

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA
E DE MATERIAIS

EDMAR HINCKEL

**INCORPORAÇÃO DE REQUISITOS A MODELOS DE SISTEMAS
ATRAVÉS DA APLICAÇÃO DE SYSML COMO SUPORTE AO
PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS**

DISSERTAÇÃO

CURITIBA

2016

EDMAR HINCKEL

**INCORPORAÇÃO DE REQUISITOS A MODELOS DE SISTEMAS
ATRAVÉS DA APLICAÇÃO DE SYSML PARA MELHORIA DO
PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica - Área de concentração: Engenharia de Manufatura.

Orientador: Prof. Dr. Milton Borsato

CURITIBA

2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

H659i Hinckel, Edmar
2016 Incorporação de requisitos a modelos de sistemas através
da aplicação de SYSML para melhoria do processo de
desenvolvimento de produtos / Edmar Hinckel.-- 2016.
137 p.: il.; 30 cm.

 Texto em português, com resumo em inglês.
 Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica
Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Mecânica e de Materiais. Área de concentração: Engenharia
de Manufatura, Curitiba, 2016.
 Bibliografia: p. 101-111.

 1. Engenharia mecânica - Dissertações. 2. Engenharia
de sistemas - Modelos. 3. Modelagem de sistemas -
Linguagem. 4. Produtos novos. I. Borsato, Milton.
II. Título.

CDD: Ed. 22 -- 620.1

Biblioteca Ecoville da UTFPR, Câmpus Curitiba

TERMO DE APROVAÇÃO

EDMAR HINCKEL

INCORPORAÇÃO DE REQUISITOS A MODELOS DE SISTEMAS ATRAVÉS DA APLICAÇÃO DE SYSML PARA MELHORIA DO PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS

Esta Dissertação foi julgada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração em Manufatura, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais.

Prof. Paulo César Borges, Dr.
Coordenador do Programa

Banca Examinadora

Prof. Milton Borsato, Dr.
UTFPR - orientador

Prof. Régis Kovacs Scalice, Dr.
UFSC

Prof. Paulo César Stadzisz, Dr.
UTFPR

Prof. Carlos Cziulik, Dr.
UTFPR

Curitiba, 13 de Dezembro de 2016

Aos meus pais e filho, pelo eterno apoio,
carinho e incentivo na busca por meus
objetivos.

AGRADECIMENTOS

À minha família, pela confiança, paciência e incentivo, durante todos os momentos de dedicação ao trabalho. Em especial meu pai, Orli, minha mãe, Nazilde, e meu filho, Eddi, por sempre apoiarem as minhas escolhas.

Aos participantes do projeto Manufatura Inteligente e todos os amigos que fiz durante esta caminhada. À colega Juliana Schmidt, pela dedicação e contribuição no projeto. Ao professor Milton Borsato, pela paciência, competência, seriedade e valiosas orientações ao decorrer do trabalho. Ao PPGEM - UTFPR e empresa parceira, pela oportunidade de realizar a pesquisa.

A todos os verdadeiros amigos, em especial João Elias Fidelix e o professor Tiago Rodrigues Weller, que não tiveram participação direta neste trabalho, mas que sempre me encorajaram e incentivaram em todos os momentos.

“A mente que se abre a uma nova ideia
jamais voltará ao seu tamanho original”
(Albert Einstein).

HINCKEL, Edmar, **INCORPORAÇÃO DE REQUISITOS A MODELOS DE SISTEMAS ATRAVÉS DA APLICAÇÃO DE SYMML PARA MELHORIA DO PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS**, 2016, Dissertação de Mestrado em Engenharia de Manufatura - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 138 p.

RESUMO

A multidisciplinaridade, característica de um Processo de Desenvolvimento de Produtos (PDP), sobretudo em um ambiente de Engenharia Simultânea (CE - do inglês *Concurrent Engineering*), no qual vários métodos e ferramentas são utilizados, torna complexo o fluxo de informações ao longo do processo. Embora existam abordagens como a Gestão do Ciclo de Vida do Produto (PLM - do inglês *Product Lifecycle Management*) e ferramentas de apoio (e.g. CAD; CAE; CAM), não há uma linguagem comum a todos os elementos do PDP, causando múltiplas interpretações da informação, podendo prejudicar os resultados. Neste contexto, destaca-se o dinamismo dos requisitos do produto ao longo do PDP. Muitas empresas costumam considerar etapas isoladas no início do PDP para a identificação dos requisitos do produto, porém, geralmente, não consideram as interações entre os diferentes requisitos e seu impacto sobre os elementos do sistema que compõem o produto. Diante de tal problemática, a abordagem Engenharia de Sistemas, baseada em Modelos (MbSE - do inglês *Model-based System Engineering*), propõe uma representação de produto através de um modelo único e atemporal, que assume o papel de guiar todo o ciclo de vida do produto, sendo a única fonte de informação aos *stakeholders* (i.e. envolvidos no PDP), representando todas as inter-relações existentes entre componentes, sistemas e subsistemas. Para aplicar a abordagem MbSE, muitos estudos propõem o uso da linguagem SysML (*System Modeling Language*) para modelar sistemas complexos. Neste sentido, o objetivo deste trabalho é propor um modelo de sistema que possibilite a fiel representação de um produto, auxiliando a identificação e gestão dos requisitos ao longo do PDP. O modelo proposto possibilita o acesso e rastreabilidade das informações do produto, em diferentes níveis de abstração, a todos os *stakeholders*. A execução dos procedimentos metodológicos da pesquisa baseia-se na abordagem DSR. Tal abordagem é composta pelas etapas de identificação do problema, definição de objetivos, desenvolvimento da solução, avaliação e comunicação dos resultados. A pesquisa é aplicada no contexto de uma fabricante global de máquinas agrícolas, sobretudo no PDP de um trator. O produto será representado através de um modelo de sistema usando a linguagem SysML. A modelagem e acesso às informações do produto, através do modelo, são demonstrados e avaliados de acordo com os critérios da DSR. Utilizando o modelo, é possível identificar o impacto dos requisitos nos diferentes componentes do produto, bem como as inter-relações presentes no sistema. Além disso, possibilita-se o acesso às informações do modelo por diferentes *stakeholders*, demonstrando seu uso com ferramentas CAD e de Gestão de Requisitos.

Palavras-chave: Model-based Systems Engineering, System Modeling Language, Processo de Desenvolvimento de Produto.

HINCKEL, Edmar, **INCORPORAÇÃO DE REQUISITOS A MODELOS DE SISTEMAS ATRAVÉS DA APLICAÇÃO DE SYSML PARA MELHORIA DO PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS**, 2016, Dissertação de Mestrado em Engenharia de Manufatura - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 138 p.

ABSTRACT

The Product Development Process (PDP) multidisciplinary characteristic, into a Concurrent Engineering (CE) environment, where several systems, methods and tools are used, means that the information flow on PDP becomes complex. There are approaches, even as Product Lifecycle Management (PLM), and support tools (e.g. CAD; CAE; CAM), but there is no a common language for all PDP components, arise multiple interpretations about information, prejudicing product results. This scenario highlights the requirements dynamism along the PDP stages. These are given from the customer needs, increasing its detail level through the process evolution. Generally, enterprises treat the requirements through standalone stages at the PDP start, but not consider the requirements interactions and its impacts about the all products systems components. In this context, the Model-based System Engineering (MbSE) approach proposes a product representation structure, through a unique and atemporal model, which assumes the role of a PDP guide, being the unique information source to stakeholders. This model is able to represent all components, system and subsystems interactions. Last years, several enterprises has used the language System Modeling Language (SysML) for modeling complex systems, achieving good results. In this sense, the goal of this work is propose a model that allows a loyal product representation, able to help the requirements definition and management along the PDP. This model allow the product information access, usage and traceability at various abstraction levels, by all stakeholders. The execution of the methodological procedures is based on the DSR approach. This approach consists of problem identification, goal setting, solution development, evaluation and reporting of results. The research is applied in the context of a global manufacturer of agricultural machinery, especially a tractor PDP. The product is represented through a system model using the SysML language. The modeling and product information is demonstrated and evaluated according to the DSR criteria. Using the model, is possible to identify the impact of the requirements on the different components of the product, as well as the interrelationships present in the system. In addition, it is possible to access the model information by different stakeholders, demonstrating its use with CAD tools and Requirements Management.

Keywords: Model-base System Engineering, System Modeling Language, Product Development Process.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Lacunas no PDP	2
Figura 2 - Processo de Desenvolvimento de Produtos	13
Figura 3 - Sistema técnico	14
Figura 4 - Engenharia de Sistema	15
Figura 5 - Engenharia Simultânea versus Abordagem Tradicional	17
Figura 6 - Estrutura do PLM	18
Figura 7 - Fluxo de Informações PDP	20
Figura 8 - Conhecimentos gerados ao longo do PDP	21
Figura 9 - Padrões ISO para intercâmbio de informações	22
Figura 10 - STEP AP233 versus STEP AP239	23
Figura 11 - Sintaxe padrão STEPAP242	23
Figura 12 - Comunicação entre o modelo do sistema e ferramentas do PDP	24
Figura 13 - Representação de um metamodelo UML	26
Figura 14 - Estrutura SysML	28
Figura 15 - Hierarquia dos diagramas no SysML	29
Figura 16 - SysML versus UML	30
Figura 17 - Modelo OWL	30
Figura 18 - Representação de um modelo UML no padrão XMI	32
Figura 19 - Informações básicas no padrão ReqIF	33
Figura 20 - Mapeamento ReqIF.....	33
Figura 21 - Intercâmbio de requisitos através do padrão ReqIF.....	34
Figura 22 - Esquema de um modelo de transformação	34
Figura 23 - Restrições de um produto	36
Figura 24 - Estrutura básica HoQ	37
Figura 25 - Processo V	38
Figura 26 - Processo W	39
Figura 27 - Sintaxe de um <i>boilerplate</i>	39
Figura 28 - Procedimento metodológico.....	44
Figura 29 - PDP empresa estudada	45
Figura 30 - Estrutura hierárquica do TE	46
Figura 31 - Estratégia utilizada no diagnóstico	48
Figura 32 - Processo de Criação de Componentes	50
Figura 33 - Procedimento para o desenvolvimento do modelo	52

Figura 34 - Procedimento para elicitação de requisitos	52
Figura 35 - Leiaute especificação-meta	53
Figura 36 - Quadro UC	53
Figura 37 - Objetivos dos elementos do modelo SysML	54
Figura 38 - Leiaute Matriz de Rastreabilidad	56
Figura 39 - Estrutura do modelo proposto	57
Figura 40 - Intercâmbio de informações entre o modelo SysML e ferramenta CAD ...	59
Figura 41 - Sistemas no TE	59
Figura 42 - Estrutura funcional básica TE	60
Figura 43 - Estrutura funcional básica da cabine	60
Figura 44 - HoQ 1	61
Figura 45 - Telhado HoQ	64
Figura 46 - Quadro de Caso e uso	64
Figura 47 - Informações de entrada para o modelo SysML	65
Figura 48 - Browser Visual Paradigm	65
Figura 49 - Primeira parte do modelo SysML proposto	65
Figura 50 - Diagrama UCD para cenário de estudo	66
Figura 51 - Diagrama BDD estrutura funcional	67
Figura 52 - Segunda parte do modelo SysML	67
Figura 53 - Representação de requisitos	68
Figura 54 - Desdobramento de requisitos	69
Figura 55 - Alocações de funções	69
Figura 56 - Terceira parte do modelo SysML	70
Figura 57 - Desdobramento hierárquico do TE	71
Figura 58 - Restrição de forma Cabine	71
Figura 59 - Diagrama <i>Packaging</i> para modelo 3D	72
Figura 60 - Diagrama BDD para restrições de forma	73
Figura 61 - Diagrama BDD para elementos geométricos	73
Figura 62 - Diagrama BDD para restrições geométricas	74
Figura 63 - Suporte metálico do banco	74
Figura 64 - Diagrama BDD para restrições de manufatura	75
Figura 65 - Diagrama BDD para restrições de esforços	75
Figura 66 - Diagrama IBD para Cabine	76
Figura 67 - Diagrama IBD para CBO	76
Figura 68 - Diagrama IBD para suporte do banco	77

Figura 69 - Diagrama IBD relação pedal do freio e Sistema de Frenagem	77
Figura 70 - Pedal do freio	78
Figura 71 - Diagrama IBD pedal direito do freio	78
Figura 72 - Bloco atualizado pedal direito do freio	79
Figura 73 - Diagrama BDD de composição pedal direito do freio	79
Figura 74 - Quarta parte do modelo SysML	79
Figura 75 - Diagrama BDD decomposição pedal direito do freio	80
Figura 76 - Diagrama de requisitos alavanca	80
Figura 77 - Diagrama paramétrico para norma OECD	81
Figura 78 - Relacionamentos requisito norma OECD	81
Figura 79 - Distâncias mínimas aplicadas à cabine	82
Figura 80 - Diagrama BDD para restrições de posicionamentos	82
Figura 81 - Diagrama paramétrico de posicionamentos	83
Figura 82 - Diagrama de requisitos Cabine	84
Figura 83 - Rastreabilidade de informações no <i>Visual Paradigm</i>	84
Figura 84 - Recorte da Matriz de Rastreabilidade	85
Figura 85 - Importação de requisitos no <i>Polarion</i>	86
Figura 86 - Estrutura dos requisitos no <i>Polarion</i>	86
Figura 87 - Criação de atividades no <i>Polarion</i>	87
Figura 88 - DMU preliminar Cabine TE	88
Figura 89 - Previsão roteamento de cabos e chicotes Cabine TE	88
Figura 90 - Diagrama IBD para geometria prévia de roteamento	89
Figura 91 - Lista de propriedades CBO	89
Figura 92 - Simulação no <i>Design Ergonomic Analysis</i>	90
Figura 93 - Importação de parâmetros do CBO no CAD	90
Figura 94 - Aplicando restrições de manufatura no CAD	91
Figura 95 - Consulta requisitos pedal do freio	92
Figura 96 - Lista propriedades pedal do freio	92
Figura 97 - Simulação CAE	93
Figura 98 - Proposta novo PCC	94
Figura 99 - Ambiguidade semântica entre requisitos	96
Figura 100 - Roteiro para entrevistas com <i>stakeholders</i>	112
Figura 101 - HoQ2 com requisitos da cabine	113
Figura 102- Matriz de Rastreabilidade	114
Figura 103 - Informações do STEPAP242 exportadas pelo SFA	115

