de mitigar o efeito de aresta, como Chagas et al (2015) relata. O efeito de aresta é justamente causado pelo impacto nas regiões próximas às extremidades de uma placa cerâmica, causando trincas e estilhaçamento.

3.5.3 COMPÓSITOS PARA BLINDAGEM

Ao combinar diferentes materiais, os compósitos permitem propriedades mistas, garantindo melhores resultados. Como principal característica comum, há a redução no peso da blindagem, quando comparado ao aço. Os compósitos laminados de vidro, segundo Singh et al (2017), por exemplo, apresentam necessidade de maior espessura, quando comparados ao RHA, mas uma menor massa total.

Em geral, existem dois tipos de compósitos para esse propósito, segundo Akella e Naik (2015): compósitos de cerâmica e de polímeros reforçados com fibra. Atualmente, materiais compósitos com elevada absorção de energia específica são as características ideais. Essa combinação é justamente encontrada em compósitos, como epóxi laminados com E-vidro. Além disso, processos como o confinamento e o *wrapping* da cerâmica aumentam consideravelmente o desempenho em teste balístico contra munição 7,62 mm.

Um dos primeiros tipos de blindagem compósita a surgir foi feita pelos britânicos, sendo chamada de Chobham, onde havia uma placa cerâmica entre duas placas de aço, segundo Akella e Naik (2015). Esse tipo de blindagem, em geral, tem bom desempenho contra projéteis de alta energia cinética, diferentemente do RHA.

Atualmente, o maior desafio científico é achar o melhor espaçamento entre as diversas placas de uma blindagem, bem como quais materiais devem constituir essas camadas. Nesse contexto, a blindagem do tipo Kanchan apresenta-se com elevada absorção cinética e boa performance no teste de Profundidade de Penetração (DOP, em inglês), quando comparado aos demais, segundo Singh et al (2017). No entanto, ainda é um tipo em desenvolvimento inicial. Além disso, Hazell (2016) aponta as blindagens com uma camada fina, mas resistente, e um núcleo pouco resistente, com forma de colmeia ou triangular, a fim de dar maior leveza sem prejudicar a capacidade de proteção.

No Brasil, a empresa Alltec desenvolveu, juntamente com o Exército Brasileiro, algumas placas compósitas para o VBTP Guarani, a fim de protegê-lo contra disparos a 0 graus, a uma distância de 100 m, de calibre .50.

3.5.4 MATERIAIS REATIVOS PARA BLINDAGEM

Os materiais reativos são utilizados para reduzir a capacidade de penetração do projétil ao absorver boa parte de sua energia cinética antes de o veículo ser atingido de fato, com um intervalo de tempo de milissegundos.

Para os materiais dessa categoria que são explosivos, uma quantidade de explosivo é colocada entre duas placas de metal. Ao sofrer o impacto, segundo Singh et al et al (2017), uma das placas é lançada contra o projétil, devido à elevada pressão gerada no pequeno espaço entre as placas, de forma a consumi-lo e retirar energia cinética.

Já o tipo não-explosivo é formado por duas placas de aço preenchidas com um material inerte, de modo a se separarem na região central e se manterem unidas nas extremidades, expandindo-se como uma bolha, no momento do impacto. Dessa forma, reduz-se a propagação de energia e a capacidade de penetração, quando comparado ao RHA.

3.5.5 ESTIMATIVAS DE PROJETO

Para o projeto deste componente, considera-se que o chassi tem como função abrigar todos os componentes internos do veículo, incluindo os tripulantes. Dessa forma, na sua modelagem, é necessário considerar sua capacidade de se proteger de ameaças externas, bem como definir pontos fracos, já que um veículo completamente protegido teria um peso excessivo, o que prejudicaria a mobilidade.

Para o início do projeto de uma viatura blindada, independente da blindagem, é necessário haver uma estrutura básica que tenha certa capacidade de suportar impactos. Essa estrutura não se trata da blindagem principal como um todo, mas apenas parte dela.

Como a região frontal e superior posterior do veículo é a de maior probabilidade de ataque, costuma-se utilizar uma espessura mais acentuada nessa região, como observado por Costa Neto (2020).

Para o cálculo da espessura da blindagem de um veículo, há diferentes maneiras, dependendo do tipo de munição empregada e do material da blindagem. Como ponto de partida, e que é utilizado nesse trabalho, pode-se utilizar a formulação dada por Costa Neto (2020) na Eq. (3.12).

$$\frac{m_p \times v^2}{d^3} = C \times \left(\frac{t}{d}\right)^n \quad (3.12)$$

onde:

- a) m_p é a massa do projétil utilizado;
- b) v é a velocidade terminal do projétil;
- c) d é o diâmetro do projétil;
- d) t é a espessura necessária para blindagem;
- e) C e n são constantes experimentais.

3.5.6 REQUISITOS TÉCNICOS, LOGÍSTICOS E INDUSTRIAIS

Além disso, EB20-RTLI-04.062 (2020) define e limita alguns pontos essenciais a serem considerados.

Dada a conjuntura mundial atual, os RTA 40, 42, 43 e 49 definem, em igual grau de importância, que o veículo deve ser totalmente à prova de:

- a) calibre 7,62 mm x 51 AP, disparado à 0° e à distância mínima 50 m;
- b) calibre 0.30" (M1) ou perfurante, disparado à 0° e à distância mínima de 100 m;
- c) calibre 14,5 mm do tipo perfurante incendiária, disparado à 0° de elevação e à distância mínima de 200 m;
- d) estilhaços de granada de artilharia autoexplosiva de 155 mm, considerando uma distância mínima de explosão de 25 m, conforme o nível 5 da norma STANAG 4569.
- e) explosões de mina anticarro de até 10 kg em toda a região inferior;

- f) estilhaços que penetrem na blindagem básica, por meio da redução em, no mínimo, 75% da área de espalhamento, causados por RPG 7 ou ameaças definidas para a blindagem básica.

Além disso, segundo os RTA 41, 46 e 47 desta mesma Portaria do Exército Brasileiro, o veículo deve ser capaz de incorporar, em igual grau de importância, blindagem à prova de:

- a) calibre de até 120 mm do tipo APDS-T, disparado à uma distância mínima de 1000 m contra a parte frontal do volume blindado;
- b) munição HEAT de até 84 mm lançada por arma leve anticarro contra os pontos de maior incidência na frente, flancos e retaguarda;
- c) calibre 125 mm, conforme a norma MIL-DTL-12560K, equivalente a 900 mm RHA.

3.6 PODER DE FOGO

O sistema de armamento se localiza na parte superior do carro de combate. É a amplitude de 360° no movimento da torre que possibilita o seu direcionamento independente do chassi. Este trabalho foca apenas no sistema de armamento principal, de maior calibre e alcance, e no sistema de armamento secundário, de menor calibre, porém com maior cadência de tiro e maior disponibilidade de munições.

3.6.1 SISTEMA PRINCIPAL

O desenvolvimento de um sistema de armamento principal deve levar em consideração aspectos como calibre e dimensões gerais das munições empregadas, a forma como será feito o carregamento da munição e como ela será armazenada. Análises de letalidade seletiva não são consideradas nessa etapa.

3.6.1.1 CARREGAMENTO

O carregamento do armamento principal pode ser feito de forma manual ou automática. No caso manual, há a necessidade do auxiliar do atirador, que fará o manuseio da munição, retirando-a do cofre de munições e inserindo-a na culatra. Esse

é o caso, por exemplo, do Leopard 1A5, que compõe a frota de blindados do Brasil; do M1A2 Abrams, do exército americano; e do Challenger 2, adotado pelo exército britânico. O carregamento automático elimina a necessidade de um dos tripulantes, substituindo-o por um mecanismo que deverá fazer o carregamento. Um exemplo recente que faz uso de carregamento automático é o T-14 Armata, isolando os 3 tripulantes na parte frontal do veículo, segundo Bühler (2018), e aumentando a capacidade de sobrevivência. Assim, a torre é inabitada e controlada remotamente da região frontal e inferior do chassi.

O emprego de cada sistema apresenta vantagens e desvantagens. A cadência de tiro com um sistema automático é constante, enquanto em um sistema manual o tempo para carregar a munição depende de diversos fatores como a habilidade do auxiliar do atirador, da sua disposição física e mental e da posição em que a munição a ser utilizada se encontra armazenada no cofre. Em contrapartida, a complexidade em um sistema automático é maior, gerando maiores custos de produção e manutenção e prejudicando mais a confiabilidade. Além disso, a capacidade de armazenamento de munições ao se utilizar um sistema manual é maior, pois não se ocupa espaço com o mecanismo que fará a seleção e carregamento da munição.

3.6.1.2 ARMAZENAMENTO DA MUNIÇÃO

Existem duas configurações usuais para o armazenamento da munição em veículos com carregamento automático, segundo Way (2006). O primeiro é do tipo Carrossel. Nesse caso, as munições são dispostas circularmente no centro da torre. Devido ao espaço reduzido, o projétil e o propelente são desengastados, podendo ambos estarem dispostos horizontalmente ou dispostos em um ângulo de 90° entre si, conforme a **Figura 3.11**. A segunda configuração de carregador automático é do tipo *Bustle*. Nesse caso, a munição é alojada em um compartimento na parte traseira da torre. Exemplos do uso dessa configuração são o francês Leclerc e o sul-coreano K2 Black Panther, conforme a **Figura 3.12**.

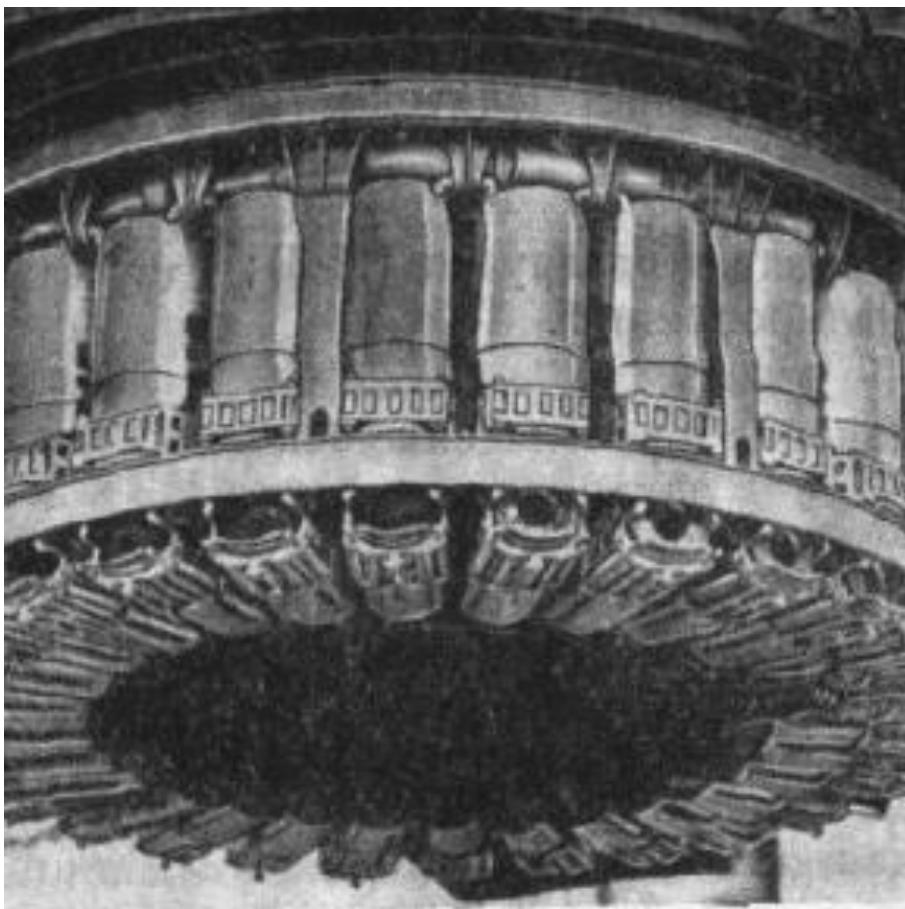


Figura 3.11 Munição dividida posicionada em carrossel (Autor desconhecido)



Figura 3.12 Carregador automático presente no K2 Black Panther (Fighting Vehicles, 2020)

A vantagem de se isolar a munição na parte traseira é proteger a tripulação e o veículo no caso de ignição acidental dos cartuchos. Algumas causas que podem acarretar isso, de acordo com a MIL-HDBK-684 (1995), são: penetração de projétil de energia cinética, estilhaços de componentes internos devido à penetração balística, curto-circuito de componentes elétricos ou calor gerado por incêndio no interior do veículo. Por outro lado, o armazenamento das munições abaixo da torre contribui para a diminuição do seu volume e conseqüentemente da probabilidade de ser atingida, por reduzir a silhueta total.

3.6.1.3 CALIBRE

Os principais calibres de armamento principal encontrados em carros de combate em uso atualmente são de 105mm, 120mm e 125mm. Com o avanço no desenvolvimento dos materiais empregados na blindagem dos carros de combate, o calibre de 105mm, apesar de ainda utilizado, encontra-se defasado, segundo Canéppelle (2018).

O calibre de 120mm é atualmente o padrão adotado pela OTAN, enquanto o calibre de 125mm é adotado pela Rússia, conforme a **Tabela 3.1**. Vale ressaltar, porém, que tais dimensões já estão presentes nos carros de combate há décadas. O carro de combate soviético T-64A, de 1969, por exemplo, já contava com o canhão 125mm D-81, segundo Osinski (2006).