Figura 104 - Requisitos norma N12	116
Figura 105 - Requisitos Norma ISO 26322-1	118
Figura 106 - Desenho CBO	120

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Aplicações da linguagem SysML no PDP	5
Quadro 2 - Tipos de conhecimentos	20
Quadro 3 - Diagramas UML	27
Quadro 4 - Objetivos diagramas SysML	29
Quadro 5 - Solicitações de engenharia	47
Quadro 6 - Oportunidades no PCC	51
Quadro 7 - Organização do modelo SysML	54
Quadro 8 - Especificação-meta	62
Quadro 9 - Critérios para avaliação do modelo	95

LISTA DE ACRÔNIMOS

AI	<i>Artificial Intelligence</i>
BOM	<i>Bill of Materials</i>
BPMN	<i>Business Process Model and Notation</i>
CAD	<i>Computer -Aided Design</i>
CAS	<i>Computer Algebra System</i>
CAM	<i>Computer-Aided Manufacturing</i>
CAE	<i>Computer- Aided Engineering)</i>
CE	<i>Concurrent Engineering)</i>
CD	<i>Conceptual Design</i>
DMU	<i>Digital Mockup Unit</i>
DSR	<i>Design Science Research</i>
EAP	<i>Estrutura Hierárquica de Projeto</i>
ECAD	<i>Electronic Computer-Aided Design</i>
ECR	<i>Engineering Change Requests</i>
EDA	<i>Ergonomic Design Analysis</i>
FBD	<i>Functional Block Diagram</i>
INCOSE	<i>International Council on Systems Engineering</i>
KBE	<i>Knowledge-based Engineering</i>
KM	<i>Knowledge Management</i>
KSE	<i>Knowledge System Engineering</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineer</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
MBD	<i>Model-Based Definition</i>
MbSE	<i>Model-based Engineering</i>
OMG	<i>Object Management Group)</i>
OWL	<i>Ontology Web Language</i>
PD	<i>Package Diagram</i>
PLM	<i>Product Lifecycle Management</i>
QFD	<i>Quality Functional Deployment)</i>
PDP	<i>Processo de Desenvolvimento de Produtos</i>
RM	<i>Requirements Management</i>
SE	<i>System Engineering</i>
SIP	<i>Seat Index Point</i>
STEP	<i>Standard for Exchange of Product Model Data</i>
TE	<i>Trator de Estudo</i>
UML	<i>Unified Modeling Language</i>
SysML	<i>System Modeling Language</i>
UCD	<i>Use Case Diagram</i>
BDD	<i>Block Definition Diagram</i>
CBO	<i>Conjunto Banco Operador</i>
OECD	<i>Organization for Economic Co-operation and Development</i>
ReqIF	<i>Requirements Interchange Format</i>
XML	<i>Extensible Markup Language</i>
XMI	<i>XML Metadata Interchange</i>
BPMN	<i>Business Process Management and Notation</i>
PCC	<i>Processo de Criação de Componentes</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	O PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS (PDP)	1
1.2	ABORDAGENS DE SUPORTE AO PDP	3
1.3	O QUE NECESSITA SER OTIMIZADO NO PDP?	7
1.4	OBJETIVOS	9
1.4.1	Objetivo geral	9
1.4.2	Objetivos específicos	9
1.5	JUSTIFICATIVA	10
1.6	ESTRUTURA DO TRABALHO	11
2	O AMBIENTE DO PDP	12
2.1	CARACTERÍSTICAS DO PDP DE PRODUTOS COMPLEXOS	12
2.2	FLUXO DE INFORMAÇÕES NO PDP	19
2.3	<i>MODEL-BASED SYSTEM ENGINEERING</i>	24
2.4	LINGUAGENS DE SUPORTE AO MBSE	25
2.4.1	UML	26
2.4.2	SysML	27
2.4.3	OWL	30
2.4.4	Considerações sobre as linguagens SysML e OWL	31
2.4.5	XML	31
2.4.6	ReqIF	32
2.4.7	Modelos de transformação	34
2.4.8	BPMN	35
2.5	GESTÃO DE REQUISITOS NO PDP	35
2.6	CONSIDERAÇÕES SOBRE O AMBIENTE DO PDP	39
3	ASPECTOS METODOLÓGICOS	41
3.1	CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA	41
3.2	PROCEDIMENTO METODOLÓGICO	42
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
4.1	CONSIDERAÇÕES SOBRE A EMPRESA	45
4.2	DIAGNÓSTICO	46
4.3	DESENVOLVIMENTO DO MODELO	49
4.4	DEMONSTRAÇÃO DO MODELO	58
4.4.1	Ferramentas computacionais utilizadas	58
4.4.2	Delimitação do Sistema	59
4.4.3	Funções do produto	60
4.4.4	Elicitação de requisitos	61
4.4.5	Especificação-meta	62
4.4.6	Casos de uso	63
4.4.7	Organização do modelo SysML	65
4.4.8	Modelagem do ambiente	65
4.4.9	Modelagem funcional	66
4.4.10	Modelagem dos requisitos	67
4.4.11	Modelagem estrutural	70

4.4.12	Modelagem de restrições	70
4.4.13	Modelagem interna do sistema	75
4.4.14	Modelagem paramétrica	79
4.4.15	Rastreabilidade de informações	83
4.4.16	Uso do modelo no PCC	85
4.5	PROPOSTA PARA FUTURO PCC	92
4.6	DISCUSSÃO	95
4.7	AVALIAÇÃO DO MODELO	95
5	CONCLUSÕES	98
	REFERÊNCIAS	101
	APÊNDICES	112
	ANEXOS	115

1 INTRODUÇÃO

1.1 O PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS (PDP)

O PDP envolve múltiplas disciplinas, cada uma com seu time de especialistas, de diferentes culturas e localizações, trocando informações simultaneamente durante todo o ciclo de vida do produto, o que origina um produto multidisciplinar e globalizado. Segundo Deshpande (2013), abordagens como a Engenharia Simultânea (CE - do inglês *Concurrent Engineering*) auxiliam na integração dos elementos envolvidos no PDP. Porém, neste ambiente colaborativo, não há uma linguagem comum para todas as informações geradas, dificultando o fluxo de informações (TOMIYAMA et al., 2007). As informações geram diferentes tipos de conhecimento ao longo do ciclo de vida do produto, são compartilhadas através de diferentes formatos e níveis de abstração. Para tanto, são utilizadas diferentes ferramentas, conforme avançam as etapas do desenvolvimento (e.g. modelos tridimensionais; planilhas; textos; fórmulas matemáticas, vídeos, imagens) (CHANDRASEGARAN et al., 2013). Tal fato, somado ao fator humano envolvido, gera múltiplas interpretações sobre o produto como um todo (MOHAMMED; DUMVILLE, 2001; CHAMI; BRUEL, 2015).

As tarefas do PDP são planejadas antecipadamente. Porém, a relação existente entre os atores é construída, geralmente, ao decorrer do desenvolvimento. Os atores, por sua vez, necessitam de descobertas de outros atores para executar suas ações (WEICK; ROBERTS, 1993). Essas interações afetam diretamente a eficiência do PDP. Entretanto, para acelerar o lançamento dos produtos no mercado, algumas interações são ignoradas, ou não percebidas, prejudicando o desempenho do produto. Neste contexto, algumas atividades podem ser realizadas sem considerar a correta e necessária especificação, o que prejudica a tomada de decisões. Logo, a eficiência da gestão do conhecimento (KM – do inglês *Knowledge Management*) nesse processo é fundamental. Segundo Kotnour et al. (1997), KM consiste em um conjunto de intervenções entre pessoas, processos e ferramentas, a fim de possibilitar a criação, assimilação, disseminação e aplicação do conhecimento. A grande quantidade de dados gerada durante o PDP necessita transformar-se em informações, para que, por sua vez, gere conhecimento. Essa estruturação da informação depende, entre outros fatores, do projetista, o qual necessita formalizar um conhecimento adquirido, para que o mesmo seja filtrado e transferido aos demais

atores, através de um meio eficiente (TICHKIEWITCH, 2011; CHANDRASEGARAN et al., 2013).

Em uma das principais fases do PDP, denominada por Pahl et al. (2013) como Projeto Conceitual (CD - do inglês *Conceptual Design*), as informações originadas do consumidor devem ser transformadas em conhecimento, por meio da definição clara dos requisitos e problemas de projeto, a fim de permitir a proposta de um conceito que atenda aos desejos do consumidor. Porém, em projetos complexos, são encontradas lacunas na estrutura de informações do CD (BRACE; EKMAN, 2012). Observam-se, na Figura 1, duas principais lacunas no CD. A primeira encontra-se entre as informações coletadas sobre as necessidades do cliente (Fases 1 e 2), as quais consistem, geralmente, em textos breves com algumas sentenças, e a definição das especificações de projeto (Fase 3). Esta lacuna relaciona-se à dificuldade das empresas em traduzir as necessidades dos clientes em especificações técnicas. Tais especificações, quando mal interpretadas, podem gerar soluções conceituais que não satisfaçam as necessidades do cliente. Esse problema consiste na segunda lacuna da Figura 1 (entre Fases 3 e 4). Conseqüentemente, com requisitos mal definidos, a seleção e o refinamento do conceito (Fases 5 e 6) podem ser comprometidos. Tal fato costuma gerar a necessidade de grandes alterações no produto, demandando esforços e custos extras.

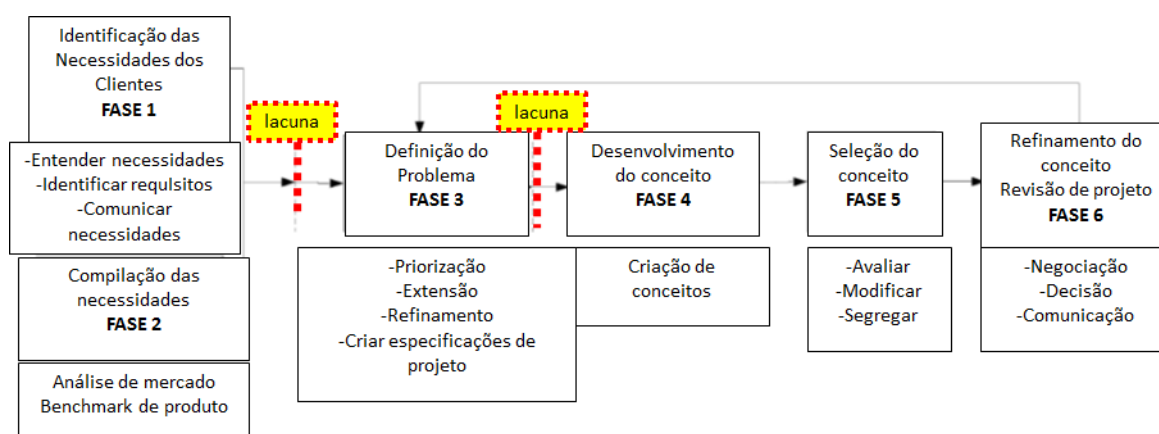


Figura 1 – Lacunas no PDP

Fonte: Adaptado de Brace e Ekman (2012) e Pahl et al. (2013)

Desta forma, a Gestão de Requisitos (RM - do inglês *Requirements Management*) é um elemento-chave no ciclo de vida de produtos complexos. Porém, geralmente, tal conceito é aplicado de forma isolada durante o PDP, não considerando

os impactos das interações entre os requisitos. Neste sentido, ferramentas como o *Quality Function Deployment* (QFD) auxiliam na tradução dos requisitos do cliente em requisitos técnicos, sua priorização, a fim de garantir a qualidade do produto (AKAO, 2004). Porém, a gestão de requisitos não deve ser aplicada somente no início do PDP, mas, sim, em todo o ciclo de vida do produto. Tal gestão é composta pelas seguintes tarefas: a elicitacão dos requisitos (i.e. coleta de dados); triagem; especificacão e gestão de mudanças (HACKENBERG; RICHTER; ZÄH, 2014). Contudo, além dos requisitos, muitas outras informaçoes são geradas no PDP, as quais necessitam de gestão e rastreabilidade (e.g. funçoes, regras, estrutura).

1.2 ABORDAGENS DE SUPORTE AO PDP

A fim de auxiliar na gestão do PDP, diversas tecnologias e práticas têm sido propostas nos últimos anos objetivando, também, aumentar sua eficiência (EPPINGER, 2011). O avanço e o amplo uso de ferramentas (e.g. *Computer-Aided Engineering* (CAE); *Computer-Aided Design* (CAD); *Electronic Computer-Aided Design* (ECAD)) têm auxiliado na validacão de conceitos em etapas iniciais do desenvolvimento de produto (ZHANG et al., 2010). Neste âmbito, a estratégia *Product Lifecycle Management* (PLM) auxilia a captura, manipulacão e utilizacão das informaçoes entre as áreas de conhecimento do PDP. Porém, diante de sistemas complexos, estas soluçoes não possibilitam explicitar de forma semântica as informaçoes, nem promover a colaboracão necessária à integracão de times multidisciplinares, os quais utilizam diversas ferramentas e linguagens (RACHURI et al., 2008; IRAQI-HOUSSAINI; KLEINER; ROUCOULES, 2011). Tal fato está relacionado à característica heterogênea e dinâmica das informaçoes presentes no ciclo de vida dos produtos (YASSINE; SREENIVAS; ZHU, 2008; WU, D. et al., 2011). Neste cenário, abordagens tradicionais de modelos de processos comumente descrevem quais atividades devem ser executadas no projeto, não detalhando como as atividades devem ser concluídas e como são suas interdependências (i.e. como, quando e de que forma as atividades estão relacionadas) (FRIEDENTHAL; MOORE; STEINER, 2014).