Recentemente, a empresa Rheinmetall apresentou seu novo canhão de 130mm, competindo com o canhão de 140mm da francesa Nexter, segundo Bastos (2020). A busca por maior poder de penetração através do aumento do calibre empregado, é acompanhada das desvantagens como o maior volume ocupado, possibilitando o armazenamento de menos unidades, além de maior peso de cada munição, dificultando o seu manuseio. Um comparativo entre o poder de penetração de uma munição flecha de diferentes calibres pode ser visto na **Figura 3.13**.

Tabela 3.1 Relação de MBT e seu armamento principal (Adaptado de Canépele, 2018).

<i>Carro de Combate</i>	<i>País de origem</i>	<i>Canhão</i>	<i>Calibre</i>	<i>Alma</i>
MBT Challenger 2	Inglaterra	Royal Ordnance L11A5 ou L30	120mm	Raiada
MBT Leclerc	França	GIAT CN120-26/52		Lisa
MBT Leopard 2	Alemanha	<i>Rheinmetall</i> L44 ou L55		Lisa
MBT K2 Black Panther	Coreia do Sul			Lisa
MBT Type 90	Japão			Lisa
MBT M1A2 Abrams	EUA	<i>Rheinmetall</i> M256 L44		Lisa
MBT Merkava Mk4	Israel	IMI L44		Lisa
MBT T-90 (e outros)	Rússia	2A46 L48	125mm	Lisa

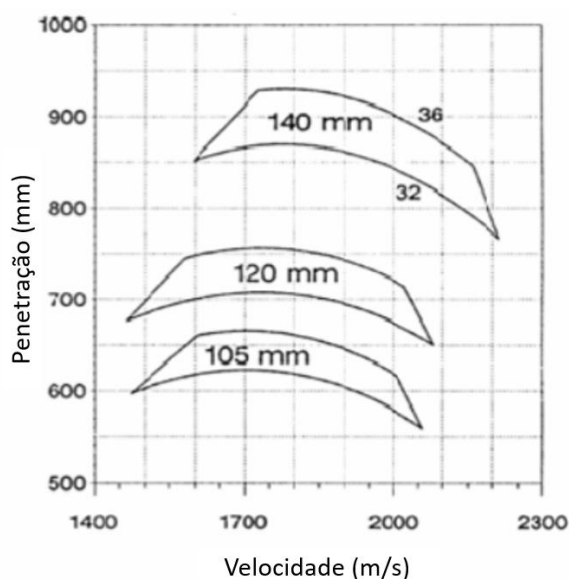


Figura 3.13 Penetração de munição flecha em função do calibre (Lanz e Odermatt, 1992, adaptado).

3.6.1.4 MUNIÇÃO

Diversos tipos de munição foram e vem sendo desenvolvidos para utilização no armamento principal dos carros de combate. Além do calibre, o comprimento do cartucho e do projétil devem ser considerados no projeto, para que haja espaço suficiente no cofre de munições para uma variedade de munições de diferentes

fabricantes. Além disso, o projétil precisa ser compatível com o mecanismo de carregamento automático, caso haja um, e com o canhão empregado no carro de combate. Alguns tipos de munição e as respectivas aplicações encontram-se listadas na **Tabela 3.2**.

Tabela 3.2 Exemplos de munição e emprego (Elbit Systems e General Dynamics, 2010)

<i>Munição</i>	<i>Categoria</i>	<i>Fabricante</i>	<i>Comprimento(mm)</i>	<i>Peso (Kg)</i>	<i>Aplicação</i>
M338	APFSDS-T	Elbit Systems	984	21	Penetração em VBC CC
120mm KE-W A1		General Dynamics	Não informado	19,6	
M339	HE-T	Elbit Systems	984	17	Destruição de bunkers, fortificações e estruturas urbanas
120mm IM HE-T		General Dynamics	943	25	
M325	HEAT	Elbit Systems	984	25	Combate a veículos blindados de médio porte e infantaria
M337	<i>Stun</i>	Elbit Systems	814	13,5	Granada de luz não-letal para conflitos de baixa intensidade
120mm M1028	CANISTER	General Dynamics	780	22,9	Combate a infantaria, através da dispersão de esferas de tungstênio

3.6.2 SISTEMA SECUNDÁRIO

Em geral, um sistema secundário de armas tem a função de atingir alvos mais próximos e de modo mais ágil, de forma a manter a integridade do VBC CC.

Apesar de não haver um desenvolvimento nacional para um canhão de grande porte necessário para o sistema primário, o Exército Brasileiro projetou e homologou,

em parceria com a empresa civil Ares, um Sistema de Armas Remotamente Controlado (SARC) chamado de Reparo de Metralhadora Automatizado X (REMAX). Dessa forma, não se faz necessário uma abordagem detalhada desse subsistema no presente trabalho.

3.6.3 REQUISITOS TÉCNICOS, LOGÍSTICOS E INDUSTRIAIS

Como definido por portaria do Exército Brasileiro, de acordo com EB20-RTLI-04.062 (2020), nos RTA 191, 192, 193, 196, 201 e 207, deve-se ter um sistema de armamento principal tal que:

- a) o comprimento total do veículo, com canhão a frente, não ultrapasse 12,00 m;
- b) o canhão principal deve ter calibre 120 mm e alma lisa, seguindo o padrão OTAN;
- c) haja ajuste em deriva de 360° e de elevação de -9° a 20°, permitindo disparos em movimento;
- d) o sistema observação, direção e controle de tiro sejam independentes;
- e) a capacidade de armazenamento de munições principais seja de 40 unidades, com 12 de uso imediato, no mínimo;
- f) seja possível utilizar munição padrão OTAN;
- g) haja um sistema de recolhimento de estojos e elos em cofres ou recipientes próprios.

Já para o sistema secundário, os RTA 196, 202, 203 e 206, delimitam que deve haver:

- a) uma capacidade mínima de armazenamento de 5000 munições de calibre 7,62 x 51 mm em cofre padrão OTAN, conforme a norma MIL-DTL-3060G;
- b) uma metralhadora coaxial de calibre 7,62 mm padrão OTAN que possa ser carregada automaticamente, sendo previamente alimentada, permitindo ainda disparo manual em modo degradado, e possuir deriva de 360° e elevação de -20° a 85°;
- c) um sistema de recolhimento de estojos e elos em cofres ou recipientes próprios.

4 MODELAGEM MATEMÁTICA

Para fins deste trabalho, são consideradas as modelagens matemáticas do trem de força e do sistema de suspensão.

4.1 PROPULSÃO E TRANSMISSÃO DE FORÇA

No que diz respeito ao trem de força, são analisados os seguintes aspectos: a dinâmica longitudinal, a mobilidade táctica, o estudo de autonomia e o dimensionamento da quantidade de baterias, a fim de permitir um bom funcionamento do motor de partida e de outros componentes.

4.1.1 DINÂMICA LONGITUDINAL

Com o objetivo de analisar quantitativamente o desempenho longitudinal do carro de combate, é feita uma modelagem em ambiente Simulink[®]. O modelo, ilustrado na **Figura 4.1**, leva em consideração as forças de resistência ao rolamento, à rampa e o coeficiente de inércia rotacional, presentes na Eq. (3.1). Conforme exposto na Seção 3.3.3, para carros de combate, a força de resistência aerodinâmica é desprezível perante as outras forças resistivas.

A força trativa que chega às polias é calculada a partir da curva de torque do motor e da redução na transmissão, que engloba o conversor de torque, a caixa de transmissão automática e a redução final do sistema. Ressalta-se, contudo, que é feita a simplificação do modelo considerando apenas relações de transmissão fixas, isto é, desconsiderando os efeitos do conversor de torque. Através deste modelo, pode-se realizar o *matching* do motor com o sistema de transmissão, visando atender aos requisitos de desempenho definidos do RTA 8 ao 12, descritos na Seção 3.3.

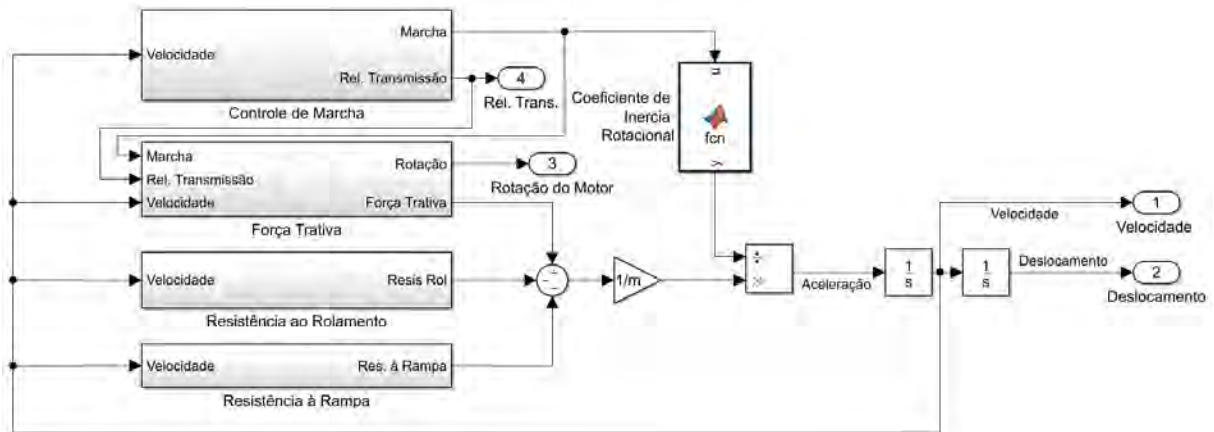


Figura 4.1 Modelagem em Simulink® da dinâmica longitudinal

O motor avaliado na simulação é o MT 892, que é um motor a diesel de 10 cilindros da fabricante MTU. A curva de torque do motor pode ser vista na **Figura 4.2**.

Para serem utilizados na simulação, os trechos indicados em azul e laranja são aproximados pelos polinômios das Eq. (4.1) e (4.2), respectivamente.

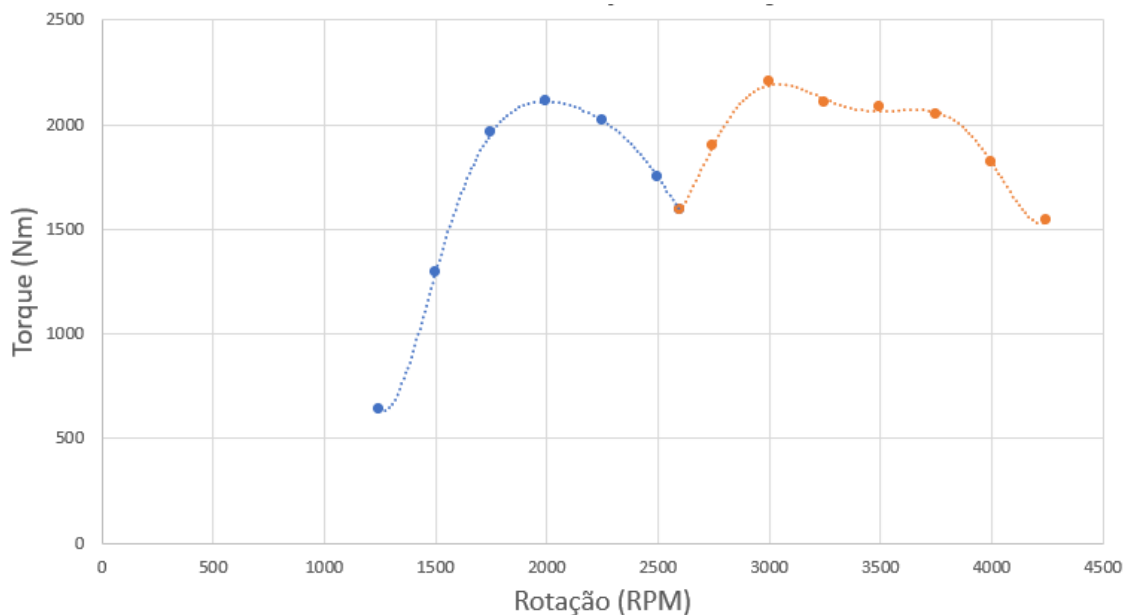


Figura 4.2 Curva de torque do motor MT 892 (Adaptado de MTU, 2020)

$$\begin{aligned} \text{Torque} = & 8,01334 \cdot 10^{-15} \cdot w^6 - 9,90675 \cdot 10^{-11} \cdot w^5 + 5,04969975206504 \\ & \cdot 10^{-7} \cdot w^4 - 1,35650 \cdot 10^{-3} \cdot w^3 + 2,02027 \cdot w^2 - 1575,33069 \\ & \cdot w + 501465,25957 \end{aligned} \quad (4.1)$$

$$\begin{aligned} \text{Torque} = & 4,93551 \cdot 10^{-15} \cdot w^6 - 1,00183 \cdot 10^{-10} \cdot w^5 + 8,41135 \cdot 10^{-7} \cdot w^4 \\ & - 3,73803 \cdot 10^{-3} \cdot w^3 + 9,27076 \cdot w^2 - 12161,72870 \cdot w \\ & + 6592063,47866 \end{aligned} \quad (4.2)$$

Acoplado ao motor, é considerado o sistema de transmissão HSWL 284C, da fabricante Renk. Esse sistema inclui o sistema de freios e de direção, distribuindo a potência para as lagartas conforme a necessidade de fazer curvas ou seguir por uma trajetória retilínea. Tal sistema possui 4 marchas a frente e 4 marchas a ré. Cada uma possui uma relação de transmissão, tornando possível ao veículo transitar em uma faixa ampla de velocidades.

A redução total da última marcha, causada pela transmissão da quarta marcha em si e pela peça que acopla a caixa de transmissão à polia tratora, pode ser calculada através da Eq. (4.3) obedecendo o RTA 9, que define a velocidade máxima de pelo menos 60km/h.

$$i = \frac{w \cdot R}{v} \cdot \frac{\pi}{30} \quad (4.3)$$

onde:

- a) i é o valor da redução total;
- b) w é a rotação do motor, em RPM;
- c) R é o raio da polia tratora;
- d) v é a velocidade do veículo.

Sabe-se que a razão entre as reduções da primeira e quarta marcha, contida em catálogo (RENK), vale 4,7. Pode-se então dimensionar a redução total em primeira marcha. Deve-se verificar, contudo, se a velocidade mínima em primeira marcha é inferior a 4km/h, conforme RTA 11.

Já as marchas intermediárias podem ser calculadas considerando um *gear step* geométrico. Isto é, considerando que a razão entre marchas subsequentes são as mesmas.

No que diz respeito ao momento rotacional de inércia associado a cada marcha, pode-se encontrá-los experimentalmente ou através do conhecimento do momento de inércia de todos os componentes do trem de força. Para o presente estudo, as duas formas não são viáveis, assim os valores são estimados com valores presentes na literatura. Ogorkiewicz (1998) menciona que para carros de combate com motores a diesel, observam-se coeficientes de inércia rotacional valendo entre 2 e 4, valor este que diminui conforme aumenta-se a marcha. Assim, para a modelagem são estimados os valores de 2,5 para a 1ª marcha, 2,15 para a 2ª marcha, 1,8 para a 3ª marcha e 1,5 para a 4ª marcha.

4.1.2 MOBILIDADE TÁTICA

A dinâmica longitudinal do VBC CC está relacionada à capacidade de transpor obstáculos. Um dos requisitos geométricos diz respeito exatamente à capacidade de transpor fossos. A **Figura 4.3** ilustra a situação, servindo como base para o equacionamento que relaciona a largura f do fosso com a localização do CG, o comprimento L da lagarta e o raio das rodas de apoio. Para a transposição do fosso, é considerado que as rodas frontais do carro de combate alcançassem o outro lado como fator limitante.

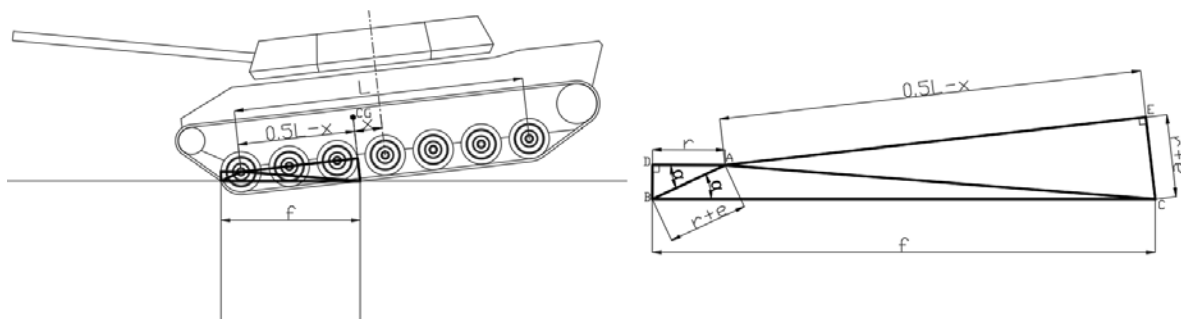


Figura 4.3 Transposição de fosso horizontal

Dos triângulos ABD e ACE da **Figura 4.3**, obtém-se, respectivamente, as Eq. (4.4) e (4.5).

$$\cos(\alpha) = \frac{r}{r + e} \quad (4.4)$$

$$AC = \sqrt{\left(\frac{L}{2} - x\right)^2 + (r + e)^2} \quad (4.5)$$

onde:

- a) e é a espessura da lagarta;
- b) α é o ângulo DÂB da **Figura 4.3**;
- c) L é a distância entre as rodas frontal e traseira;
- d) x é a distâncias horizontal do centro da roda ao CG;
- e) r é o raio da roda de apoio.

Aplicando-se o Teorema dos Cossenos no triângulo ABC obtêm-se a Eq. (4.6).

$$f = \frac{2 \cdot (r + e) + \sqrt{8 \cdot (r + e)^2 + (L - 2 \cdot x)^2}}{2} \quad (4.6)$$

Assim, a Eq. (4.6) fornece o comprimento máximo do fosso em função da posição do CG, do raio da roda de apoio, da espessura da lagarta e da distância entre as rodas frontal e traseira.

4.1.3 AUTONOMIA

A capacidade do veículo percorrer longas distâncias é primordial para seu bom desempenho no Teatro de Operações (TO). Em contrapartida, devido ao seu elevado peso e forças resistivas presentes, o consumo de combustível é extremamente elevado. Assim, faz-se necessário o dimensionamento dos tanques de combustível a partir dos parâmetros de projeto do carro de combate.

Para avaliar o consumo de combustível, é comum o uso do mapa de consumo do motor. Esse mapa indica regiões de consumo específico constante em um gráfico de torque em função da rotação do motor (NAUNHEIMER, 2011), sendo obtido experimentalmente através de extensivos testes com dinamômetro.

Porém, não é possível obter o mapa de consumo do motor considerado neste trabalho, dada às restrições de acesso à informação. Assim, considerações são feitas baseadas na curva de torque e na curva de consumo específico, representado na **Figura 4.4**. Vale ressaltar que o consumo apresentado nessa curva está relacionado à condição plena do motor, isto é, equivalente a situação em que o motorista pressiona o pedal até o máximo de seu curso. Essa condição faz o motor fornecer o máximo de torque possível, porém aumentando o consumo de combustível. Assim, no equacionamento é considerado um fator ϵ , estimando a porcentagem do consumo horário que é gasto em uma condição de velocidade constante.

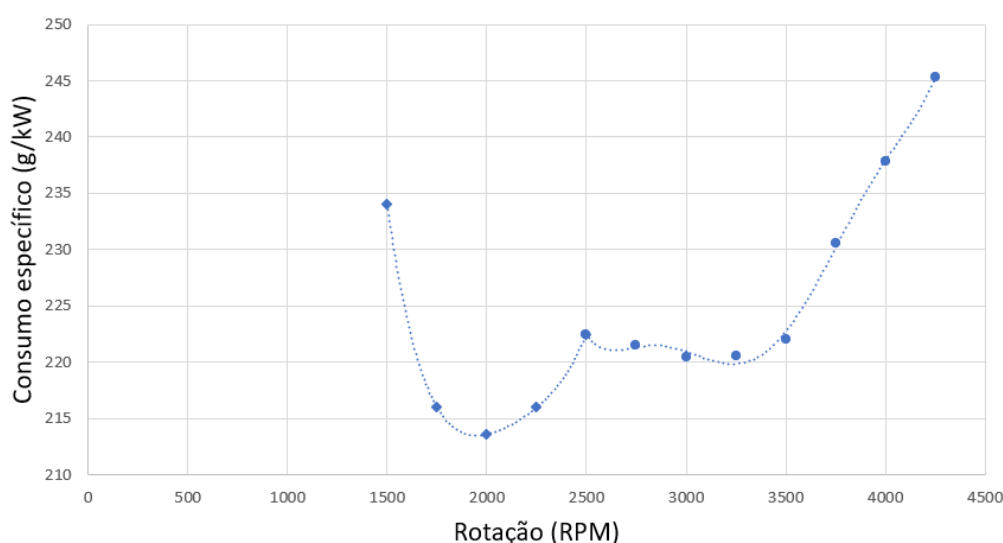


Figura 4.4 Curva de consumo específico em função da rotação (Adaptado de MTU, 2020)

O consumo horário de combustível C_h pode ser calculado a partir da Eq. (4.7), sendo C o consumo específico, em g/kWh, P a potência fornecida pelo motor, em kW e η o rendimento da transmissão.

$$C_h = \frac{\epsilon \cdot C \cdot P}{3600 \cdot \eta} \quad (g/s) \quad (4.7)$$

Dividindo a velocidade v do veículo, em m/s, pelo consumo horário, e convertendo o consumo em massa para consumo volumétrico, em litros, através da densidade ρ , obtêm-se a sua autonomia, em km/L, na Eq. (4.8).

$$Autonomia = \frac{3600 \cdot \eta \cdot v \cdot \rho}{\epsilon \cdot C \cdot P} \quad (km/L) \quad (4.8)$$

Pode-se substituir a potência e a velocidade através das Eq. (4.9) e (4.10), sendo w a rotação do motor, em RPM, T o torque, em Nm, R o raio da polia tratora, em metros, e i a redução do sistema de transmissão. Assim, obtêm-se a expressão (4.11).

$$P = \frac{T \cdot w}{1000} \cdot \frac{\pi}{30} \quad (kW) \quad (4.9)$$

$$v = \frac{w \cdot R}{i} \cdot \frac{\pi}{30} \quad (m/s) \quad (4.10)$$

$$Autonomia = \frac{3,6 \cdot 10^6 \cdot \eta \cdot R \cdot \rho}{\epsilon \cdot C \cdot T \cdot i} \quad (km/L) \quad (4.11)$$

O RTA 12 estipula que o carro de combate deve possuir autonomia para percorrer 400km, conforme norma DIN 70030. Tal norma estipula os procedimentos experimentais para a realização do teste de consumo de combustível, incluindo a condição de rodagem a 75% da velocidade máxima do veículo. Esta última condição é utilizada no presente trabalho para o cálculo da Eq. (4.11). Por fim, pode-se obter o volume necessário do tanque de combustível dividindo-se a distância percorrida pela autonomia calculada.

4.1.4 BATERIAS

No que diz respeito ao motor de partida, faz-se necessário o dimensionamento do conjunto de baterias para satisfazer os requisitos mostrados anteriormente pelos RTLI, sendo um deles o fornecimento de 24 V. Portanto, sabendo a necessidade total em Ah (C_{Ah}) do sistema e a capacidade unitária (C_{bat}) de uma bateria comercial de 12 V, tem-se que a quantidade de baterias necessárias é dada pela (4.12).

$$n = \frac{C_{Ah}}{C_{bat}} \times \frac{24 \text{ Volts}}{12 \text{ Volts}} \quad (4.12)$$

4.2 SUSPENSÕES

Além da dinâmica longitudinal, é necessário avaliar os efeitos do tipo de suspensão empregado a fim de verificar os resultados em termos de dinâmica vertical e proporcionar uma especificação adequada ao veículo.

Para a definição do tipo de suspensão empregada no modelo, deve-se considerar a tendência atual, bem como as facilidades de projeto no Brasil. É possível observar os principais carros de combate do mundo todo na **Tabela 4.1**, com seus respectivos tipos de suspensão, bem como ano de lançamento do veículo e a nacionalidade. Os tipos de suspensão são obtidos de MacLaurin (2018) e Ogorkiewicz (1998).

Tabela 4.1 Tipos de Suspensão dos Carros de Combate no Mundo

<i>Modelo</i>	<i>Tipo de Suspensão</i>	<i>Ano</i>	<i>Nacionalidade</i>
T-14 Armata	Semi-hidropneumática	2015	Russo
Leopard 2A7+	Barra de Torção	2014	Alemão
K2 Black Panther	Hidropneumática	2013	Sul-coreano
Merkava Mk4	Molas Helicoidais	2004	Israelense
M1 Abrams	Barra de Torção	1999	Estadunidense
Challenger 2	Hidropneumática	1993	Inglês

Como é possível observar na **Tabela 4.1**, as maiores potências bélicas do mundo e da Europa (EUA e Alemanha) ainda utilizam barra de torção como suspensão, dada sua elevada disponibilidade e simplicidade de manutenção. No entanto, o veículo mais moderno, o russo T-14 Armata, provavelmente emprega uma suspensão hidropneumática com a possibilidade de ajustes nos dois primeiros eixos dianteiros, como resultado de seu projeto independente.

Portanto, adota-se, para este trabalho, a suspensão de barra de torção, pelos seguintes motivos:

- a) é o tipo mais simples de ser desenvolvido e fabricado, bem como atende à necessidade da obtenção de um VBC CC nacional com elevada disponibilidade e com o menor tempo de projeto possível;
- b) a tropa brasileira já está habituada à manutenção, mesmo que mais superficiais, de suspensões com barra de torção, dado que o atual CC é o Leopard 1 A5, que possui este mesmo tipo de suspensão.

Para a avaliação da suspensão, são feitas duas abordagens: considerando rigidezes não lineares, para análise de oscilação do chassi; e considerando rigidezes médias e constantes, para análise vibracional do chassi. Ambos os casos são formas ágeis de se avaliar possíveis parâmetros para a suspensão.

4.2.1 MODELO DE RIGIDEZES VARIÁVEIS

Na primeira abordagem, considera-se a massa suspensa do veículo como uma massa rígida única e uma massa não-suspensa associada a cada eixo. É possível construir um modelo bicicleta semelhante ao apresentado na Seção 3.4, como observado na **Figura 4.5**, para um veículo de 7 eixos.