Conforme Quintana et al. (2010), a Definição Baseada em Modelo (MBD - do inglês *Model-Based Definition*) tem ganhado grande destaque nas indústrias. Hartman e Ropp (2013) estudam a utilizacão da abordagem MBD em instruções de trabalho de

manutenção em uma indústria de aviação. Segundo eles, um princípio fundamental para um ambiente PLM consiste no uso de modelos 3D com alta fidelidade, particularmente evidente na indústria de aviação, na qual os ciclos de vida de aeronaves geralmente atingem 80 anos ou mais. Já Quintana et al. (2010) estudam as principais barreiras necessárias à implantação de uma iniciativa MBD, em duas empresas da indústria aeroespacial canadense, com foco na eliminação de desenhos 2D (*drawings*), guiando-se apenas com modelos tridimensionais fiéis (3D). Entretanto, ainda segundo Quintana et al. (2010), a implantação não convenceu as empresas a seguirem com o modelo proposto, devido à instabilidade e não integridade dos dados, originados por incompatibilidade entre sistemas. De acordo com Sharma e Bowonder (2004) e Bhanumathi e Haridas (2013), o Boeing B-777 é um dos primeiros aviões da indústria aeronáutica a utilizar o conceito MBD, no qual a montagem do avião era simulada por uma ferramenta digital denominada *Digital Mock-Up* (DMU) que utilizava as informações geométricas e de manufatura presentes nos modelos CAD 3D.

Aliadas ao conceito MBD, abordagens de Engenharia de Sistemas baseadas em modelos (MbSE - do inglês *Model-based System Engineering*) têm sido propostas (WEILKIENS, 2011; MHENNI et al., 2014). Tal conceito tem o objetivo de conceber e permitir a manutenção de sistemas de engenharia (BHANUMATHI; HARIDAS, 2013). Neste contexto, destaca-se a linguagem *System Modeling Language* (SysML). Segundo Durugbo (2013), a SysML tem sido aplicada em diversas indústrias, visando à modelagem de requisitos, descrição da conectividade de sistemas físicos e modelagem da estrutura das organizações. Contudo, inicialmente, muitos estudos de aplicação da SysML abordavam a engenharia reversa de processos de engenharia, ou seja, na modelagem de sistemas físicos já existentes. Recentemente, todavia, relevantes publicações abordam a aplicação da SysML no contexto do PDP (QAMAR; WIKANDER; DURING, 2014; WU; HSIEH, 2012; CHAMI; BRUEL, 2015).

A comunidade aeroespacial tem utilizado a SysML em diversas aplicações (e.g. desenvolvimento de satélites; desenvolvimento de sondas espaciais) (COLE; DELP; DONAHUE, 2010; SPANGELO et al., 2012; KASLOW et al., 2014; LUTHER, 2016). Porém, estudos recentes mostram vários outros segmentos (e.g. automobilístico; sistemas mecatrônicos; alimentício; tecnologia) que aplicam a SysML no PDP. O Quadro 1 apresenta alguns destes principais estudos, realizados nos últimos seis anos, com uma breve descrição.

Fonte	Descrição do estudo de caso
ANDRIANARISON; PIQUES., 2010	Modelagem de sistemas automotivos embarcados, no desenvolvimento de produtos da empresa Valeo
SHAHID, 2011	Mapeamento entre modelos CAD e modelos SysML
VOGEL-HEUSER et al., 2014	Os autores propõem uma abordagem baseada em SysML, para o desenvolvimento de softwares aplicados em sistemas de manufatura. a abordagem possibilitou a integração entre modelos de software e hardware.
TÖRNGREN et al., 2014	Modelagem de um sistema mecatrônico através da linguagem SysML, integrando o modelo com os usuários, especificações e ferramentas como CAD e simulink.
MHENNI et al., 2014	Modelagem SysML do sistema de um telescópio eletrônico.
APVRILLE; ROUDIER, 2014	Determinação e validação de requisitos de segurança para sistemas automotivos embarcados, aplicado na atualização de <i>firmware</i> de uma unidade de controle do veículo
LASALLE; PEUREUX; FONDEMENT, 2011	Desenvolvimento de um conjunto de ferramentas, para automatização de testes físicos em veículos, para a validação de sistemas embarcados.
BARBIERI; FANTUZZI; BORSARI, 2014	Modelagem do sistema de enchimento da embalagem Tetra Pak. Neste estudo verifica-se a integração do modelo do sistema com outras ferramentas utilizadas no desenvolvimento, como o <i>simulink</i> , utilizado para simular o controle dos parâmetros do sistema.
DEMOLY et al., 2010	Desenvolvimento de uma aplicação PLM baseada na web, utilizando a linguagem SysML, para otimizar a eficácia na utilização das informações no ciclo de vida do produto.
WU et al. (2011)	Aplicação da sysml no desenvolvimento de gabinetes de quadros elétricos
BRACE; EKMAN, 2012	Utilização da SysML na criação de um <i>ckecklist</i> para análise e validação de requisitos de uma empilhadeira.
MOESER; ALBERS; KUMPEL, 2015	Proposta de abordagem para a utilização de desenhos junto aos diagramas do SysML.
ROTA; SIEGERT; BRISOLARA, 2014	Aplicação do SysML na gestão de requisitos de um freio ABS

Quadro 1 - Aplicações da linguagem SysML no PDP

Autores	Descrição do estudo de caso
CHAMI; BRUEL, 2015	Utilização da SysML e da Inteligência Artificial (AI) no desenvolvimento de um robô
LUTHER, 2016	Integração da SysML com um <i>framework</i> de simulação de satélite chamado HORIZON
BATARSEH; HUANG; MCGINNIS, 2014	Automação da criação de modelos de simulação através da SysML
CHANG et al., 2014	Proposta de uma ferramenta, baseado na SysML e modelagem de transformação (<i>Atlas Transformation Language</i>), com o objetivo de auxiliar a gestão de requisitos de um produto
RIBEIRO et al., 2016	Gestão de requisitos em tempo real incluindo software e hardware, através da SysML
QAMAR; WIKANDER; DURING, 2014	Integração entre a SysML e um software CAD (Solid Edge), através de modelos de transformação, aplicado no desenvolvimento de um robô.
FAN et al. 2015	Geração automática de modelos CAD através de modelos SysML
BAJAJ, MANAS; COLE; ZWEMER, 2016	Análise bidirecional entre modelos CAD e SysML
DURUGBO, 2013	Proposta de estrutura para integrar sistemas do veículo e requisitos de cliente, de forma a garantir a eficiência e valor agregado do produto.
SAKAIRI ET AL., 2013	Integração entre a ferramenta <i>IBM Rational Rhapsody</i> , utilizada para modelagem SysML, com a ferramenta de simulação <i>math works simulink</i> e <i>Computer Algebra System (CAS)</i>
FERRARI ET AL., 2013	Os autores estudam os desafios e lições aprendidas, durante dez anos de uso da abordagem SysML no desenvolvimento de produtos na empresa <i>General Electric Transportation Systems (GETS)</i> , no segmento de sinalização ferroviária.
CRANE; BROWNLOW, 2015	Aplicação do SysML no desenvolvimento de um satélite

Quadro 1 (Cont.) - Aplicações da linguagem SysML no PDP

Entre a maioria das publicações analisadas, há um grande foco na integração entre as diferentes linguagens utilizadas no PDP. Para resolver este problema no contexto do MbSE, tem-se utilizado abordagens de modelos de transformação. Respondendo a tal desafio, Bajaj et al. (2011) propõem uma abordagem denominada *System Lifecycle Management (SLIM)*, a qual utiliza a SysML como guia para as atividades de um sistema de engenharia, através da aplicação de um conjunto de ferramentas computacionais que permitem a integração do modelo SysML com diversas ferramentas do ciclo de vida do produto (e.g. CAD; CAE; Simulink) e

comunicação com o ambiente PLM, por meio de modelos de transformação. A abordagem é motivada por lacunas identificadas em etapas do desenvolvimento de produto na NASA. Estas lacunas consistem, basicamente, na desestruturação da informação devido à falta de interoperabilidade entre ferramentas utilizadas em várias áreas do conhecimento e etapas distintas do desenvolvimento (e.g. modelagem de sistemas e simulações). Tal abordagem de integração deu origem a uma ferramenta comercial chamada *Syndea*, do fabricante Intercax. Com determinadas limitações, esta ferramenta permite a análise e geração de modelos geométricos (i.e. modelados em ferramentas CAD) e sua integração com demais sistemas como PLM, ferramentas RM, Gestão de Projetos e simulações (e.g. *Modelica*, *Simulink*).

1.3 O QUE NECESSITA SER OTIMIZADO NO PDP?

Segundo Koen et al. (2001), validações e análises antecipadas de produtos reduzem retrabalhos e custos excessivos com protótipos físicos, fatores que impactam diretamente o custo do PDP e, conseqüentemente, do produto final. Neste contexto, em 2011, a Toyota teve um *recall* de 550.000 automóveis devido a falhas na direção hidráulica. No mesmo ano, a Honda anunciou um *recall* de 300 mil veículos devido a problemas com o *airbag*. De forma semelhante, a Intel gastou cerca de USD 700 milhões para reparar um problema ocorrido em seu hardware, após o mesmo ser lançado no mercado (KAPUR; PECHT, 2014).

Percebe-se que quanto mais tarde os problemas em produtos forem detectados, maior serão o custo e o impacto das alterações necessárias a fim de solucionar o problema. Logo, é evidente que a determinação e o endereçamento das especificações do produto relacionam-se diretamente com seu custo e a satisfação dos clientes. Entretanto, para gerar uma correta especificação, torna-se necessária uma eficiente gestão de requisitos. Neste contexto, a *General Electric Transportation Systems* (GETS) reduziu 70% dos custos com verificações de software, em dez anos de uso da linguagem *SysML* (FERRARI et al., 2013).

Ao observar de forma generalizada o ciclo de vida dos produtos, sobretudo os produtos complexos (i.e. produtos que englobam uma grande quantidade de sistemas), percebe-se que a grande maioria das falhas decorrentes de lacunas no PDP está associada a interfaces entre componentes ou subconjuntos com especificações insuficientes, difíceis de serem interpretadas ou não alinhadas às

necessidades do cliente. Além disso, a competitividade e a constante busca por reduções de custo e tempo no lançamento de produtos demandam aumento na eficiência do PDP (e.g. eliminação de retrabalhos; redução do tempo de desenvolvimento; identificação de possíveis falhas nas etapas iniciais; avaliações eficientes de conceitos; reutilização do conhecimento gerado; integração e comunicação entre os envolvidos).

A linguagem SysM tem sido indicada para auxiliar a especificação e validação dos requisitos (BRACE; EKMAN, 2012; ROTA SENA MARQUES; SIEGERT; BRISOLARA, 2014; CHAMI; BRUEL, 2015). Porém, na maioria dos casos, requisitos já conhecidos são inseridos em modelos de sistema. Logo, é observada uma oportunidade para investigar como as informações devem ser endereçadas ao modelo de um sistema, de forma a viabilizar a implantação da abordagem MbSE, principalmente em empresas que utilizam abordagens tradicionais de representação de produto.

O PDP não necessita apenas da integração de pessoas e armazenamento de documentos em uma mesma base de dados, mas, sim, de uma visão sócio-técnica (i.e. softwares; métodos; pessoas) (MORGAN; LIKER, 2006). A complexidade do ciclo de vida do produto requer uniformidade nas interpretações dos problemas, requisitos e todas as informações pertinentes ao projeto, por todos os *stakeholders* (i.e. envolvidos durante o PDP). Tal problemática demanda a aplicação de abordagens como a SLIM (*System Lifecycle Management*) proposta por Bajaj et al. (2011). A SLIM consiste em uma plataforma integrada de softwares que visa combinar pontos fortes do MbSE e do PLM na gestão de sistemas complexos.

O comportamento dinâmico e interativo dos requisitos envolvidos no desenvolvimento de produto e a necessidade de seu entendimento claro a todas as disciplinas e ferramentas envolvidas, incluindo *softwares*, demandam uma abordagem como o MbSE. Alguns estudos têm sido publicados, propondo a utilização de linguagens como a SysML no auxílio à gestão de requisitos e integração de ferramentas no PDP (e.g. FAN et al., 2015; QAMAR; WIKANDER; DURING, 2014; CRANE; BROWNLOW, 2015; DEMOLY et al., 2010). Entretanto, necessita-se entender como as informações de um produto devem ser inseridas em um modelo de sistema, principalmente nas etapas iniciais do PDP, permitindo o uso e rastreabilidade

das informações pelos *stakeholders*. Neste sentido, este trabalho propõe-se a responder as seguintes questões:

Q1. como padronizar os requisitos no início do PDP, permitindo incorporá-los ao modelo do produto?

Q2. de que forma o modelo pode ser aplicado a diferentes níveis de abstração ao longo do PDP, facilitando o entendimento dos requisitos, pelos *stakeholders*?

Q3. como o modelo facilitaria o reuso do conhecimento gerado ao longo do PDP?

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo deste trabalho consiste em desenvolver um modelo de sistema que represente um produto, o qual possa ser interpretado computacionalmente, direcionando e apoiando o PDP. O modelo deve possibilitar uma única interpretação sobre os requisitos do produto, de forma que as informações possam ser utilizadas como entrada para a execução do desenvolvimento. Este trabalho não trata da integração e automatização de sistemas utilizados no PDP, uma vez que já existem soluções comerciais que atendem a tal necessidade.

1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

A fim de alcançar o objetivo geral proposto, o trabalho deve satisfazer os seguintes objetivos específicos:

O1. Identificar uma oportunidade de aplicação da abordagem MbSE em um caso real na indústria;

O2. Delimitar um cenário de estudo aplicado a produto real;

O3. Modelar um sistema que represente o produto, atendendo aos seguintes aspectos:

O3.1 Possibilitar a especificação do produto através do modelo do sistema;

O3.2 Permitir acesso e interpretação únicas às informações do modelo, em diferentes etapas do PDP;

O3.3 possibilitar a rastreabilidade das informações do produto através do modelo;

O3.4 permitir a atualização do modelo, acompanhando o dinamismo dos requisitos ao longo do PDP;

O3.5 armazenar e disponibilizar o conhecimento adquirido no PDP, permitindo o reuso das informações.

O4. demonstrar o modelo;

O5. avaliar o modelo proposto.

1.5 JUSTIFICATIVA

Por meio do modelo, pretende-se facilitar a tomada de decisões nas etapas iniciais do PDP, bem como auxiliar o planejamento e execução das atividades do PDP. Com a conexão entre as necessidades do cliente e toda a derivação de requisitos durante o PDP, possibilita-se uma interpretação mais clara sobre a relevância de determinado requisito.

Uma única fonte de informação permite a redução do esforço com a busca de informações desestruturadas (e.g. e-mails, planilhas, apresentações), necessárias à execução de atividades no PDP, agregando valor às atividades de desenvolvimento. Neste sentido, com uma única interpretação sobre os requisitos a serem satisfeitos, evita-se retrabalhos ocasionados devido a requisitos mal interpretados ou mal informados.

A utilização do modelo com tecnologias de apoio ao PDP (e.g. CAD, DMU, PLM, KBE, softwares RM) permite o acesso às informações em diferentes níveis de abstração, dirigidas a diferentes áreas de conhecimento. Este cenário contribui com abordagens como EM e PLM e a Gestão de Projetos.

Terminado o desenvolvimento de um produto, o conhecimento gerado estará armazenado no modelo. Isto possibilita a incorporação deste conhecimento em modelos de futuros projetos, contribuindo com a gestão do conhecimento e facilitando previsões e estimativas iniciais que auxiliarão a tomada de decisões.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este documento está dividido em cinco capítulos. Inicialmente, no Capítulo 1, aborda-se o tema MbSE e a identificação de oportunidades no contexto do PDP. Em seguida, o Capítulo 2 contém a fundamentação teórica necessária ao entendimento do trabalho proposto. Já o Capítulo 3 apresenta uma descrição do procedimento metodológico utilizado, com todas as suas etapas. O Capítulo 4 contém os resultados e discussões resultantes da execução do projeto de pesquisa. Por sua vez, o Capítulo 5 apresenta as conclusões da pesquisa.

2 O AMBIENTE DO PDP

Neste capítulo são apresentados conceitos e definições sobre o ambiente do PDP, os quais servirão de fundamentação teórica para a pesquisa. Inicialmente, apresentam-se as principais características do PDP e de seu fluxo de informações, bem como estratégias e abordagens de suporte. Em seguida, apresenta-se a abordagem MbSE no contexto do PDP e os principais padrões e linguagens de suporte. A última seção trata do tema gestão de requisitos no PDP.

2.1 CARACTERÍSTICAS DO PDP DE PRODUTOS COMPLEXOS

O objetivo do PDP é entregar uma solução para uma demanda do mercado. Neste sentido, todo o processo deve estar ligado às necessidades dos clientes. Na Figura 2, observa-se um resumo das atividades presentes no PDP, na visão de Pahl et al. (2013). O processo inicia pela elaboração de uma lista de requisitos, gerando a especificação do produto. Através das ações ligadas aos blocos laterais da figura através de setas, percebe-se que, conforme o processo avança da especificação para a solução final, ocorre uma constante interação entre as atividades, as quais geram adaptações na lista de requisitos do produto.

A estrutura funcional do produto e suas alternativas conceituais são geradas para atender aos requisitos especificados. No momento em que tais atividades são realizadas, novas restrições são identificadas. Este processo gera atualizações na lista de requisitos. O mesmo ocorre no leiaute preliminar e definitivo. Mesmo na etapa de documentação do produto, podem ser identificadas restrições que afetem o leiaute do produto.

As atividades de um PDP são executadas com o auxílio de artefatos técnicos (e.g. instalações de máquinas, conjuntos e componentes). Tais artefatos podem ser tratados como sistemas técnicos, conectados a um ambiente através de entradas e saídas (HUBKA; EDER, 2012). De acordo com Pahl et al. (2013), um sistema pode ser desdobrado em subsistemas, sendo que cada um deles é delimitado por fronteiras.

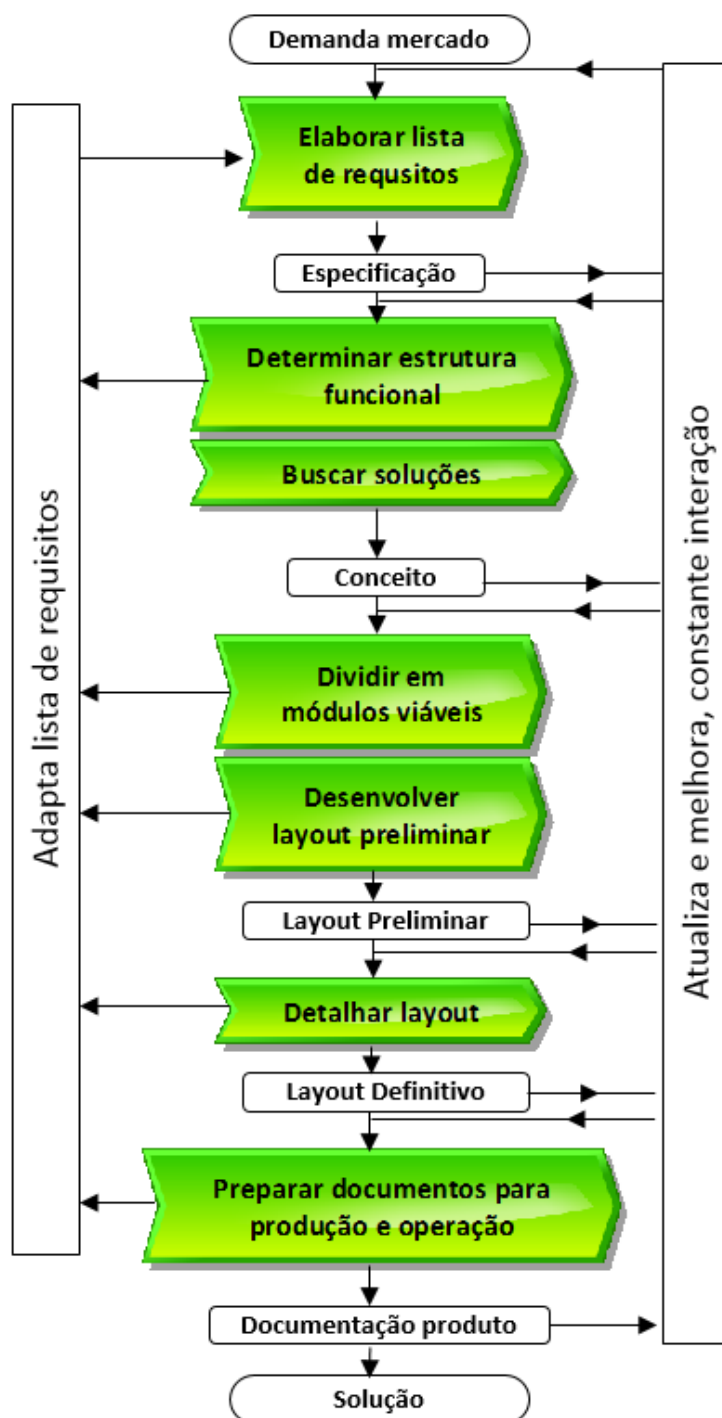


Figura 2 – Processo de Desenvolvimento de Produtos
 Fonte: Adaptado de Pahl et al. (2013)

Entretanto, a divisão dos subsistemas depende de seu propósito. Geralmente, os sistemas são divididos segundo os seguintes critérios:

- a) função: utilizado para descrever relações funcionais entre os integrantes do sistema;

- b) montagem: critério utilizado para planejar operações de montagem;
- c) produção: utilizado para planejar e executar a produção.

A Figura 3 apresenta um exemplo de um sistema mecânico (S). Tal sistema é dividido em dois subsistemas: o acoplamento flexível (S_1) e a embreagem (S_2). As letras a, b, c, d, e, f, g, h representam os componentes de tais subsistemas. Já as letras i, k e l representam os componentes que permitem a conexão entre os subsistemas. I e O representam, respectivamente, as entradas e saídas (PAHL et al., 2013).

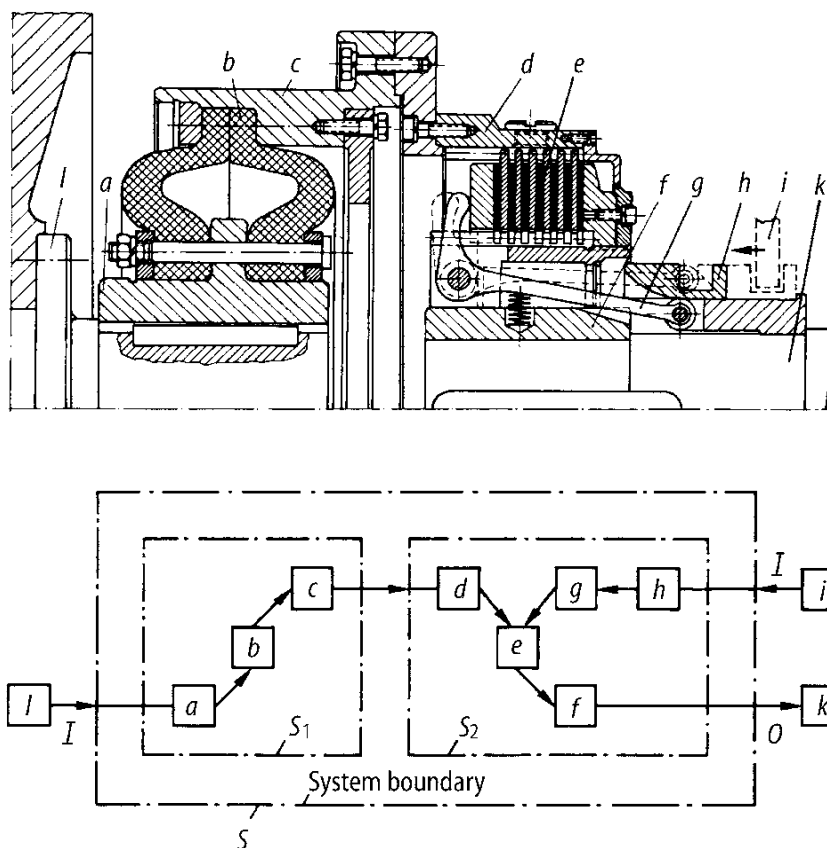


Figura 3 – Sistema técnico
Fonte: Pahl et al. (2013)

Sistemas clássicos como o sistema mecânico apresentado na Figura 3 na maioria das vezes não consideram as pessoas como componentes (RAMOS; FERREIRA; BARCELÓ, 2012). Sistemas complexos (e.g. indústria aeroespacial, automobilística), porém, possuem uma grande integração humana e necessitam de interoperabilidade e tecnologia intensiva. Hybertson e Sheard (2008) definem tais sistemas como supersistemas. Neste contexto, a INCOSE (*International Council on Systems Engineering*) define sistema como um conjunto de elementos, subsistemas

ou montagens, os quais cumprem com objetivos definidos. De forma semelhante, as normas relacionadas a sistemas (e.g. ISO/IEC/IEEE15288) definem sistemas como uma combinação de elementos que interagem entre si para alcançar um os mais propósitos. Tais elementos incluem produtos (e.g. *hardware*; *software*; *firmware*), processos, pessoas, informações, técnicas, instalações, serviços e demais elementos que auxiliem a atingir um objetivo (WILEY, 2015). Concordando com Wiley (2015), ao longo deste trabalho, o termo sistema representará todo propósito que consiste na interação entre partes. Neste sentido, o termo sistema complexo representará todo sistema que envolve múltiplas áreas de conhecimento e linguagens.

A abordagem que trata dos sistemas complexos da engenharia denomina-se Engenharia de Sistemas (SE - do inglês *System Engineering*). A aplicação da SE no PDP tem o objetivo de satisfazer as necessidades dos clientes, obedecendo a seus requisitos e desenvolvendo produtos que integram pessoas, *hardware*, *software*, bem como as estratégias da companhia (SADRAEY, 2012). A estratégia da SE é gerenciar e executar processos, mitigando riscos de um projeto (FRIEDENTHAL; MOORE; STEINER, 2014). A Figura 4 apresenta – de forma simplificada – os processos envolvidos em tal abordagem. O processo *Projeto e Especificação do Sistema* especifica o sistema e os requisitos dos componentes. Os componentes serão, então, projetados, implementados e testados de forma a atender aos requisitos. Na *Integração e Teste do Sistema*, por sua vez, são realizadas atividades para integrar os componentes do sistema; isso ocorre ao se verificar se os requisitos foram atendidos. Além disso, o desenvolvimento do sistema possibilita a interatividade entre os processos, permitindo ações de *feedback* entre eles.

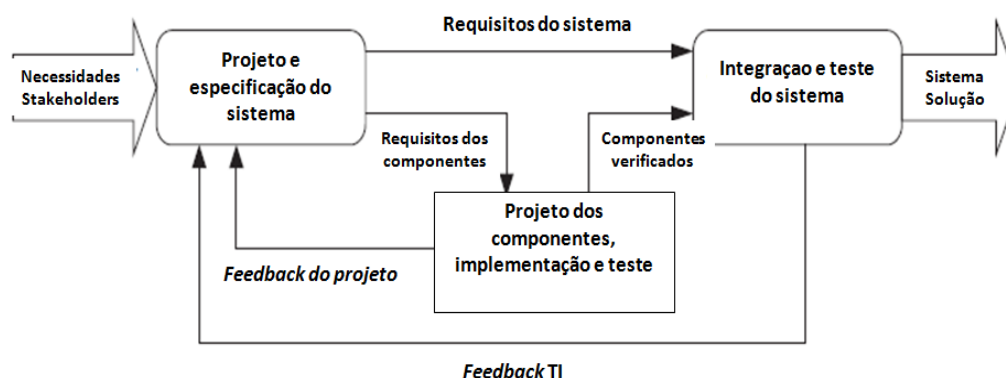


Figura 4 – Engenharia de Sistema

Fonte: Adaptado de Friedenthal e Moore e Steiner (2014)

Além de satisfazer requisitos e objetivos estratégicos, a competitividade gera a necessidade constante de reduzir o tempo para o lançamento de novos produtos. A Engenharia Simultânea, ou *Concurrent Engineering* (CE), é uma abordagem sistemática que visa a esse propósito (CLARK; FUJIMOTO, 1991; SMITH; REINERTSEN, 1998). Shina (2012) define CE como a integração entre o conhecimento, experiências, desenvolvimento, marketing, manufatura e vendas, com foco na geração de produtos de qualidade e baixo custo. A redução do tempo de desenvolvimento pode ocorrer através da simultaneidade de atividades no PDP, conforme ilustrado na Figura 5. A segunda tarefa pode ser iniciada antes da finalização da primeira, reduzindo, conseqüentemente, o tempo para lançamento do produto (QIAN; GOH; LIN, 2015). De forma mais abrangente, Syan e Menon (2012) consideram como os principais objetivos da CE os seguintes itens:

- a) reduzir o tempo do PDP;
- b) aumentar a rentabilidade;
- c) aumentar a competitividade;
- d) aumentar o controle sobre os custos do projeto e manufatura;
- e) integrar departamentos;
- f) aprimorar a reputação da empresa;
- g) melhorar a qualidade do produto;
- h) promover o espírito de equipe.