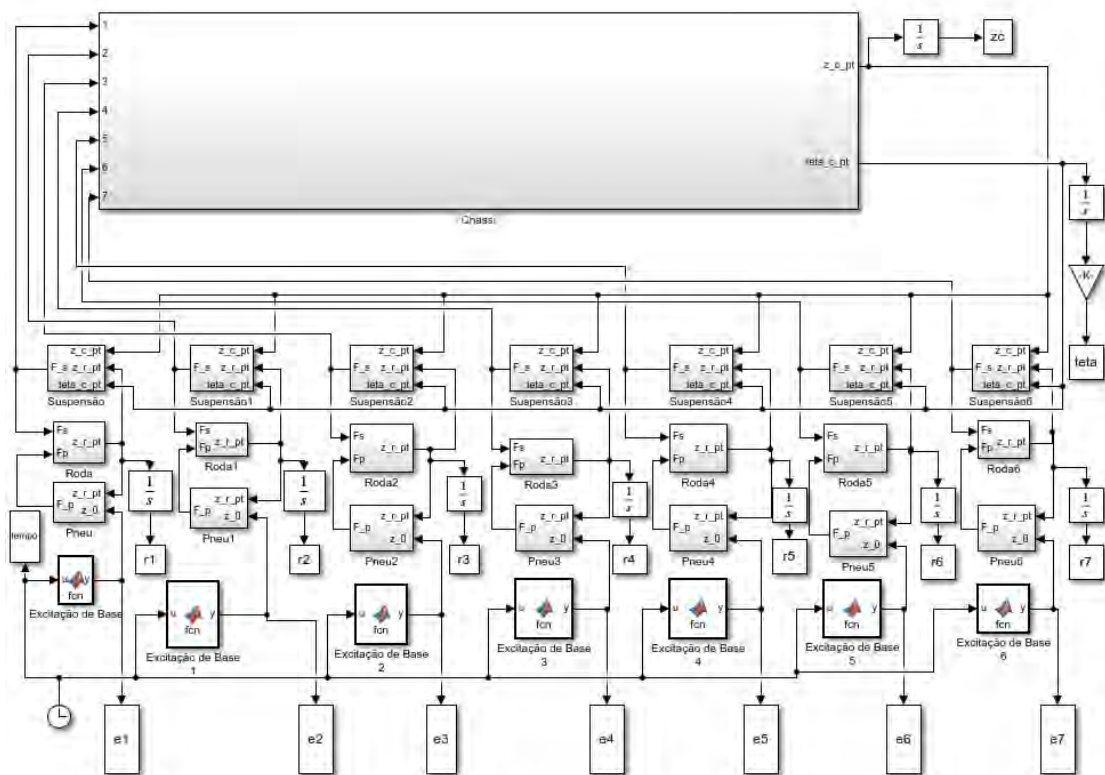


Figura 4.5 Diagrama de Blocos para o Modelo Bicicleta do VBC CC

O equacionamento envolvido na **Figura 4.5** deriva da aplicação da 2ª Lei de Newton ao chassi e a cada uma das massas suspensas, como é possível visualizar nas Eq. (4.13) e (4.14), de acordo com a ISO 4130 (2007).

$$\dot{z}_c = -g + \frac{\sum_{i=1}^7 F_{zi}}{m_c} \quad (4.13)$$

$$\ddot{\theta} = \frac{1}{J_c} \times \sum_{i=1}^7 a_{ig} F_{zi} \quad (4.14)$$

onde:

- a) z_c é o deslocamento do chassi ao longo do eixo vertical;
- b) g é a aceleração da gravidade;
- c) F_{zi} é a força vertical que a i -ésima suspensão provoca no chassi;
- d) a_{ig} é a distância entre o eixo i e o centro de massa do veículo, considerando o sentido positivo como apontando na direção de deslocamento;
- e) m_c é a massa suspensa do veículo;
- f) θ é o ângulo de *pitch* do chassi do veículo;
- g) J_c é o momento de inércia do chassi em relação ao eixo transversal do veículo.

4.2.2 MODELO DE RIGIDEZES MÉDIAS

Para a obtenção das frequências naturais, é preciso montar a matriz de rigidez e de inércia do sistema. Baseado no modelo para dois eixos de Jazar (2008), pode-se estender o conceito e, assumindo as mesmas hipóteses simplificadoras de Maclaurin (2018), tem-se a Eq. (4.15).

$$K = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^7 k_i & -\sum_{i=1}^7 a_{ig}k_i & -k_1 & -k_2 & -k_3 & -k_4 & -k_5 & -k_6 & -k_7 \\ -\sum_{i=1}^7 a_{ig}k_i & \sum_{i=1}^7 a_{ig}^2 k_i & a_{1g}k_1 & a_{2g}k_2 & a_{3g}k_3 & a_{4g}k_4 & a_{5g}k_5 & a_{6g}k_6 & a_{7g}k_7 \\ -k_1 & a_{1g}k_1 & k_1 + k_t & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -k_2 & a_{2g}k_2 & 0 & k_2 + k_t & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -k_3 & a_{3g}k_3 & 0 & 0 & k_3 + k_t & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -k_4 & a_{4g}k_4 & 0 & 0 & 0 & k_4 + k_t & 0 & 0 & 0 \\ -k_5 & a_{5g}k_5 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_5 + k_t & 0 & 0 \\ -k_6 & a_{6g}k_6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_6 + k_t & 0 \\ -k_7 & a_{7g}k_7 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_7 + k_t \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

onde:

- k_i é a rigidez média do eixo i ;
- k_p é a rigidez média da borracha das rodas de apoio em conjunto com a lagarta.

Já a matriz de inércia é dada pela Eq. (4.16).

$$M = \begin{bmatrix} m_c & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & J_c & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_{e1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_{e2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_{e3} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_{e4} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_{e5} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_{e6} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_{e7} \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

onde:

- m_{ei} é a massa não suspensa do eixo i .

Portanto, como abordado por Jazar (2008), cada autovalor atv_i de $[M]^{-1}[K]$ corresponde ao quadrado de uma frequência angular do sistema. Assim, para cada massa inercial i da matriz de inércia, há uma frequência natural f_i dada pela Eq. (4.17).

$$f_i = \frac{\sqrt{atv_i}}{2\pi} \quad (4.17)$$

Com estas frequências, pode-se fazer uma avaliação rápida a respeito da geometria e das constantes elásticas utilizados, em busca da validação da proposta de projeto. Como visto

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Como resultado dos estudos prévios da Seção 3 deste trabalho, apoiados na modelagem matemática da Seção 4, pode-se chegar aos principais parâmetros e especificações da parte de concepção do projeto de um VBC CC, atendendo às restrições da END e dos RTLI definidos previamente. A **Figura 5.1** representa a modelagem em CAD 3D da concepção inicial do veículo. São modelados: trem de força, baterias, suspensão, chassi e torre com sistema de armamento primário e secundário. O posicionamento dos componentes considerados, com referência nas rodas de apoio centrais, assim como a altura ocupada no interior do carro de combate, podem ser vistos na **Figura 5.2** e na **Figura 5.3**.



Figura 5.1 Modelagem em CAD 3D do VBC CC moderno

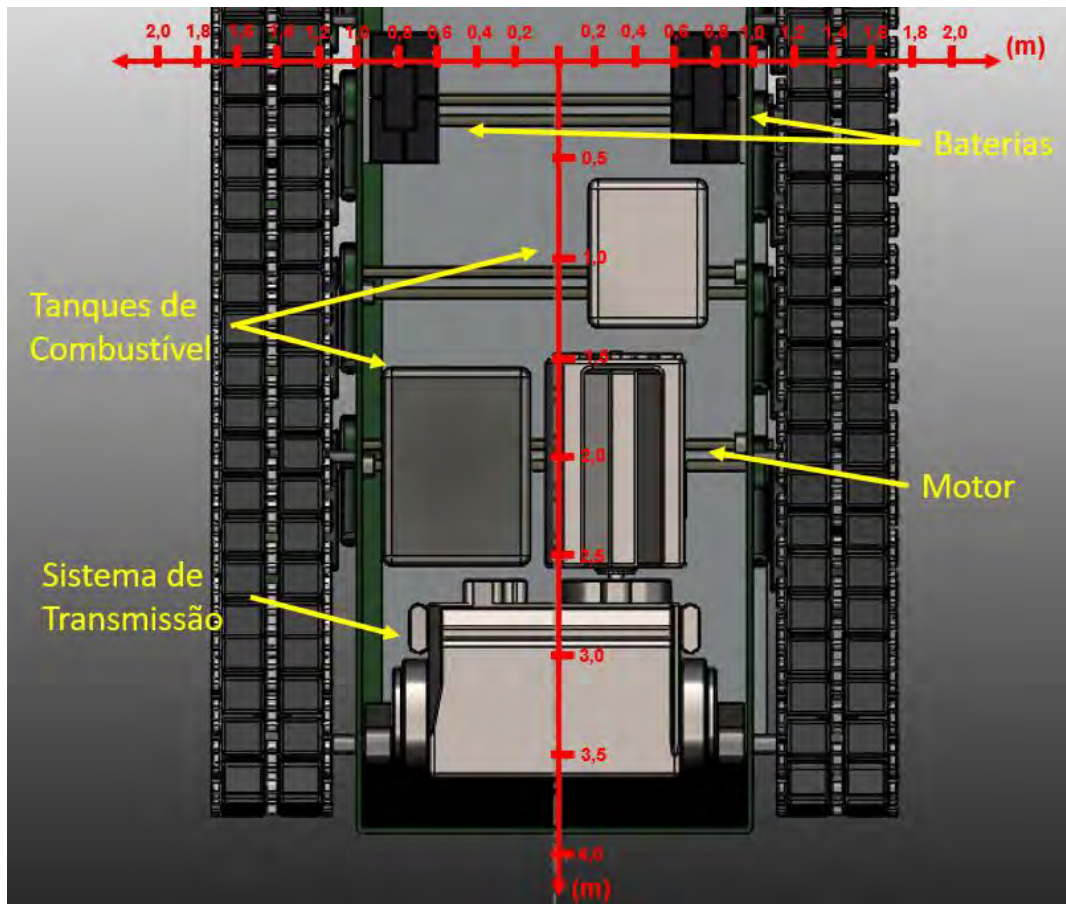


Figura 5.2 Posicionamento dos componentes modelados

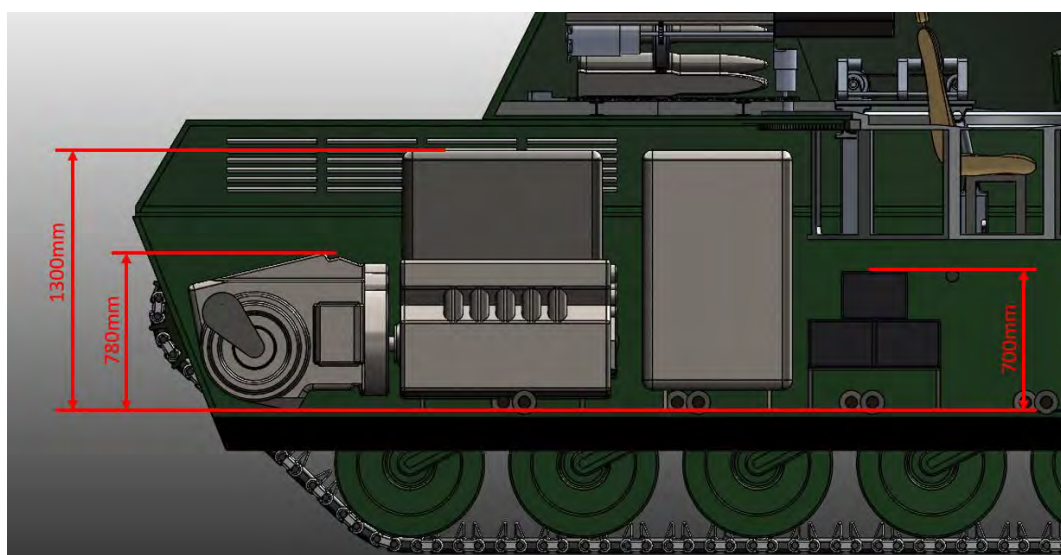


Figura 5.3 Altura dos componentes considerados

Para a modelagem do motor MT 892, indicado na **Figura 5.4**, são consideradas as dimensões de catálogo da MTU®, com L, W, H e H₁ iguais a 1090, 700, 686 e 270mm, respectivamente. O peso do motor é de 980 kg.

Já para o sistema de transmissão HSWL 284C da Renk®, conforme a **Figura 5.5**, são consideradas as dimensões A, B e C iguais a 1630, 1005 e 790mm, respectivamente. O peso do conjunto é de 2150 kg.

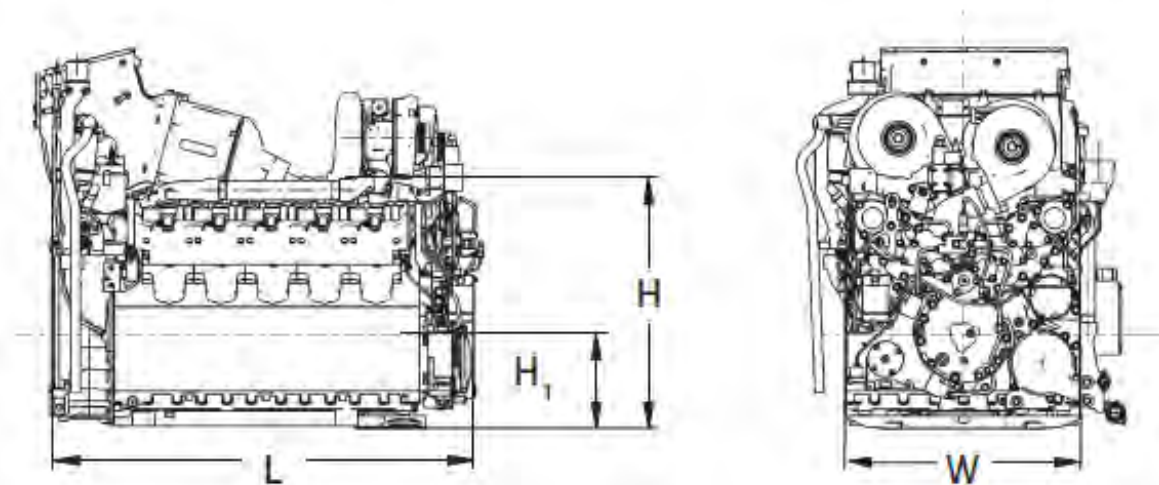


Figura 5.4 Vistas do motor MT 892 (MTU, 2020)

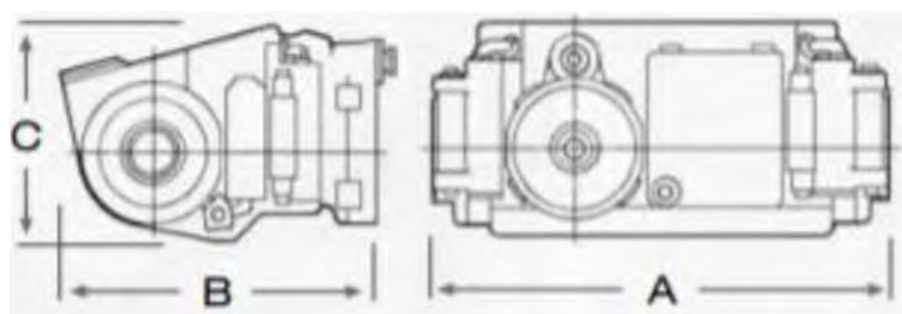


Figura 5.5 Vistas do sistema de transmissão (RENK, 2020)

As medidas resultantes e demais parâmetros obtidos podem ser resumidos na **Tabela 5.1**.