Na condução de um PDP utilizando a abordagem CE, algumas tarefas tendem a ser realizadas com informações preliminares, ocasionando retrabalhos (e.g. fabricação de ferramental de peças antes da definição completa do produto) (LIN, J.; QIAN; CUI, 2012; SYAN; MENON, 2012; QIAN; GOH; LIN, 2015). Tal fato pode ser observado na Figura 5, em que a Tarefa 2 (usando a abordagem CE) utiliza informações com um baixo nível de conhecimento – ou maturidade.

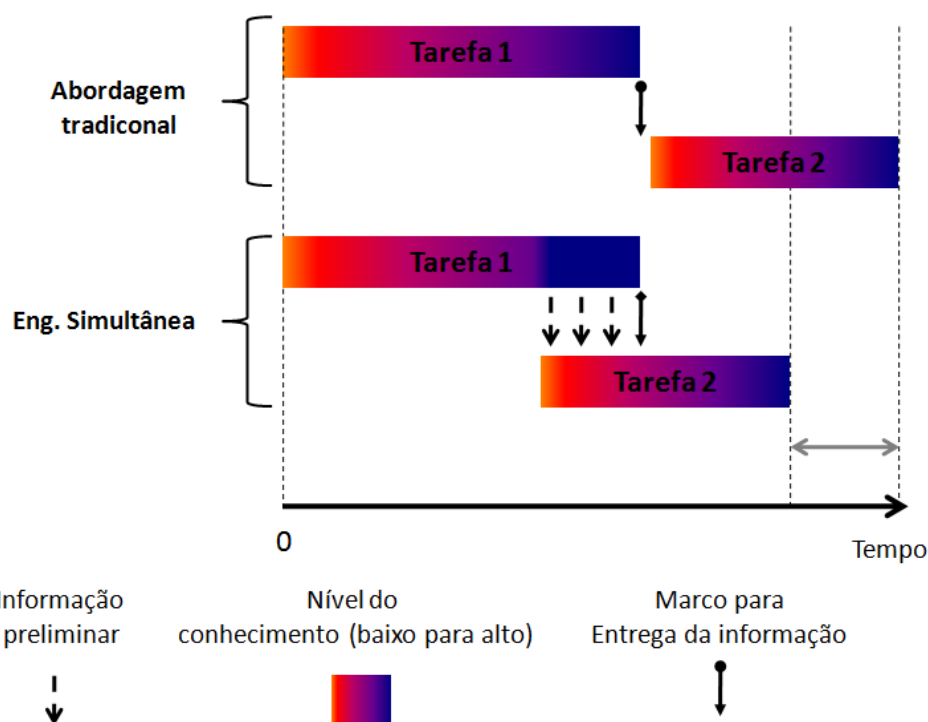


Figura 5 – Engenharia Simultânea versus Abordagem Tradicional
 Fonte: Adaptado de Clark e Fujimoto (1991) e Lin e Qian e Cui (2012)

A CE pode ser praticada sem auxílio computacional ou através de técnicas formais. Entretanto, considerando sistemas complexos e o emprego da SE, ferramentas computacionais são fundamentais para o sucesso da abordagem. Neste sentido, segundo Syan e Menon (2012), para usufruir dos benefícios da abordagem, torna-se necessário um amplo suporte dos seguintes elementos:

- a) iniciativa de processos: refere-se à formação e a gestão dos times, além da estrutura organizacional e cultural da empresa;
- b) ferramentas computacionais: tal suporte envolve ferramentas de auxílio ao projeto, pesquisa de mercado, planejamento e controle da manufatura. Além disso, este elemento refere-se, também, à necessidade de uma plataforma para permitir a comunicação e a integração entre as diversas ferramentas.
- c) definição do método adequado à empresa para implantação da abordagem;
- d) padrões para intercâmbio de dados.

Como suporte à abordagem CE, a estratégia *Product Lifecycle Management* (PLM) tem o objetivo de possibilitar a integração entre os elementos do ciclo de vida do produto (RACHURI et al., 2008). Essa estratégia pode ser estruturada em duas

partes: engenharia e suporte (HINCAPIÉ et al., 2014). Na Figura 6, observa-se que o grupo da engenharia é constituído por: desenvolvimento do produto; desenvolvimento do processo e instalações. A parte de suporte é constituída por: produção e vendas; uso, manutenção e serviço e descarte.

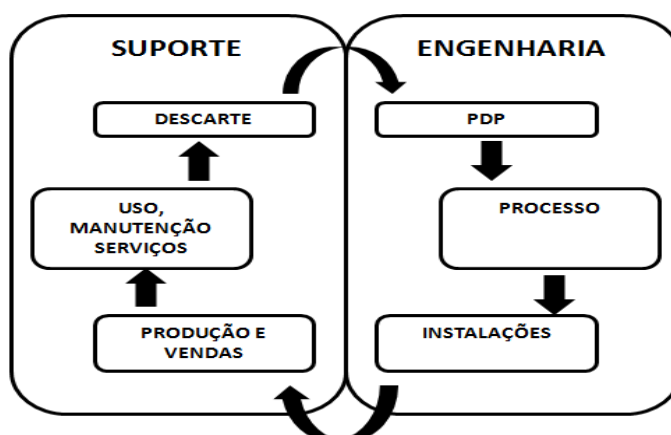


Figura 6 - Estrutura do PLM
 Fonte: Adaptado de Hincapié et al. (2014)

Segundo Stark (2011), o PLM não auxilia apenas a gestão de um produto, mas todas as partes de produtos de uma empresa. Além disso, o PLM permite a integração entre várias aplicações e sistemas baseados em computador, empregados ao longo do ciclo de vida, por meio de uma única plataforma (MING et al., 2005). As ferramentas-chave geralmente empregadas durante o PDP são (PRASAD, 2000; FIELDING et al., 2014):

- a) *Computer-aided Design (CAD)*: permite a modelagem geométrica e visual do produto (e.g. CREO da fabricante PTC, CATIA da Dassault; UX da Siemens);
- b) *Electronic Computer-aided Design*: semelhante ao CAD, porém destinado à modelagem de circuitos eletrônicos;
- c) *Computer-aided Engineering (CAE)*: é utilizado em simulações e cálculos matemáticos graves do modelo CAD (e.g. Abaqus, Ansys);
- d) *Computer-aided Manufacturing (CAM)*: possibilita a simulação de processo de fabricação (e.g. EdgeCAM).

Entretanto, a interoperabilidade entre as ferramentas que suportam o PLM é o principal desafio em sua adoção (RACHURI et al., 2008). Neste sentido, torna-se relevante a utilização de padrões na comunicação entre produtores e usuários de informações, sejam eles máquinas ou pessoas.

2.2 FLUXO DE INFORMAÇÕES NO PDP

O fluxo de informações do PDP envolve diferentes áreas de conhecimento, funções, tempo e espaço. O intercâmbio das informações entre os *stakeholders* (i.e. partes interessadas) é dinâmico. Ou seja, as informações podem sofrer modificações ao longo das fases do desenvolvimento e apresentam um formato linguístico (RACHURI et al., 2008). A Figura 7 ilustra, de forma resumida, o conteúdo das informações aderentes ao produto durante seu ciclo de vida. Percebe-se que a lista de materiais, ou *Bill Of Materials* (BOM) de um produto relaciona-se diretamente com todas as informações geradas no processo, as quais são utilizadas pelos *stakeholders*. De acordo com Henderson (1998), as três principais categorias de informações no PDP são:

- a) Informações de forma: representam quais fatores do produto realmente implicam sua geometria e composição do material;
- b) Informações de função: dizem respeito aos requisitos para a função ser executada e o comportamento resultante;
- c) Informações de ciclo de vida: representam como o produto é fabricado, manipulado, testado e descartado.

As informações devem ser transformadas em conhecimentos, os quais são necessários para a execução das atividades (CHANDRASEGARAN et al., 2013). Owen e Horváth (2002) definem conhecimento como a experiência com a informação, adquirida através de experimentação e aprendizado. Logo, o conhecimento é obtido por meio da interpretação de informações, deduzidas segundo a análise de dados coletados, os quais são disponibilizados na forma de observações ou resultados computacionais. A interpretação, abstração e associação dos dados permitem a geração de informações (CHANDRASEGARAN et al., 2013). Quando tais informações levam ao aprendizado, o conhecimento é originado, permitindo que determinada atividade seja executada.

As informações geradas no PDP (Figura 7) podem gerar conhecimentos representados através de vários formatos. Segundo Owen e Horváth (2002), tais formatos podem ser pictórico, linguístico, virtual ou algorítmico. O Quadro 2 apresenta exemplos de cada um destes formatos.

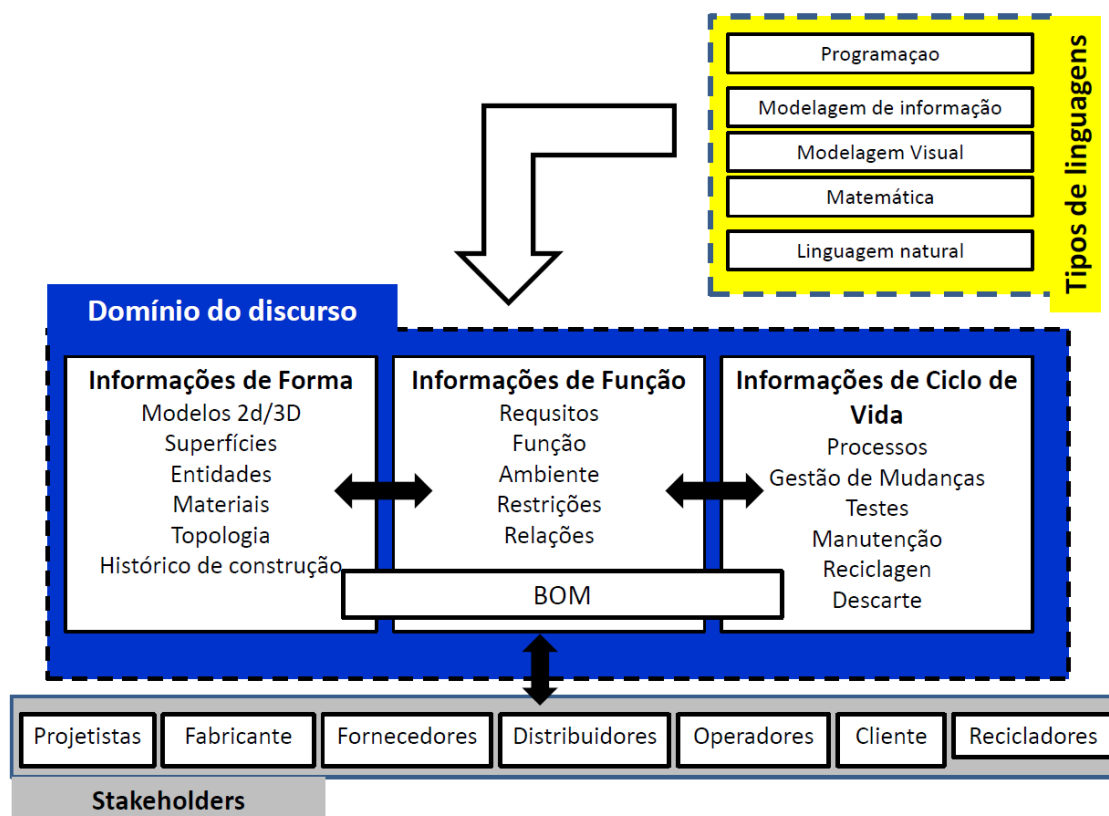


Figura 7 – Fluxo de Informações PDP
 Fonte: Adaptado de Henderson (1998)

Pictórico	Simbólico	Linguístico	Virtual	Algorítmico
-Desenhos	-Regras	-Lista de requisitos	-Modelos CAD	-Equações
-Planilhas	-Fluxogramas	-Analogias	-Simulações CAE	Matemáticas
-	-Diagramas	-Opiniões	-Realidade virtual	-Algoritmos
Fotografias	Ontologias	-Comunicação verbal	-Protótipo virtual	-Procedimentos operacionais
			-Animações	

Quadro 2 – Tipos de conhecimentos
 Fonte: Adaptado de Owen e Horváth (2002)

Entretanto, as diferentes representações de conhecimento aparecem de formas diferentes nas fases do projeto. A Figura 8 apresenta os conhecimentos listados no Quadro 2 dentro das fases do PDP propostas por Pahl et al. (2013). No início do PDP, etapa na qual se tem informações preliminares, o conhecimento assume a forma de anotações, imagens e tabelas (i.e. linguístico e pictórico). Neste sentido, nas etapas subsequentes do PDP (e.g. refinamento do conceito e Projeto detalhado) tem-se representações pictóricas (e.g. esboços), algorítmicas (e.g. equações) e virtuais (e.g. modelos geométricos), além de diagramas e ontologias

(simbólico). Logo, para que o conhecimento seja transmitido ao longo do PDP, tornam-se necessários padrões que tornem as informações compressíveis a todos os envolvidos.

Para possibilitar o uso e comunicação do conhecimento ao longo do PDP, existe um grande número de padrões técnicos, propostos pelas organizações – *International Organization for Standardization (ISO)*, *International Electrotechnical Commission (IEC)* e *Institute of Electrical and Electronics Engineer (IEEE)* (SCHNEIDER; BERENBACH, 2013). Cada padrão define uma linguagem de representação, com um respectivo papel no contexto da SE. A Figura 9 apresenta alguns destes padrões e suas aplicações.

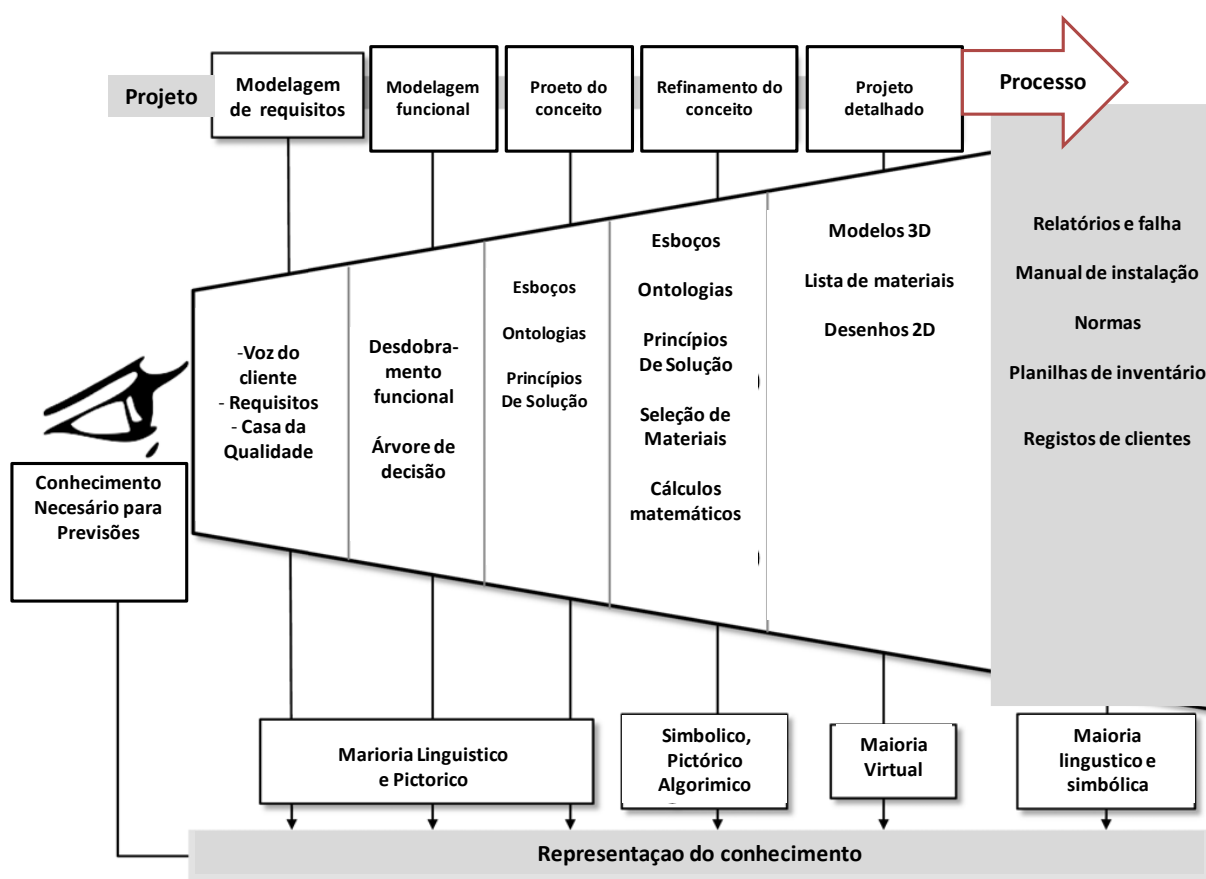


Figura 8 – Conhecimentos gerados ao longo do PDP
Fonte: Adaptado de Chandrasegaran et al. (2013)

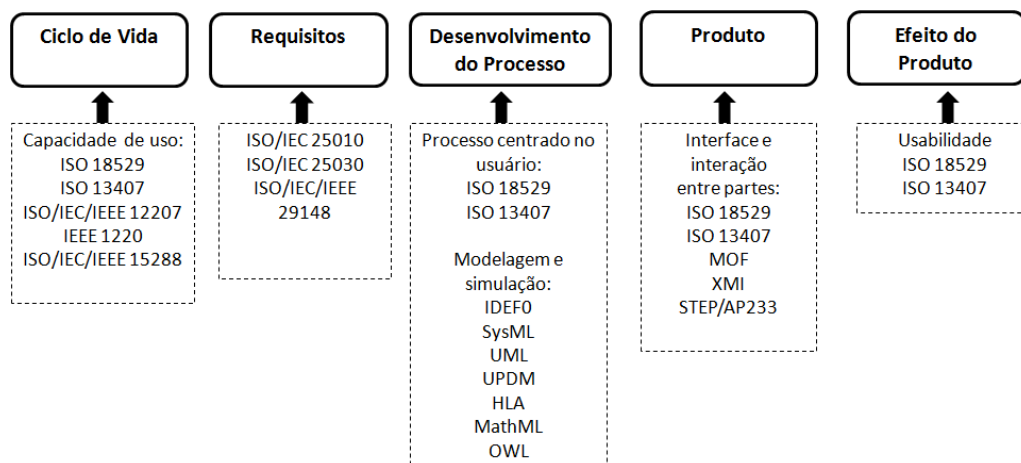


Figura 9 – Padrões ISO para intercâmbio de informações

Fonte: Adaptado de Abran et al. (2003) e Schneider e Berenbach (2013) e Friedenthal e Moore e Steiner (2014)

O *Standard for Exchange of Product Model Data* (STEP) é um dos principais padrões utilizados para o intercâmbio de informações no PDP. O STEP consiste em uma família de padrões, os quais têm o objetivo de padronizar a descrição da informação durante o ciclo de vida, permitindo o intercâmbio entre modelos de produto.

Este padrão é neutro a outros sistemas, possibilitando a troca de informações e compartilhamento, independentemente do tipo de sistema utilizado (ZHOU; CAO; JIANG, 2013). O STEP está diretamente ligado à tecnologia CAD, na definição de modelos 3D (STEP AP233), e em sistemas PLM (STEP AP239). A Figura 10 apresenta dois dos principais padrões STEP e suas aplicações.

O padrão STEP mais recente, aprovado pela ISO, em 2014, é o AP242. Ele é compatível com representações PMI (*Product Manufacturing Information*) (i.e. informações de manufatura, montagem, restrições geométricas, acabamentos superficiais e operações de máquinas). A Figura 11 mostra um exemplo da sintaxe utilizada por esse padrão, representando uma tolerância de planicidade em uma superfície. Cada entidade do modelo é representada por um número (i.e. #10, #11, #12). Tais números são utilizados para referenciar as entidades. Na Figura 11, a tolerância (*flatness tolerance*) está relacionada a uma dimensão (*length measure with unit*) e uma superfície (*shape aspect*). O *National Institute of Standards and Technology* (NIST) disponibiliza, na internet, uma ferramenta chamada SFA (*Step File*

Analyzer), a qual possibilita exportar as informações de arquivos no padrão STEP, organizadas em formato xls (Figura 102 dos Anexos).

Embora sejam evidentes os benefícios do padrão STEP, a parametrização dos modelos gerados no CAD é essencial para possibilitar o intercâmbio de informações nesse padrão. Entretanto, esta tarefa é ainda um grande desafio, devido a lacunas no método utilizado na geração dos modelos, bem como na interoperabilidade entre algumas ferramentas (e.g. entre CAD e CAE). Estudos recentes focam abordagens e métodos para a parametrização de modelos 3D, em concordância com os padrões STEP (BONDAR et al., 2015; LOUHICHI; ABENHAIM; TAHAN, 2015; MAHMOUD; DHOKIA; NASSEHI, 2016; TOULORGE; LAMBRECHTS; REMACLE, 2016).

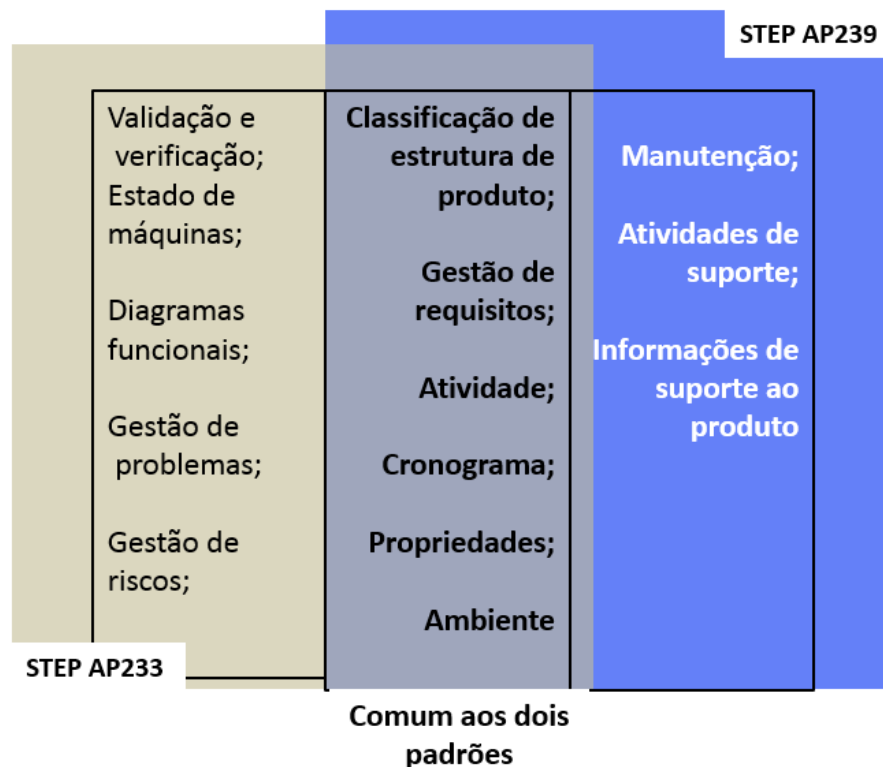


Figura 10 – STEP AP233 versus STEP AP239
Fonte: Adaptado de Ivezic e Kulvatunyou e Srinivasan (2014)

```
#10=FLATNESS_TOLERANCE('GT1', $, #11, #12);
#11=LENGTH_MEASURE_WITH_UNIT(LENGTH_MEASURE(0.15), #24);
#12=SHAPE_ASPECT('Flatness.1', $, #56, .T.);
```

Figura 11 – Sintaxe padrão STEPAP242
Fonte: Lipman e Lubell (2015)

2.3 MODEL-BASED SYSTEM ENGINEERING

Através dos padrões citados na seção anterior e linguagens específicas de modelagem, a abordagem MbSE permite desenvolver modelos de sistemas e processos, possibilitando a descrição e aplicação de relações entre componentes de um sistema (TÖRNGREN et al., 2014). Ramos e Ferreira e Barceló (2012) definem MbSE como uma aplicação formal de princípios de modelagem, métodos, linguagens e ferramentas aplicadas ao ciclo de vida de sistemas complexos e interdisciplinares.

No contexto do PDP, o MbSE permite uma coerência semântica entre os vários domínios presentes no processo, através de linguagens formais, legíveis por máquinas, que possibilitem a interoperabilidade entre diferentes ferramentas aplicadas durante o PDP (e.g. CAD, CAE, ECAD, simulações discretas) conforme representado na Figura 12 (WU, D. et al., 2011; IVEZIC; KULVATUNYOU; SRINIVASAN, 2014).

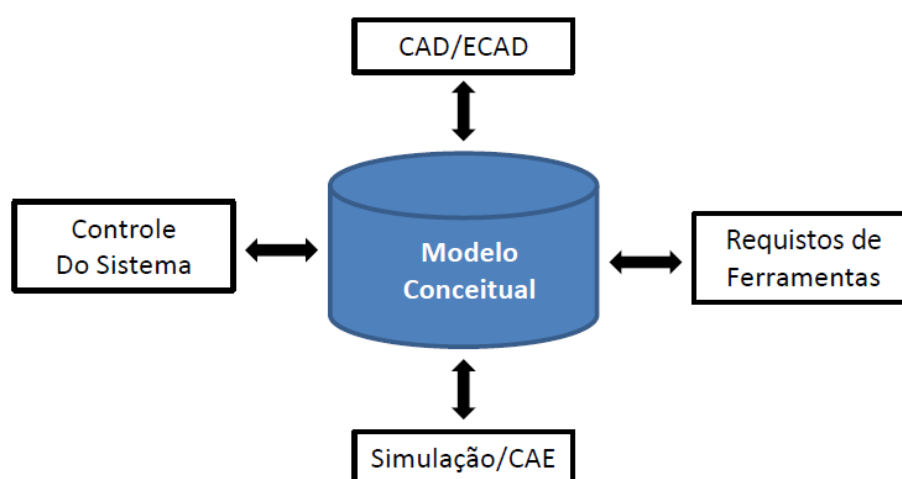


Figura 12 – Comunicação entre o modelo do sistema e ferramentas do PDP
 Fonte: Adaptado de Barbieri e Fantuzzi e Borsari (2014)

Projetos que utilizam abordagens tradicionais (i.e. baseadas em documentos) de sistemas geram documentos que serão compartilhados entre os *stakeholders*. Neste ambiente, a rastreabilidade das informações, sobretudo dos requisitos, torna-se mais difícil. Já, o MbSE permite o controle, a comunicação, a validação e rastreabilidade das informações. Neste sentido, Friedenthal e Moore e Steiner (2014) apresentam os principais benefícios da abordagem MbSE:

- a) comunicação: compartilhar o entendimento do sistema através de todos os *stakeholders* de um projeto;
- b) redução de riscos: a validação de requisitos e verificação do projeto de forma antecipada otimiza a estimativa de custos e evita problemas futuros no produto;
- c) qualidade: a rastreabilidade de requisitos entre as etapas do PDP facilita o alcance dos objetivos;
- d) produtividade: reuso de modelos existentes em futuros projetos; velocidade na análise do impacto de requisitos e alterações no projeto;
- e) Transferência de conhecimento: informações podem ser consultadas no modelo, utilizando padrões específicos.