Tabela 5.1 Parâmetros obtidos

<i>Parâmetro</i>	<i>Valor</i>
Comprimento	7,90 m
Largura	3,60 m
Altura	2,96 m
Nº de tripulantes	3
Peso	45 T
Nº de eixos	7
Nº de rodas	28

Dessa maneira, tem-se a seguinte divisão nessa Seção: dinâmica longitudinal, mobilidade tática e estratégica, trafegabilidade, autonomia, baterias, suspensões, chassi e sistema de armamento.

5.1 DINÂMICA LONGITUDINAL

A modelagem realizada permite verificar o desempenho do veículo utilizando o motor MT 892, da MTU ® e o sistema de transmissão HSWL 284C, da Renk ®. A redução total em quarta marcha é obtida a partir da Eq. (4.3). A redução nas demais marchas são obtidas a partir do procedimento descrito na mesma Seção.

Assim, os valores das reduções totais em cada marcha são mostrados na **Erro!**
Fonte de referência não encontrada..

Tabela 5.2 Relações de redução

<i>Marcha</i>	<i>Redução total</i>
1 ^a	36
2 ^a	21,5
3 ^a	12,8
4 ^a	7,7

Através da simulação computacional, a viatura alcança a velocidade de 60 km/h em 22 s, estando o motor a uma rotação final de 4250 RPM. O gráfico na **Figura 3.1** mostra a progressão da velocidade do veículo no tempo. Nota-se que a velocidade de 32 km/h é atingida em 9,3 s, tempo próximo aos 8 s estipulados pelo RTA 8. Ressalta-

se, porém, que o resultado obtido é apenas uma estimativa, uma vez que a aceleração do veículo é diretamente relacionada com o coeficiente rotacional de inércia de cada marcha, sendo estes estimados a partir de dados presentes na literatura.

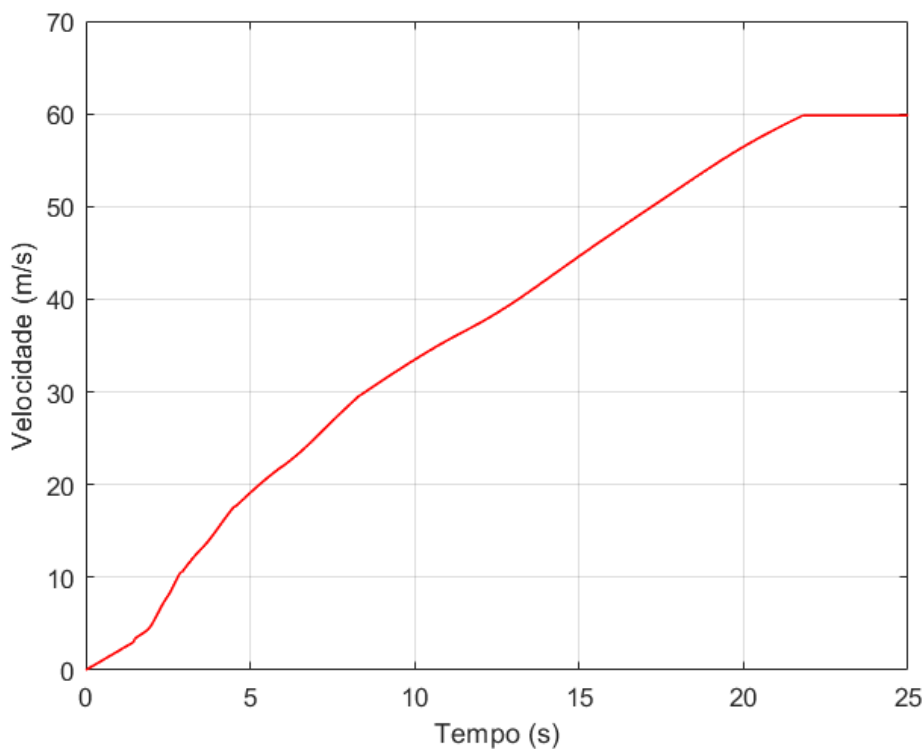


Figura 5.6 Velocidade do veículo em função do tempo

A rampa máxima é calculada a partir da Eq. (3.1), considerando-se o torque máximo do motor. É obtido então o valor de 58,6%. Tal valor é inferior à rampa de 60% de inclinação, do RTA 14.

Ressalta-se, porém, que o modelo é simplificado, desconsiderando-se o conversor de torque, presente em sistemas de transmissão automática. Tal componente multiplica o torque transmitido, principalmente quando o veículo sai do repouso, o que melhoraria o seu desempenho de rampa.

5.2 MOBILIDADE TÁTICA E ESTRATÉGIA

Em um primeiro momento, verifica-se a capacidade do veículo de transpor fossos horizontais, considerando rodas de apoio com raio de 287,5 mm, espessura da sapata de 75 mm e comprimento da lagarta em contato com o solo de 5,2 m. A posição

do CG é estimada através do modelo em CAD desenvolvido, estando 260 mm atrás da roda de apoio central. Tal valor é obtido levando em consideração a posição e peso de todos os componentes desenhados no modelo. Assim, o comprimento máximo do fosso é obtido a partir da Eq. (4.6), valendo 3,2 m. Tal valor é superior aos 2,5 m estipulados pelo RTA 6.

Já para a mobilidade estratégica, a largura e a altura são delimitadas por condições de transportabilidade, utilizando tanto normas rodoviárias como ferroviárias. Como a ABNT NBR 12915 (2019) e a resolução CONTRAN nº 640 de 14/02/2016 fornecem uma boa margem de segurança para as medidas dos RTLI, pode-se projetar o veículo com segurança seguindo estas últimas limitações.

Quanto ao peso, considera-se a abordagem *bottom-up*, definindo essa variável como um limitante inicial de projeto, a fim de atender a requisitos de transportabilidade, mobilidade e eficiência. Simultaneamente, atendendo aos RTA vigentes, define-se esse valor igual a 50 toneladas. No entanto, como a blindagem principal não é considerada completa, o peso do modelo é limitado em 45 toneladas.

5.3 TRAFEGABILIDADE

No que diz respeito ao desempenho do carro de combate em solos deformáveis, o índice de cone (VCI) é avaliado, levando-se em consideração os parâmetros da **Tabela 5.3**.

Tabela 5.3 Parâmetros para o cálculo do VCI

<i>Parâmetro</i>	<i>Valor</i>
Peso total	110231,00 lb
Largura da lagarta	20,08 pol
Comprimento da lagarta	211,42 pol
Número de rodas	14,00
Comprimento da sapata	7,48 pol
Área de 1 sapata	150,20 pol ²
Vão Livre	20,47 pol

Os fatores da Eq. (3.3) são calculados e os valores de VCI para 1 e 50 passadas são obtidos, de acordo com a **Tabela 5.4**. Os valores de 30,54 e 69,56 encontram-se

condizentes com os valores médios mencionados na literatura, conforme mencionado na Seção 3.3.3.

Tabela 5.4 Fatores e resultados de Índice de Cone

<i>Parâmetro</i>	<i>Valor</i>
Fator de pressão de contato	12,9836
Fator de peso	1,8000
Fator da lagarta	0,2008
Fator da garra	1
Fator Bogie	5,2423
Fator de tolerância	2,3622
Fator do motor	1
Fator de transmissão	1
MI	119,27
VCI1	30,54
VCI50	69,56

5.4 AUTONOMIA

A autonomia do veículo pode ser calculada a partir da Eq. (4.11). Considerando a velocidade máxima de 60km/h, têm-se a condição de teste de 45km/h estipulado pela norma DIN 70030. A 45km/h, a rotação do motor é de 3200 RPM, calculada a partir da Eq. (4.10). Da curva de torque, têm-se então 2100 Nm.

O raio da polia tratora considerado é 0,2875 m, o rendimento da transmissão vale 0,9, o coeficiente ϵ vale 0,75 e a densidade do diesel vale 0,853. Dessa forma, é obtido o valor de 0,298 km/L. Para a condição de 400 km, dimensiona-se assim o tanque de combustível com 1350L.

5.5 BATERIAS

Em relação à quantidade de baterias, faz-se necessário saber a capacidade elétrica total necessária. No entanto, dada a escassez de informações de consumo dos diversos componentes de um veículo desse tipo, estima-se a quantidade de baterias com base nas informações disponíveis, apenas para fins de estimativa de ocupação de espaço e de peso. Considerando uma bateria com capacidade de 85 Ah e que fornece 12 V, comumente usada em caminhões e veículos pesados, pode-se estimar a quantidade necessária.

De acordo com o Manual do Leopard 1 (1965), a capacidade total do sistema elétrico é de 400 Ah, considerando todos os sistemas elétricos e possíveis necessidade de funcionamento em estado de observação. Portanto, utilizando-se a Eq. (4.12), tem que $n = 9,4$, isto é, 10 unidades.

5.6 SUSPENSÕES

Como resultado das medidas obtidas, é possível modelar em CAD 3D toda a base do sistema de suspensão do veículo, com o tipo barra de torção e dotado de 14 pares de rodas, com 7 de cada lado, e de 750 mm de diâmetro. É possível ver o modelo na **Figura 5.7**.

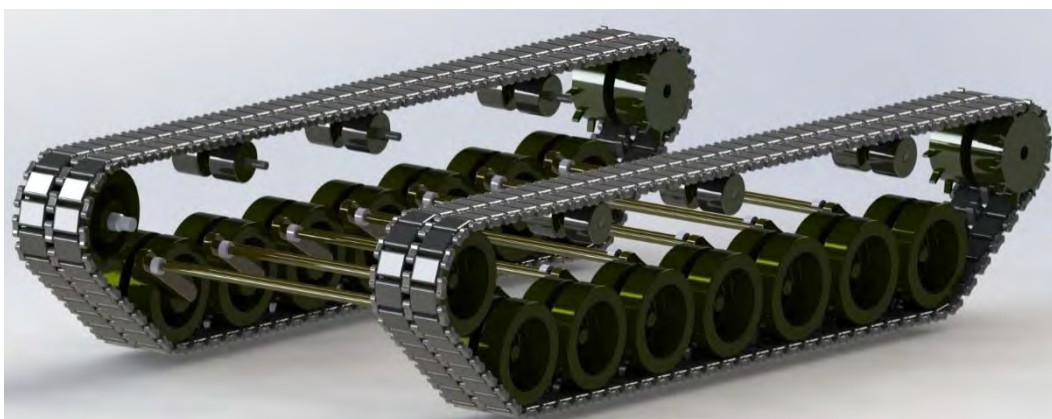


Figura 5.7 Sistema de Suspensões do VBC CC

O número de rodas é definido para as condições críticas da literatura, permitindo menor resistência ao rolamento e garantindo boa distribuição de peso pelas rodas, resultando na quantidade de 7 rodas. Este valor também é uma tendência dos MBT mais modernos, reforçando a decisão de projeto.

As lagartas são compostas por 83 pares de sapatas, cada uma delas, reforçadas com material polimérico na região de contato com o solo. São utilizados 3 roletes de apoio em cada lado, a fim de a lagarta se manter tensionada e não haver o risco de contato com as rodas de apoio indevidamente. O sistema de união das sapatas é triplo, no qual há um elo em cada extremidade e um central.

As barras de torção adotadas possuem diâmetro de 60 mm, que é um valor de partida adequado para a rigidez que os novos aços podem fornecer, e também

garantindo um peso mais reduzido a fim de atender ao requisito de 50 T como peso total.

Para que seja possível haver um maior comprimento de barra para cada roda (o que proporciona maior rigidez de torção), nota-se que os respectivos pares de rodas necessitam de um *off-set* na direção longitudinal. No entanto, como o tamanho dos braços de suspensão são os mesmos, a dinâmica vertical não é afetada e essa defasagem é compensada pelo grande comprimento do veículo. Dessa forma, as rigidezes utilizadas para obtenção de resultados de teste do modelo possuem sua relação Força x Deslocamento dada pela **Figura 5.8**.