O Departamento de Defesa Americano tem realizado iniciativas ambiciosas na aplicação da MbSE. Tais iniciativas deram origem aos conceitos DTw (*Digital Twin*) e DTh (*Digital Thread*) como estratégias de suporte ao MbSE (REID; RHODES, 2016). O DTh é um *framework* de comunicação que possibilita a conexão digital entre as informações geradas ao longo do ciclo de vida de um processo. Seu objetivo é traduzir informações, provenientes de diversos sistemas e ferramentas, e disponibilizá-las no momento e destino adequados (KRAFT, 2015). Já o Dtw é um modelo integrado de sistemas que inclui especificações de projeto e modelos de engenharia, descrevendo informações físicas, estruturais, geométricas e de ambiente. O propósito do Dtw é gerenciar produtos e facilitar a investigação de impactos de alterações de projeto – ou operacionais – no sistema como um todo (GLAESSGEN; STARGEL, 2012; REID; RHODES, 2016). Tuegel et al. (2011) aplicaram o Dtw para disponibilizar informações a engenheiros sobre o sistema de um avião, com o objetivo de facilitar previsões sobre sua estrutura e otimizar trabalhos de manutenção.

2.4 LINGUAGENS DE SUPORTE AO MBSE

Para aplicação da abordagem MbSE e de conceitos como o Dtw e Dth, é fundamental a utilização de linguagens padronizadas entre as áreas de conhecimento envolvidas no processo. No contexto do PDP, as principais linguagens definidas pelo *Object Management Group* (OMG) são a *Unified Modeling Language* (UML), *System Modeling Language* (SysML), *Web Ontology Language* (OWL) e a *Extensible Markup Language* (XML). Além disso, um padrão importante, relacionado à gestão dos requisitos no PDP, é o *Requirement Interchange Format* (ReqIF).

2.4.1 UML

A UML é uma linguagem gráfica utilizada para visualizar, especificar, construir e documentar artefatos de sistemas (OMG, 2007). A especificação UML baseia-se na abordagem de metamodelagem. O objetivo do metamodelo é definir a semântica para a construção de modelos de sistemas, englobando conceitos como processos de negócios e funções do sistema, além de representar classes escritas de linguagens de programação, banco de dados e componentes de software reutilizáveis (BOOCH; RUMBAUGH; JACOBSON, 2006). Neste sentido, segundo a OMG (2007), um modelo é uma instância de um metamodelo. A UML é representada através de diagramas, dispostos em classes (FOWLER, 2004; BORONAT; MESEGUER, 2008). A Figura 13 apresenta um exemplo de um modelo UML. O `veículo` é um cidadão de primeira classe no modelo. O `carro de passeio` e o `utilitário` classificam o `veículo` através de relações de generalização, representadas pelos triângulos abaixo do `veículo`. O `Motor` é um componente do `carro de passeio`, sendo que tal relação é representada pelo losango cheio. A classe `motorista` é relacionada com `veículo` através de uma associação, representada pela linha. O número 1 indica que há um `motorista` por `veículo` e um `motor` por `carro de passeio`.

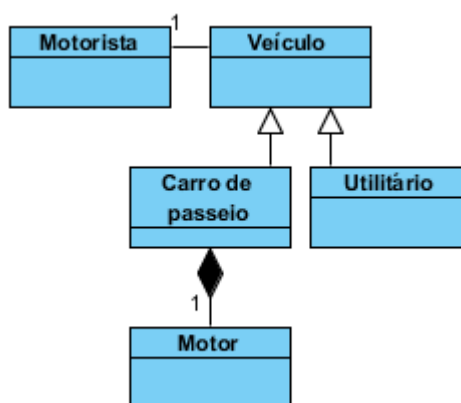


Figura 13 – Representação de um metamodelo UML
 Fonte: Adaptado de Fowler (2004)

O Quadro 3 apresenta os principais diagramas suportados pela linguagem UML e suas respectivas aplicações. O diagrama de atividade representa o fluxo de controle entre os componentes de um sistema. O conjunto de classes, interfaces, colaborações e relacionamentos presente no sistema é representado pelo diagrama de classe. As interações entre objetos são representadas através do diagrama de

comunicação e de sequência. Este último foca a sequência das interações. O diagrama de componente representa vários componentes de um sistema e suas dependências. O diagrama de estrutura, por sua vez, representa a decomposição de classes – com componentes aninhados e conectores. Diagramas de implantação representam o relacionamento físico entre componentes de hardware do sistema. A organização dos elementos do modelo, mostrando sua relação hierárquica, é representada por meio do diagrama de pacotes. O diagrama de máquina de estados especifica como os objetos do sistema são afetados por eventos. Já o diagrama de casos de uso é importante para a modelagem de comportamentos do sistema. Tal diagrama apresenta um conjunto de casos de uso, atores e relacionamentos.

Diagrama	Objetivo
Atividade	Ambiente processual
Classe	Classes, relações, características
Comunicação	Interação entre objetos
Componente	Estrutura e conexões dos componentes
Estrutura	Decomposição de uma classe
Implantação	Desdobramento de artefatos em nós
Pacotes	Estrutura hierárquica
Sequência	Interação entre objetivos com ênfase na sequência
Máquina de estados	Como os eventos e alteração de objeto
Casos de uso	Interação do usuário com o sistema

Quadro 3 – Diagramas UML
Fonte: Adaptado de Fowler (2004)

2.4.2 SYSML

A linguagem SysML tem sido amplamente utilizada em diferentes segmentos industriais, a fim de modelar requisitos, descrevendo a conectividade de sistemas físicos, e, até mesmo, a estrutura de uma organização (DURUGBO, 2013; GERBER; THEORIN; JOHNSON, 2013). Na Figura 14, observa-se a interconexão entre a estrutura do modelo, seu ambiente, informações paramétricas (parâmetros) e requisitos. O modelo possibilita a visão do sistema sobre várias perspectivas, mantendo uma coerência entre elas.

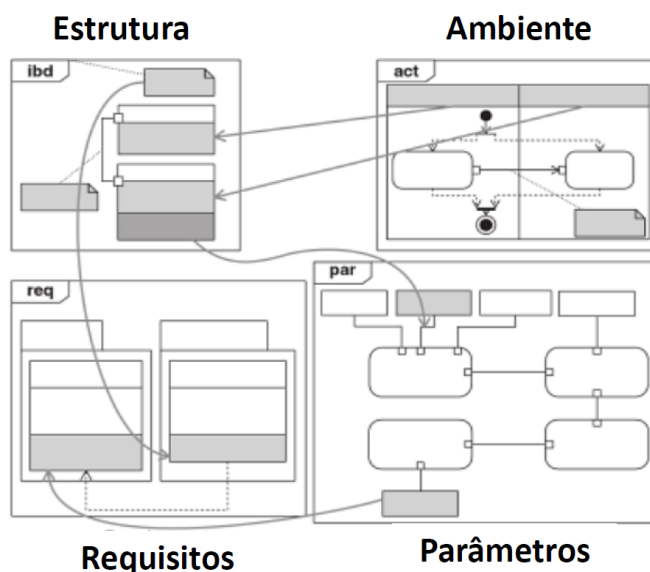


Figura 14 – Estrutura SysML
Fonte: Adaptado de Lin et al. (2015)

A SysML é uma linguagem gráfica que utiliza vários componentes da UML, porém é composta, ainda, por diagramas de requisitos e parâmetros, auxiliando o levantamento, análise, validação e documentação de requisitos de sistemas complexos (DURUGBO, 2013). A SysML pode representar sistemas, componentes e algumas outras entidades, conforme a lista a seguir:

- composição estrutural, interconexões e classificação;
- funções, mensagens e estados;
- restrições físicas e propriedades de desempenho;
- relação entre ambiente, estrutura e restrições;
- requisitos e sua relação com outros requisitos, elementos e casos de uso.

Diagramas paramétricos presentes na linguagem SysML possibilitam realizar análises quantitativas de sistemas (LIN et al., 2009). Um modelo de sistema representado na linguagem SysML possui, basicamente, nove tipos de diagramas, estruturados conforme apresentado na Figura 15 (FRIEDENTHAL; MOORE; STEINER, 2014).

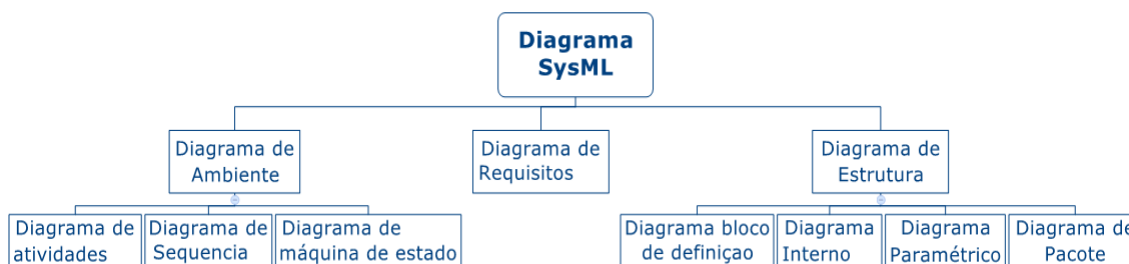


Figura 15 – Hierarquia dos diagramas no SysML
Fonte: Adaptado de Fowler (2004)

O Quadro 4 apresenta os objetivos de cada um dos diagramas ilustrados na Figura 15.

Diagrama	Propósito
Requisitos	Representa os requisitos através de textos, além de suas relações com outros requisitos ou elementos do sistema e casos de uso (e.g. relação entre requisitos e partes de um produto, e entre os requisitos e testes do produto, permitindo rastreabilidade dos requisitos)
Atividades	Ordem de ações conforme a disponibilidade de entradas, saídas e controle, além do processo de transformação das entradas em saídas
Sequência	Sequência de mensagens entre as partes
Máquina de Estados	Mudanças de estado no ambiente conforme a ocorrência de eventos
Casos de Uso	Permite a interação de atores externos ao sistema a fim de atingir objetivos
Definição de bloco (BDD)	Representa a composição e a classificação do sistema, através de sua estrutura hierárquica e de seus componentes.
Internos (IBD)	Possibilitam a representação da interconexão entre partes de um sistema e a interface entre eles.
Paramétrico	Representam restrições a determinadas propriedades
Pacote (<i>Package</i>)	Permite a organização dos elementos dentro do modelo do sistema

Quadro 4 – Objetivos diagramas SysML
Fonte: Adaptado de Fowler (2004)

Observando o Quadro 4, percebe-se que alguns diagramas são modificações do UML. Porém, o diagrama de requisitos e de parâmetros é exclusivo do SysML. A Figura 16 representa as características em comum às duas linguagens, representadas pelo bloco central, e exclusivas de cada linguagem, nos blocos laterais.

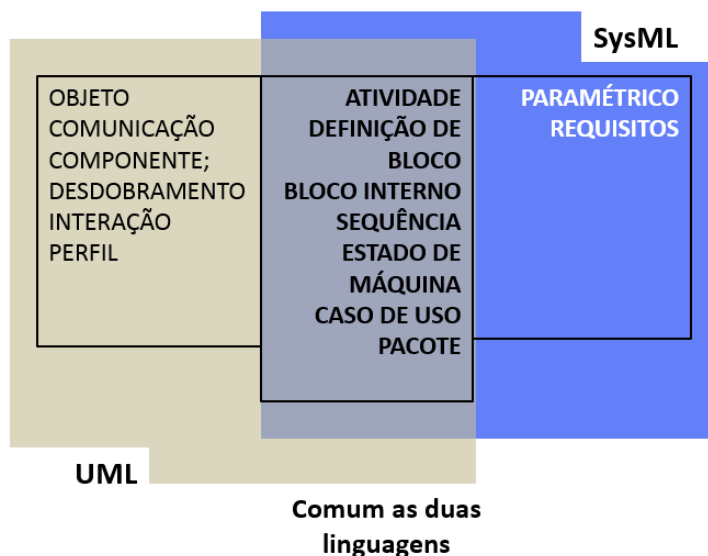


Figura 16 – SysML versus UML
 Fonte: Adaptado de Ivezic; Kulvatunyou; Srinivasan (2014)

2.4.3 OWL

Semelhante ao SysML, a linguagem OWL representa a descrição de classes, propriedades e suas instâncias, através de diagramas (GARGOURI, 2010). A Figura 17 mostra uma representação de propriedades através da linguagem OWL. Neste caso, existem duas classes distintas: Pessoa (*Person*) e País (*Country*). Índia e Bharat estão indicadas como duas instâncias para a mesma classe (i.e. Índia e Bharat são dois nomes usados para o mesmo país da República da Índia). Sonia tem um filho chamado Rahul, que, por sua vez, tem uma mãe chamada Sonia.

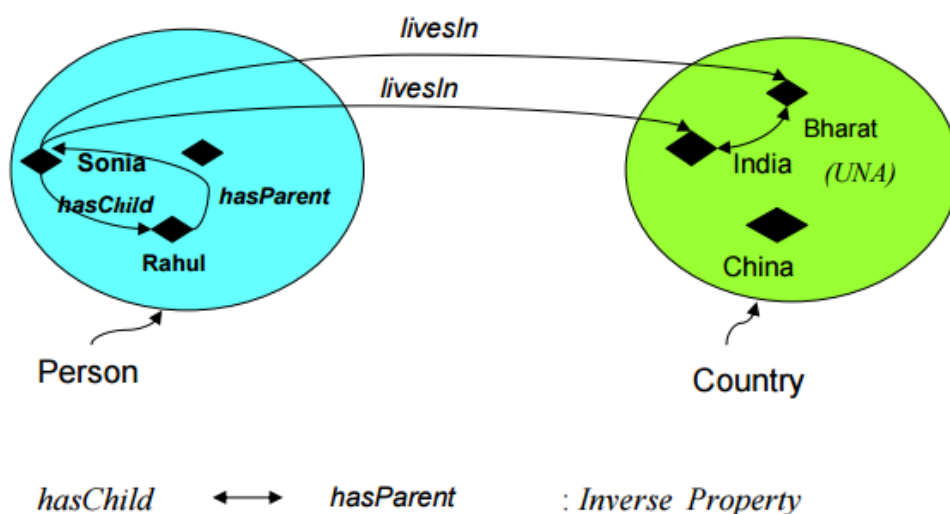


Figura 17 – Modelo OWL
 Fonte: Adaptado de Saha (2007)

A linguagem OWL é geralmente utilizada com aplicações que necessitem processar um conteúdo de informação, e não, apenas, apresentar as informações às pessoas (SAHA, 2007).