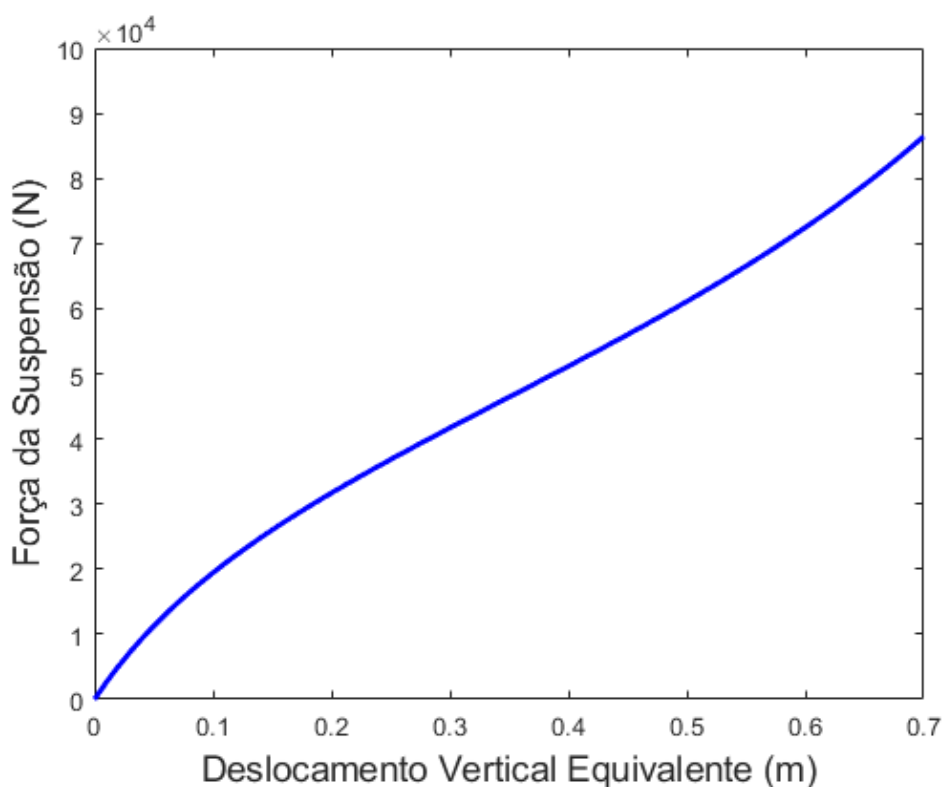


Figura 5.8 Comportamento das rigidezes da viatura

Para o sistema de amortecimento, como ressaltado dos estudos de Dühr e Sankar (1995), emprega-se amortecedores em todas as rodas, com um sistema muito semelhante a um típico conjunto hidropneumático. No entanto, neste caso, há apenas o líquido viscoso, sem a presença do compartimento de gás, dado que as rigidezes utilizadas são do tipo barra de torção. Assim, para substituições futuras, torna-se mais fácil a adaptação para o uso de sistemas hidropneumáticas em alguns dos eixos.

Quando submetido à transposição de 7 obstáculos de meia-lua, de acordo com a norma de testes do Exército Americano TOP 1-1-011, como mostrado na **Figura 5.9**, obtém-se os resultados da **Figura 5.10** e **Figura 5.11**, considerando o modelo de rigidezes não-lineares.

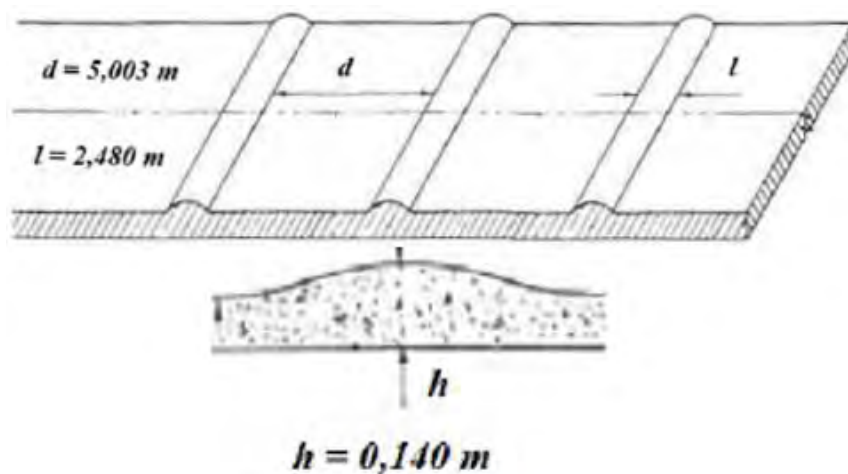


Figura 5.9 Padrão de obstáculo pela norma TOP 1-1-011 (Abardeen, 2012).

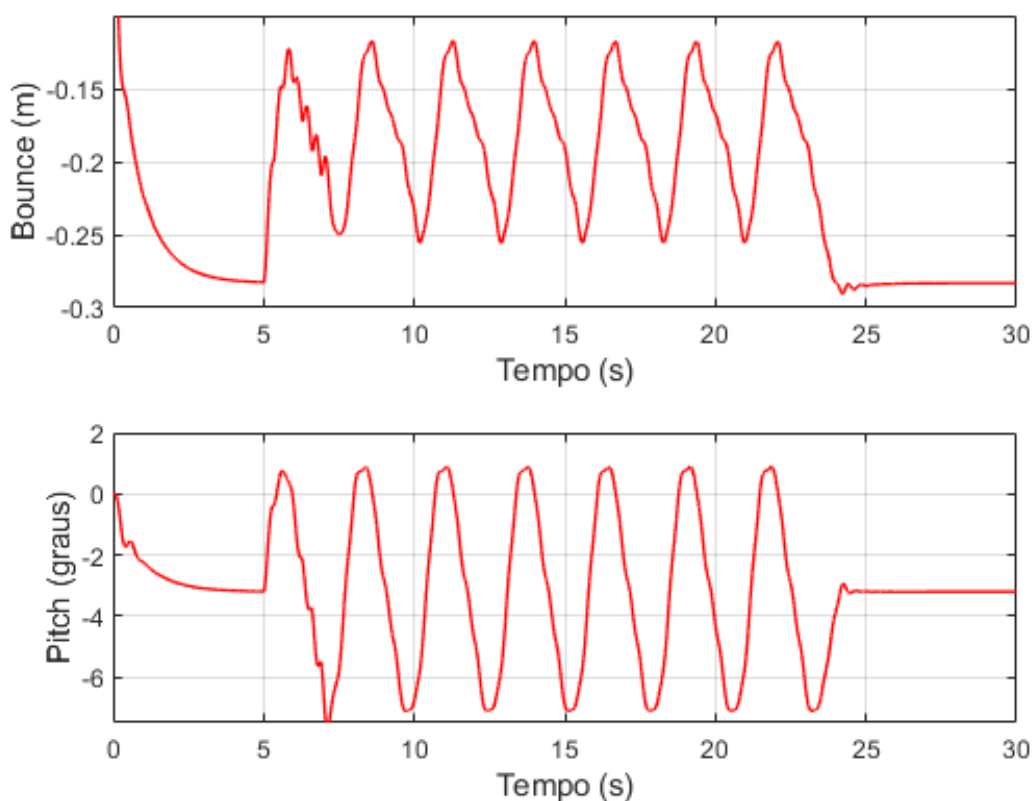


Figura 5.10 Oscilações do chassi

No tocante aos movimentos do chassi, observa-se que há uma acomodação inicial da suspensão, dado que o sistema é iniciado com deformação nula das molas, isto é, sem haver o equilíbrio da carga estática. Posteriormente, o pico de oscilação apresenta uma formação distinta das demais, devido ao fato de cada eixo ser atingido pela excitação de base com uma defasagem de tempo proporcional à distância entre eixos. Por fim, então, ocorre a acomodação final do veículo na sua posição de equilíbrio estática.

Os gráficos da **Figura 5.11** apenas servem para ilustrar que todos os eixos passam pela perturbação descrita, ocorrendo, no entanto, com uma defasagem de tempo que depende da velocidade de locomoção, que foi adotada igual a 10 km/h, e da distância entre eixos, considerada 870 mm para o modelo.

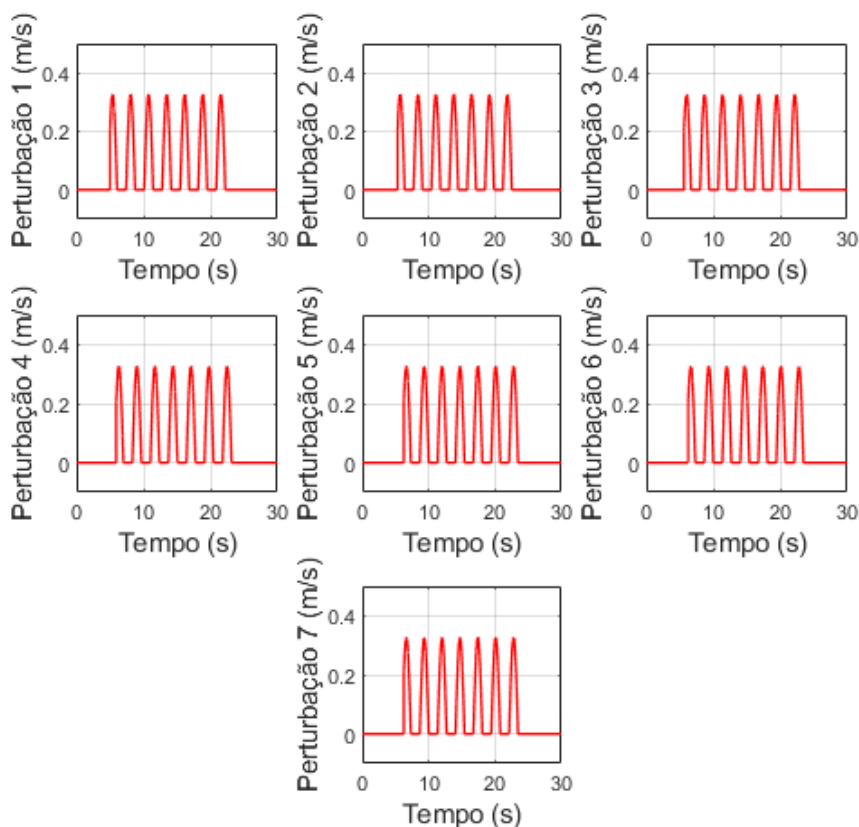


Figura 5.11 Perturbações de base nos 7 eixos

Já no que diz respeito à análise das frequências naturais do sistema, considerando uma rigidez média de 124.850 N/m (obtida da **Figura 5.8**) para cada eixo, a configuração-base resulta em:

- a) frequência de *bounce* de 1,05 Hz;
- b) frequência de *pitch* de 0,78 Hz.

Como abordado na Fundamentação Teórica, são valores dentro do esperado e que proporcionam condições de operação suficientemente confortáveis aos tripulantes.

5.7 CHASSI

Como material de blindagem da carcaça, pode ser utilizado o aço do tipo CrNiMo, chamado de VCB3Ti, que é um aço especial de alta dureza, possível de ser fabricado no Brasil, e que é submetido ao processo de refusão por escória eletrocondutora. O material atende à maioria dos requisitos exigidos, como abordado por Oliveira et al (2019). Dessa maneira, é usado apenas como material base do chassi. Utilizando as informações retiradas de Costa e Neto (2020), tem-se que os parâmetros a serem aplicados para a obtenção da espessura-base da blindagem contra uma munição APDS de 105 mm são:

- a) $m_p = 53\% \times 4,01 \text{ kg} = 2,17 \text{ kg}$;
- b) $d = 61 \text{ mm}$;
- c) $v = 1475 \frac{\text{m}}{\text{s}} - 2 \text{ km} \times \frac{99 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{\text{km}} = 1277 \text{ m/s}$;
- d) $C = 6.6$ e $n = 1,37$.

Dessa forma, a espessura equivalente em RHA necessária e dada pela Eq. (3.12) é $t = 114, 24 \text{ mm}$. Considerando que aços do tipo HHA, sabe-se que a profundidade de penetração cai drasticamente, segundo Singh et al et al (2017). Portanto, considerando uma redução em cerca de 50% da penetração, tem-se que $t = 58 \text{ mm}$ é suficiente para essa blindagem básica.

Este valor é usado apenas para a região mais crítica do veículo, isto é, para aquela localizada na parte frontal e na parte superior posterior. Pode se ver na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** as espessuras da carcaça em uma vista de corte.

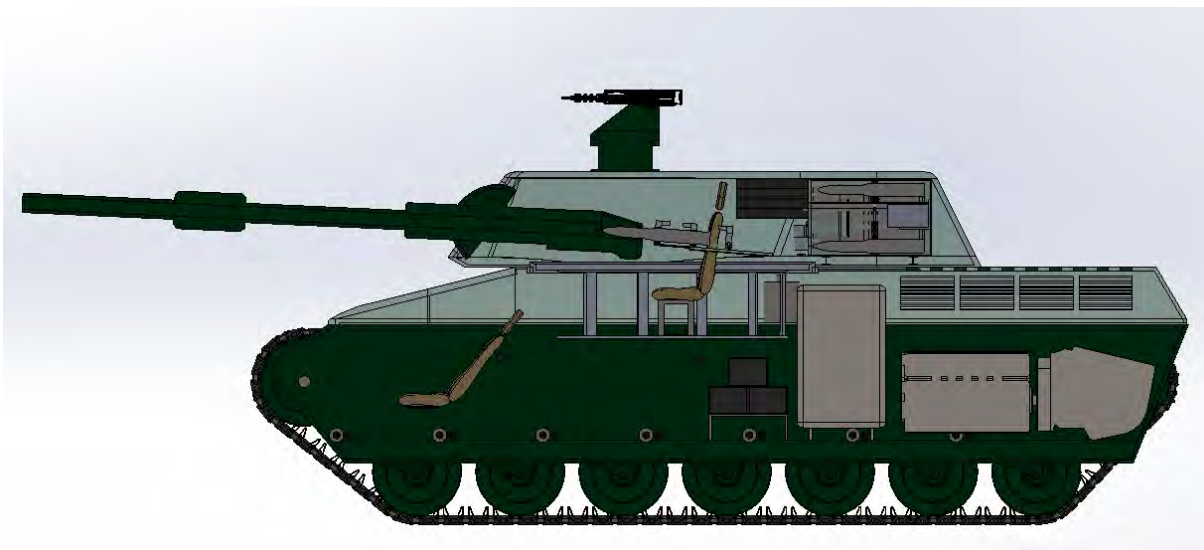


Figura 5.12 Vista em corte do carro de combate

Na região inferior do chassi, utiliza-se uma angulação de 10° para cada placa inferior, em formato de V, a fim de reduzir a capacidade de penetração de projéteis oriundos de minas anticarro. Este valor é limitado pelo vão livre mínimo do veículo adotado nesse projeto, de 600 mm. Este, por sua vez, foi escolhido considerando uma folga de 200 mm para o valor mínimo dado pelos RTLI. A espessura, nesse caso, é de 50% da referência, isto é, 30 mm, dada a presença de angulação no assoalho, o que confere maior espessura resultante.

Na região traseira, que é um local de baixa incidência de ataques, utiliza-se uma espessura também de 50% da referência, de 30 mm.

Quanto às laterais, dada a necessidade de se atender à largura máxima no veículo, utiliza-se chapas praticamente retas, conferindo maior fragilidade ao veículo nessa região, devido à ausência de angulação, fazendo-se necessário, para refinamentos posteriores, de uma blindagem mais reforçada naquela região. Usualmente isto é feito adotando-se uma blindagem que se estende até próximo à altura do centro das rodas, a fim de também proteger o sistema de suspensão. Para tal, adota-se uma espessura de menos de 50% da referência, isto é, de 25 mm, dado que haverá grande quantidade de blindagem principal nessa região.

Para a blindagem adicional, uma alternativa é o aproveitamento das placas compósitas da Alltec, com o adequado dimensionamento para esse tipo de veículo. Para a especificação da espessura e de aspectos mais precisos de melhoria, é

necessário um estudo mais detalhado, com experimentos, e que não é do escopo deste trabalho. No entanto, o recomendado é a utilização de maior espessura na região dianteira, onde dois dos três tripulantes ficarão posicionados.

5.8 SISTEMA DE ARMAMENTO

Mesmo o número de tripulantes definidos pelos RTA sendo 4, é notável a atual tendência de uma tripulação com 3 integrantes, dados os sistemas de automatização do canhão principal, o que dispensa o auxiliar do atirador. Tendo em vista que este projeto deve ser visualizado no campo daqui a cerca de 10 ou 15 anos, é pertinente propor esta alteração.

O sistema de armamento primário empregado é automático. Tal decisão visa a diminuição de 4 para 3 tripulantes. A disposição escolhida posiciona o motorista e o comandante na parte frontal do veículo, enquanto o atirador permanece posicionado na torre, para que este possa resolver uma eventual pane mecânica no sistema de carregamento automático. A munição principal é armazenada em um cofre do tipo *bustle*, na parte traseira da torre, conferindo maior capacidade de sobrevivência para a tripulação e para o veículo. São consideradas 40 munições, todas elas prontas para serem carregadas automaticamente. A modelagem em CAD 3D do sistema de armamento pode ser vista na **Figura 5.13**.

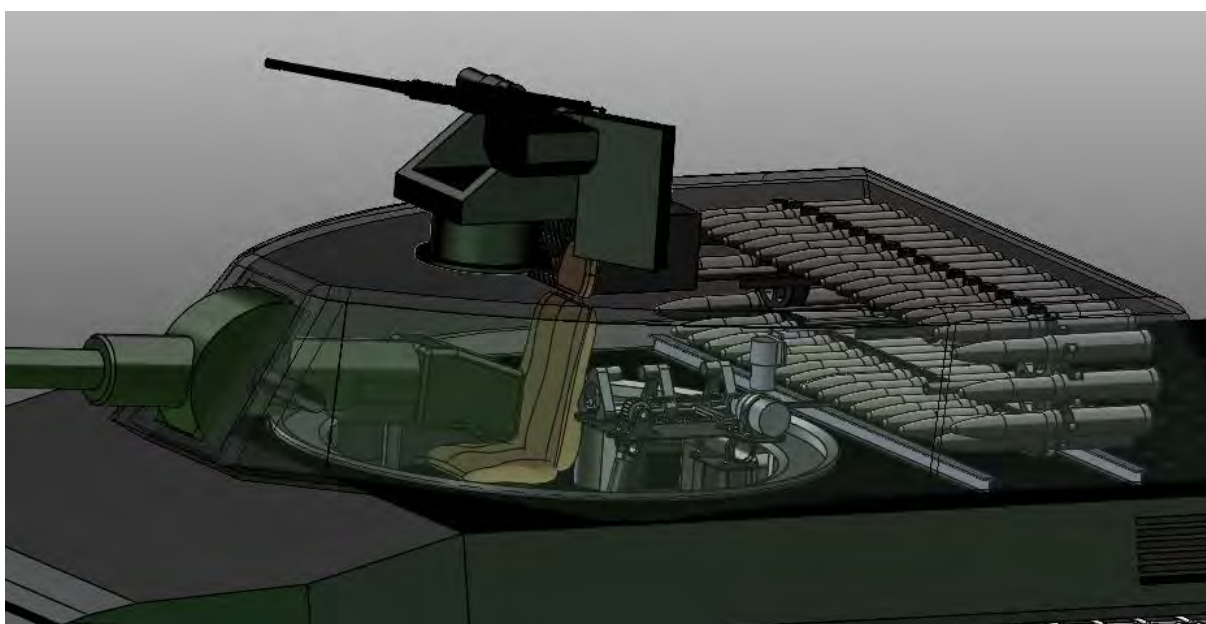


Figura 5.13 Modelagem CAD 3D do sistema de armamento principal empregado

O funcionamento do sistema de armamento empregado é feito da seguinte forma: após a escolha da munição a ser utilizada através do painel de controle do atirador, o motor localizado na parte central movimenta o conjunto, até que a munição desejada se encontre na parte central inferior do cofre. Uma pequena porta é então aberta e a munição é puxada para o sistema de carregamento. A vista frontal do cofre é exibida na **Figura 5.14**.

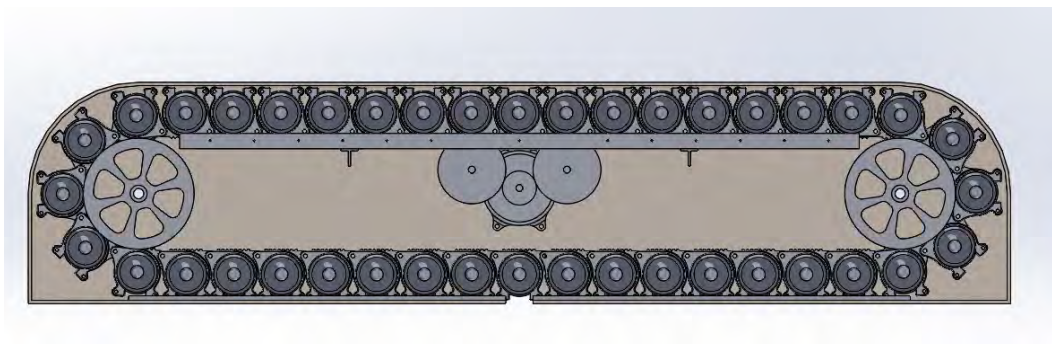


Figura 5.14 Vista frontal do cofre de munições principal

A munição é guiada pelo sistema de carregamento, que faz uso de roletes para movimentá-la a frente, conforme a **Figura 5.15**. O conjunto é, então, movido por uma correia e um pistão atua para fazer o alinhamento com a culatra, em uma posição angulada, específica de carregamento, como exibido na **Figura 5.16**. A munição é puxada para dentro da culatra e, anteriormente ao disparo, o conjunto de carregamento deve voltar à posição inicial para permitir o movimento de recuo da culatra. Para a modelagem é considerado um espaço suficiente para um recuo de 400 mm. Esse valor é estimado baseado no recuo do canhão MG 251 L/44, equipado no Merkava, carro de combate Israelense (IMI Systems, 2020).

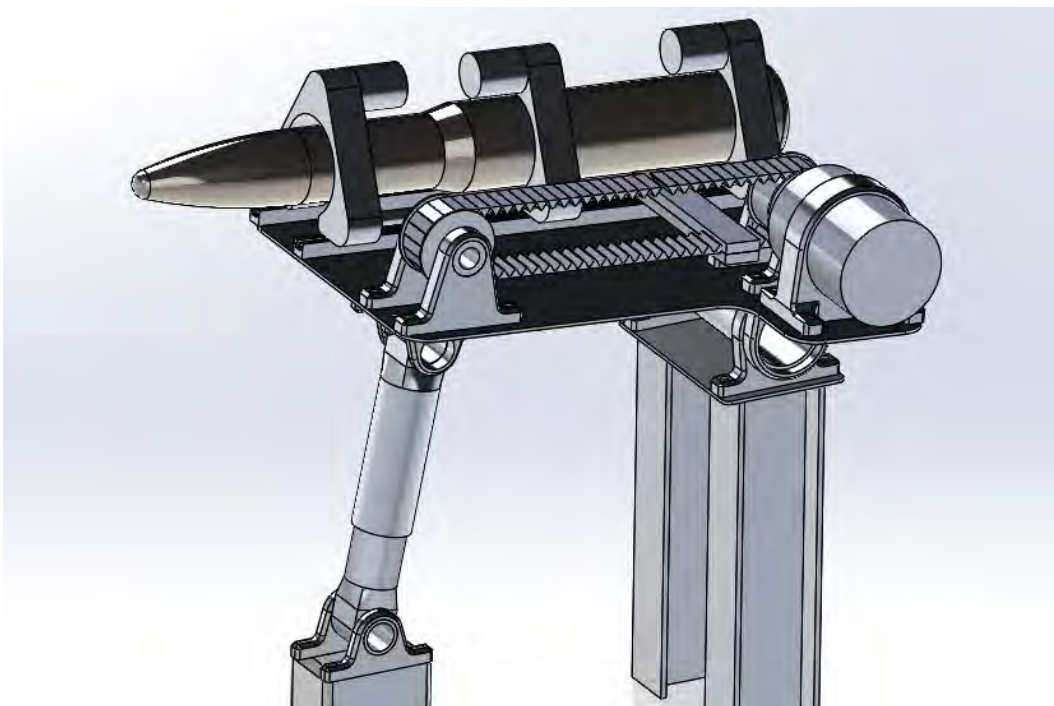


Figura 5.15 Modelo 3D do sistema de carregamento

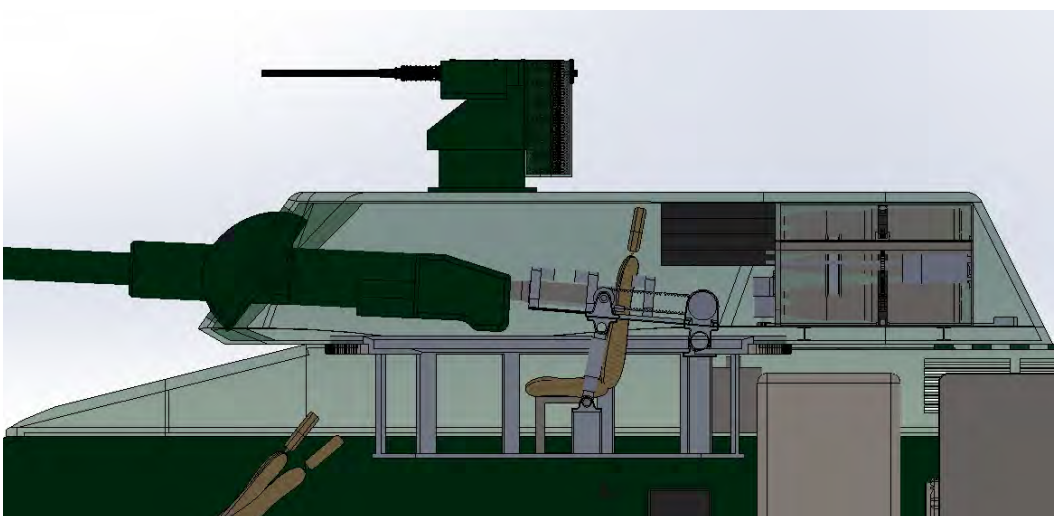


Figura 5.16 Vista lateral do sistema de carregamento

Finalmente, cabe ressaltar que é utilizado o REMAX como armamento secundário, dado seu grau de nacionalização e o seu atendimento de requisitos para esse tipo de armamento em uma VBC CC.

6 CONCLUSÃO

Com o estudo doutrinário básico já finalizado, é possível avaliar quais os principais aspectos a serem considerados para o projeto da nova Viatura Blindada de Combate Carro de Combate (VBC CC) do Exército Brasileiro.

No que diz respeito a especificações iniciais, determina-se a quantidade de tripulantes, o peso e o número de rodas. As dimensões básicas também podem ser obtidas com base no arranjo interno e externo dos principais subsistemas do veículo.

No tocante ao trem de força, obtém-se um resultado de 3,25 m de capacidade de transposição de fosso, superando o valor de 2,5 m conforme preconiza o EB-RTLI-04.062 (2020). Pelo diagrama por fluxo de potência elaborado, é obtida a velocidade em função do tempo, a fim de verificar os requisitos de desempenho regulados.

Quanto à blindagem, obtém-se alguns materiais adequados e de produção nacional, mas que ainda requerem melhorias. Além disso, por ser de natureza empírica, a definição completa da blindagem e a verificação dos requisitos devem ser reforçadas experimentalmente. Como medida inicial de projeto, faz-se uma estimativa para a espessura da carcaça do veículo na parte frontal, sem a blindagem principal completamente posicionada. A partir disso, as demais espessuras são obtidas.

Quanto às suspensões, escolhe-se o tipo barra de torção, dada a experiência da tropa do Exército Brasileiro com a manutenção e manuseio, além do custo mais reduzido e uma possibilidade de nacionalização mais ágil. Após a determinação dos últimos componentes internos do veículo, obtém-se resultados de frequências naturais, bem como de dinâmica vertical, a fim de verificar a adequabilidade do sistema nessa fase inicial.

Quanto ao sistema de armamento, adota-se o canhão padrão OTAN de 120 mm de alma lisa, utilizando sistema de carregamento automático, além do sistema REMAX como armamento secundário, que já se encontra em estado avançado de nacionalização e utilização pela Força Terrestre em seus VBTP Guarani 6x6.

Portanto, como sugestão para trabalhos futuros, sugere-se a abordagem de um dos sistemas discutidos, a fim de permitir o adequado detalhamento e especificação de projeto em profundidade. Tendo como base este projeto, torna-se mais fácil a

integração dos subsistemas do veículo, visando sempre a garantia da soberania nacional. Nesse sentido, seguem abaixo as recomendações para trabalhos futuros.

Para o sistema de propulsão e trem de força, recomenda-se o estudo da integração entre dinâmica e cinemática para a avaliação de transposição de um degrau. Além disso, faz-se necessário investigar mais a fundo a curva de um conversor de torque para este tipo de veículo.

Para o sistema de suspensão, com base no estudo da literatura, sugere-se o estudo de viabilidade na utilização de unidade hidropneumáticas em apenas alguns eixos. Assim, torna-se possível comparar o desempenho do uso de barra de torção em todos os eixos com o desempenho utilizando essas unidades apenas em 4 eixos, enquanto emprega-se suspensões hidropneumáticas nos dois eixos dianteiros e no traseiro.

Para o sistema de proteção, dado o caráter empírico desse estudo, sugere-se a pesquisa em blindagens compósitas com espaçamentos de ar ou de um polímero leve, a fim de se obter uma blindagem que se equipara aos padrões internacionais, mas com baixo peso.

Para o sistema de poder de fogo, quando obtidas as variáveis necessárias, é fundamental haver o cálculo de confiabilidade do sistema de carregamento automático empregado, dada a criticalidade da situação de emprego. Ainda, sugere-se investigar uma maneira de planejar a alimentação do armamento secundário de forma a evitar a exposição desnecessária do atirador. Uma possível solução seria desenvolver um sistema de alimentação automática semelhante ao empregado no canhão, de forma que seja possível atirar todas as munições sem a necessidade de fazer a recarga manual. E, finalizando, faz-se necessário adaptar o ângulo de elevação do REMAX para atender ao requisito exigido para um VBC CC.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABARDEEN, T. C. *Test Operations Procedure* TOP 01-1-011A. US Army, feb 2012.

AGE OF TANKS. Minissérie dirigida por Florian Dedio, Anna Kwak, Barbara Necek e Tatiana Ushenko. Netflix, 2017.

AKELLA, K., NAIK, N. K. *Composite Armour – A Review*. Journal of the Indian Institute of Science, nº 3, v. 95, 2015.

ANNES, D. B. O Futuro Carro de Combate do Brasil. Disponível em <https://www.defesanet.com.br/leo/noticia/28010/O-Futuro-carro-de-Combate-do-Brasil/>. Acesso em 03/08/20.

ARES Aeroespacial e Defesa. REMAX. Disponível em <http://www.ares.ind.br/new/pt/sistemas-terrestres/remax.php>. Acesso em 09/08/20.

ARMY MATERIEL COMMAND PAMPHLET. (AMCP) 705-357: *Automotive Bodies and Hulls*. Automotive Series: Engineering Design Handbook. United States Army Material Command. Washington, 1970.

ASSIS, J. M. K. Estudo comparativo de compósitos alumina-zircônia tetragonal e de cerâmicas de alumina aditivadas com nióbia para aplicações estruturais. Tese de Mestrado - INPE. São José dos Campos, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12915: Via férrea – Gabarito ferroviário e entrevia – Especificações. Rio de Janeiro, 2019.

ATA, W.G; OYADIJI, S.O. *An investigation into the effect of suspension configurations on the performance of tracked vehicles traversing bump terrains*. Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility, 52:7, 969-991, 2014.

BASTOS, P.R. Rheinmetall apresenta seu novo canhão de 130 mm. Disponível em <https://tecnodefesa.com.br/rheinmetall-apresenta-seu-novo-canhao-de-130-mm/>. Acesso em 08/08/2020

BÜHLER, S. *The T-14 Armata from a technical point of view*. Disponível em <https://www.offiziere.ch/?p=33534>. Acesso em 05/08/2020.

CANÉPPELE, D.L. Considerações sobre a eventual compra de carros de combate em substituição ao Leopard 1 A5 BR. Disponível em <https://www.defesanet.com.br/leo/noticia/30878/Consideracoes-sobre-a-eventual-compra-de-carros-de-combate-em-substituicao-ao-Leopard-1-A5-BR/>. Acesso em 15/07/2020.

CARVALHO, R. A., CARVALHO, E. A. Nova Couraça: Propostas para o Futuro dos Carros de Combate do Exército Brasileiro. Disponível em <https://www.defesanet.com.br/nc/noticia/33731/Nova-Couraca--Propostas-para-o-Futuro-dos-Carros-de-Combate-no-Exercito-Brasileiro/>. Acesso em 03/08/20.

CHAGAS, C. F. M., TRINDADE, W., GOMES, A. V., LOURO, L. H. L. Redução de Vulnerabilidade de Blindagem de Cerâmica à Base de Alumina. Revista Militar de Ciência e Tecnologia. Rio de Janeiro, 2015.

CHAR DE COMBAT LEOPARD CHÂSSIS. Manuelle Z002/100/TMF/101+102, 28 jul 1965.

COMBUSTÍVEIS – BIBLIOTECA DE NORMAS TÉCNICAS DA SEÇÃO DE GESTÃO LOGÍSTICA DE COMBUSTÍVEL. Diretoria de Abastecimento (D Abst): Comando Logístico (COLOG) do Exército Brasileiro (EB). Disponível em <http://www.dabst.eb.mil.br/index.php/auditoria>. Acesso em 12/05/20.

COSTA NETO, R. T. Notas de Aula: Veículos Militares. Instituto Militar de Engenharia, 2020.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). Peso Máximo por Veículo (QFV), 2012.

DHIR A and SANKAR S. *Assessment of tracked vehicle suspension system using a validated computer simulation model*. Journal of terramechanics 1995; 32(3): 127–149.

DISKETT, D. *Vetronics & Electric Drives Developments*. Light & Medium Armoured Vehicles Conference. Cranfield University, 2008.

EB-RTLI-04.062. PORTARIA Nº 037-EME DE 12 DE FEVEREIRO DE 2020. Requisitos Técnicos, Logísticos e Industriais: Viatura Blindada de Combate Carro de Combate (VBC CC). 1ª Edição, 2020.

EB20-MF-03.109. PORTARIA Nº 42-EME DE 20 DE MARÇO DE 2018. Glossário de Termos e Expressões para Uso no Exército. 5ª Edição, 2018.

ELBIT SYSTEMS. *Elbit Systems Land Tank Ammunition Portfolio*. Disponível em https://elbitsystems.com/media/Catalog-Tanks_15_Web.pdf. Acesso em 07/08/2020.

ESTRATÉGIA NACIONAL DE DEFESA (END). Ministério da Defesa. Brasília, 2012.

FATHY, T; SALEM, A.M. *Evaluation of characteristics of tracked vehicles torsion bars*. Cairo Military Technical college, 2009.

FIELD MANUAL 5-430-00-1. *Planning and design of roads, airfields, and heliports in the theater of operations--road design*. Department of the Air Force. Washington, DC, 1994.

FIGHTING VEHICLES. *K2 Black Panther Autoloader*. Disponível em <http://fighting-vehicles.com/k2-black-panther-tank/k2-black-panther-autoloader/>. Acesso em 06/08/2020.

GENERAL DYNAMICS. *Large Caliber Ammunition*. Disponível em <https://www.gd-ots.com/munitions/large-caliber-ammunition/>. Acesso em 07/08/2020. St. Petersburg, 2010.

GORNI, A.A. Aços avançados de alta resistência: microestrutura e propriedades mecânicas. Disponível em http://www.gorni.eng.br/Gorni_CCM_Dez2008.pdf. Acesso em 16/04/2020. Corte e conformação de metal, 2008.

GUDERIAN, H. *Achtung Panzer! 1914-1937*. Tradução de Luiz Carlos Carneiro de Paula. Editoria Bibliex. Rio de Janeiro, 2009.

HOROWITZ, M.C. E SHALMON, D.A. *The future of war and American military strategy*. Orbis 53, n. 2, pp.300-318. Elsevier, 2009.

HORSFALL, I. *Composite and Advanced Armour Materials*. Light & Medium Armoured Vehicles Conference. Cranfield University, 2008.

IMI SYSTEMS. L44 (MG251/3) - 120mm Smoothbore Tank Guns. Disponível em <https://web.archive.org/web/20161231050132/http://www.imi-israel.com/home/doc.aspx?mCatID=68579>. Acesso em 07/08/2020

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *ISO 4130: Road vehicles - Three dimensional reference system and fiducial marks - Definitions*. England, 2007.

JAZAR, R. N. *Vehicle Dynamics: Theory and Application*. Springer, 2008.

LANZ, W., ODERMATT, W. *Penetration Limits of Conventional Large Caliber Antitank Guns/Kinetic Energy Projectiles*. 13th International Ballistic Symposium, 1992

LECHNER, G., NAUNHEIMER, H. *Automotive Transmissions: Fundamentals, Selection, Design and Application*. Berlin, Germany. Springer-Verlag, 1999

MACLAURIN, B. *High Speed Off-road Vehicles: Suspension, Tracks, Wheels and Dynamics*. Wiley, 2018.

MIL-HDBK-684. *Design of Combat Vehicles for Fire Survivability*. Department of Defense. United States of America, 1995.

MONACO, N.H. *Blindagens Modernas no Brasil*. Disponível em <http://www.ecsbdefesa.com.br/arg/Art%2066.html>. Acesso em 16/04/2020. ECSB Defesa, 2004.

MTU. *Diesel Engine 10V 890 for Medium and Heavy Military Vehicles*. Disponível em https://mtu-online-shop.com/print/3232171_MTU_Def_spec_10V890.pdf. Acesso em 09/10/2020

NAUNHEIMER, H. ET AL. *Automotive Transmissions: Fundamentals, Selection, Design and Application. Second Edition*. Springer, 2011.

OGORKIEWICZ, R.M. *Technology of Tanks*. Jane's Information Group. United Kingdom, 1998.

OLIVEIRA, S. S., WEBER, R.P., SUAREZ, J. C. M., SOUZA, E. R. S. Aço de alta dureza para aplicação balística: propriedades mecânicas. *Revista Matéria* nº 3, v. 24, 2019.

OLIVEIRA, S.S. Estudo de Efeitos Terminais em Aço Especial de Alta Dureza após Impacto Balístico. Dissertação de Mestrado – IME. Rio de Janeiro, 2015.

OSINSKI, A. *T-64A Main Battle Tank*. Kagero. Lublin, 2006.

POSEN, B. R. *The Case For Restraint*. Disponível em <http://www.the-american-interest.com/ai2/article.cfm?id=331&Mid=16>. Acesso em 02/04/2020. The American Interest, 2007.

RAHMAN, A. HAFEEZUR, AMEER MALIK SHAIK, J. RAJESH KUMAR, V. BALAGURU, E P. SIVAKUMAR. *Design Configuration of a Generation Next Main Battle Tank for Future Combat*. *Defence Science Journal* 67, n. 4, 2017.

RENK. *HSWL 284C powershift transmission*. Disponível em <https://www.renk-ag.com/en/products-and-service/products/vehicle-transmissions/hswl-284c/>. Acesso em 09/10/2020.

RESOLUÇÃO CONTRAN Nº 640, DE 14 DE DEZEMBRO DE 2016. Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN).

SINGH ET AL, B.B., SUKUMAR, G., SENTHIL, P.P., JENA, P.K., REDDY, P.R.S., KUMAR, K.S., MADHU, V. E REDDY, G.M. *Future Armour materials and technologies for combat platforms*. *Defence Science Journal* 67, n. 4, p.412, 2017.

SOUZA, E.R., WEBER, R. P., SUAREZ, J. C. M. Desempenho de um aço de alta dureza para emprego em blindagens balísticas. *Revista Militar de Ciência e Tecnologia* nº1, v. 33. Rio de Janeiro, 2015.

TERRY, T. W. *Fighting vehicles*. Oxford [England]; New York: Pergamon Publishing Corporation, 1991.

WAY, S. *Autoloader*. Disponível em http://www.army-guide.com/eng/article/article_477.html. Acesso em 05/08/2020.

WONG, J.Y. *Theory of ground vehicles*. Ed. 3. John Wiley & Sons, New York, 2001