2.4.4 CONSIDERAÇÕES SOBRE AS LINGUAGENS SysML E OWL

Segundo Graves e Horrocks (2008), a OWL tem sido utilizada para permitir a consistência num conjunto de requisitos. Entretanto, para utilizar tal linguagem isoladamente na modelagem de sistemas, uma base de conhecimento deve ser criada para representar detalhadamente as informações, assim como as partes de um sistema e suas interconexões (e.g. no desenvolvimento de um veículo são especificados dois tanques de combustível idênticos, com uma conexão específica entre eles). Neste contexto, o SysML define de forma detalhada como as operações de um sistema são realizadas, o que não ocorre com a OWL. Entretanto a SysML não possibilita a construção detalhada dos termos das classes de um sistema, através de uma semântica formal, evitando ambiguidades, como ocorre na OWL. Graves (2009) discute este tema e recomenda a utilização das duas linguagens combinadas.

Como o foco deste trabalho está no fluxo dos requisitos de produto, os quais estão diretamente relacionados com operações (i.e. funções), a ferramenta escolhida para o projeto de pesquisa proposto será a linguagem SysML. Logo, a combinação das duas linguagens SysML e OWL não será endereçada.

2.4.5 XML

O *Extensible Markup Language* (XML) é uma linguagem expressada textualmente, utilizada para descrever classes de dados de objetos. O XML é complementar ao UML e ao padrão STEP, sendo bastante utilizada na extração de informações de modelos SysML. Dessa forma, torna-se possível o manuseio das informações através de modelos de transformação (PEAK et al., 2004; ZHOU; CAO; JIANG, 2013; LIN et al., 2015 ; BAJAJ; COLE; ZWEMER, 2016).

A interoperabilidade entre a SysML e a UML com outras linguagens é possível através do padrão XML Metadata Interchange (XMI), o qual é suportado pela maioria dos modeladores SysML e UML (e.g. *Magic Draw*, *Visual Paradigm*, *Rhapsody*) (WEI et al., 2016). Estes modeladores têm a capacidade de exportar um arquivo com a

extensão XMI, realizando o mapeamento entre os diagramas do modelo e o padrão textual do XMI.

A Figura 18 mostra a correspondência entre o padrão XMI e diagramas de classe de um modelo UML (JIANG; SYSTÄ, 2002). No diagrama, observa-se a classe Professor com uma relação de especialização com instructor (i.e. Professor é uma classe mais específica do instructor), que, por sua vez, se relaciona com Department. No lado direito da Figura 18 estão representadas as classes e relacionamentos no padrão XMI. Como a SysML é uma linguagem baseada na UML, tal interoperabilidade é realizada da mesma forma.

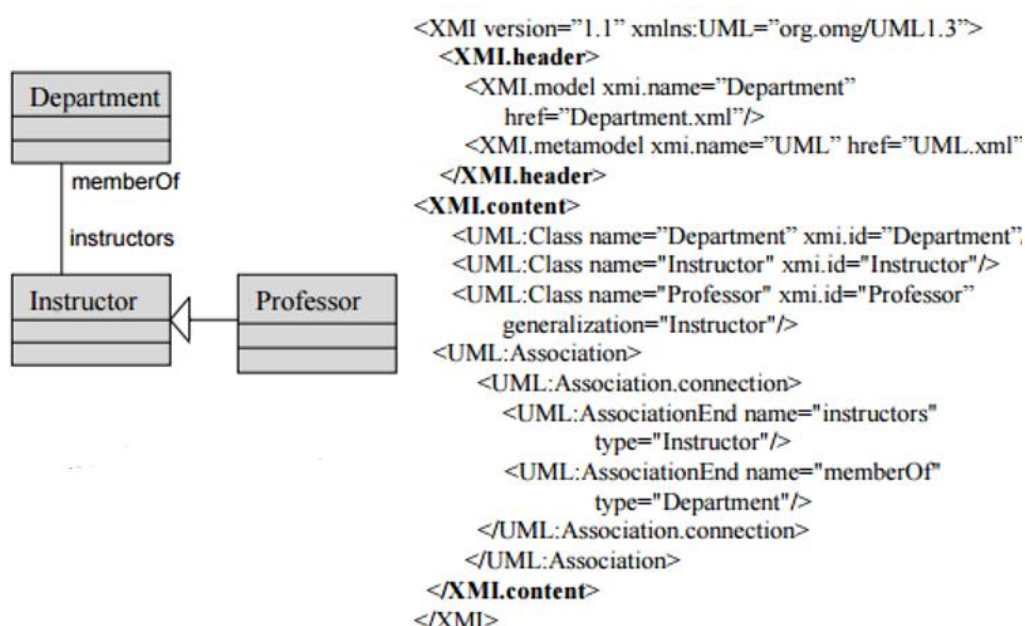


Figura 18 – Representação de um modelo UML no padrão XMI
 Fonte: Jiang e Systä (2002)

A interoperabilidade entre o SysML e o STEP é possível através da linguagem EXPRESS (ISO 10303-25), utilizada para transformar o padrão STEP em XMI e vice-versa (OMG, 2015a). Neste sentido, modelos 3D podem ser representados através da linguagem SysML, gerando um documento do padrão XMI, e importados em ferramentas CAD através do padrão STEP.

2.4.6 REQIF

O padrão *Requirements Interchange Format* (ReqIF) baseia-se na linguagem XML. Seu objetivo é possibilitar o intercâmbio e armazenamento de requisitos entre diferentes ferramentas. Diferentes *stakeholders*, utilizando diferentes ferramentas RM,

podem, portanto, acessar e gerenciar os requisitos (OMG, 2013). A Figura 19 ilustra as informações básicas contidas no padrão ReqIF. O id tem o objetivo de identificar o requisito. O texto contém a descrição do requisito. Os dois últimos campos representam, respectivamente, o *status* e a revisão do requisito.

```
id <--> id
text <--> text
maturity <--> status
revision <--> revision
```

Figura 19 – Informações básicas no padrão ReqIF
Fonte: OMG (2013)

Um desafio, neste cenário, é possibilitar a interoperabilidade entre softwares RM e elementos do modelo SysML. Na literatura, existem alguns estudos propondo modelos para auxiliar tal interoperabilidade (BAJAJ et al., 2011; NOYER et al., 2015b). A Figura 20 representa um exemplo do modelador SysML Rhapsody da IBM, o qual possibilita o intercâmbio do padrão ReqIF com o Polarion. Cada elemento da SysML (e.g. *Package*, *Requirement*, *Stereotypes*, *Datatypes*) é mapeado no padrão ReqIF e interpretado pelo Polarion, e vice-versa.



















 Polarion	 ReqIF	 Rhapsody
 Document	 Specification	 Package
 Work Item	 SpecObject	 Requirement
 Attribute Values	 AttributeValue	 Tags with Values
 Work Item Types	 SpecObjectType	 Stereotypes
 Datatypes	 DatatypeDefinition	 Datatypes

Figura 20 – Mapeamento ReqIF
Adaptado de Noyer et al. (2015b)

O intercâmbio de informações através de ferramentas que suportam o padrão ReqIF é representado na Figura 21. As setas representam as trocas de informações e as colunas representam usuários e ferramentas. Os usuários exportam e importam as especificações dos requisitos por meio das ferramentas RM. A troca de informação é realizada através de documentos no padrão XML (i.e. com as regras do padrão ReqIF). As informações geradas de uma ferramenta e importadas em outra são compatíveis através do padrão ReqIF, o qual se caracteriza por um documento baseado no XML.

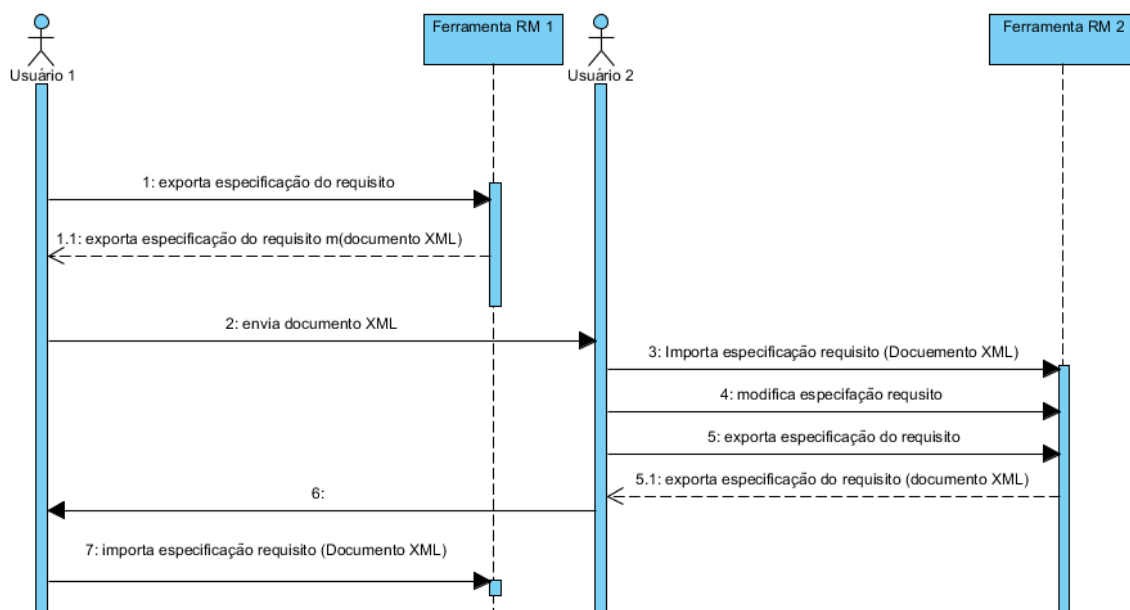


Figura 21 – Intercâmbio de requisitos através do padrão ReqIF
 Fonte: Adaptado de OMG (2014)

2.4.7 MODELOS DE TRANSFORMAÇÃO

Modelos de transformação são utilizados para o intercâmbio de informações entre artefatos que utilizam diferentes linguagens e padrões. O processo de transformação consiste no mapeamento de conceitos de uma linguagem para conceitos de outra (FRIEDENTHAL; MOORE; STEINER, 2014). A Figura 22 ilustra o processo de transformação entre as informações presentes no modelo SysML e o padrão STEP e ReqIF, os quais são utilizados, respectivamente, por ferramentas CAD, PLM e RM. O modelo SysML gera um arquivo no padrão XMI. Cada padrão de saída necessita de um modelo de transformação para que a informação seja compreensível às aplicações finais.

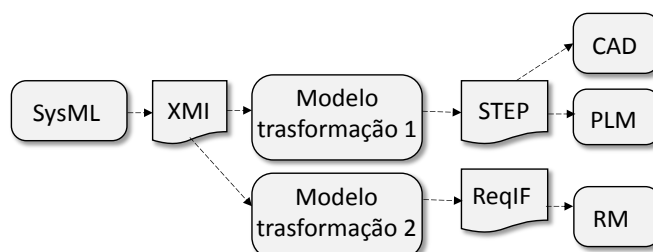


Figura 22 – Esquema de um modelo de transformação
 Fonte: Adaptado de Friedenthal e Moore e Steiner (2014) e Rota e Siegert e Brisolara (2014) e Wei et al. (2016)

Vários modelos de transformação têm sido utilizados com modelos SysML, com o objetivo de tornar informações compreensíveis em diversas aplicações do PDP (e.g. CAD, PLM, RM). Fan et al. (2015a) propõem a utilização de um modelo de transformação para gerar automaticamente modelos CAD preliminares, realizando o mapeamento entre diagramas estruturais do modelo SysML e o STEP. Já Bajaj e Cole e Zwemer (2016) estudam a integração entre modelos no padrão STEP e SysML, por meio do software Syndeia. Esta relação permite a geração de modelos SysML através de modelos CAD parametrizados e vice-versa. Através do Syndeia é possível realizar *queries* (e.g. buscas automatizadas por informações do modelo). Além disso, o Syndeia permite a interoperabilidade com softwares PLM (e.g. *Teamcenter*, *Windchill*).

2.4.8 BPMN

Disponibilizar a informação correta no momento adequado é um fator importante no PDP. Neste sentido, o padrão *Business Process Model and Notation* (BPMN) é um padrão que auxilia no alcance deste propósito (OMG, 2009). Este padrão é representado graficamente e baseado no conceito de fluxogramas. Seu objetivo é modelar processos de negócio, representando fluxos de informações complexos, de forma intuitiva. Ferramentas que trabalham com tal padrão (e.g. Bonita) possibilitam a utilização computacional dos diagramas, através do mapeamento entre o padrão BPMN e outras linguagens (VON ROSING et al., 2015).

2.5 GESTÃO DE REQUISITOS NO PDP

Requisitos são declarações que especificam um atributo, capacidade, característica ou qualidade de um artefato que governa algum aspecto de sua função, geometria ou material, contribuindo com parte da especificação de um produto (WU, D. et al., 2011). Dessa forma, os requisitos influenciam todas as decisões tomadas durante PDP. A definição dos requisitos ocorre no início do PDP. Sua gestão, porém, ocorre em todo o ciclo de vida do produto. Além de requisitos originados das necessidades dos clientes, também fazem parte dos requisitos do produto as seguintes restrições (PAHL et al., 2013):

- a) segurança: não apenas segurança ao usuário do produto, mas no sentido de confiabilidade e disponibilidade;
- b) ergonomia e estética: contexto homem-máquina;

- c) produção: serviços e tipo de produção;
- d) controle de qualidade: através do projeto e processo de fabricação;
- e) montagem: durante e depois da produção de componentes;
- f) transporte: dentro e fora da fábrica;
- g) operação: uso e manuseio;
- h) manutenção: conservação, inspeção e reparo;
- i) despesas: custos e cronograma; e
- j) sustentabilidade: reuso, descarte, armazenamento, impacto ambiental.

As restrições afetam diretamente a qualidade do produto, sendo que seu levantamento contribui para o estabelecimento de parâmetros que permitem o controle de qualidade de um produto, conforme representado na Figura 23.

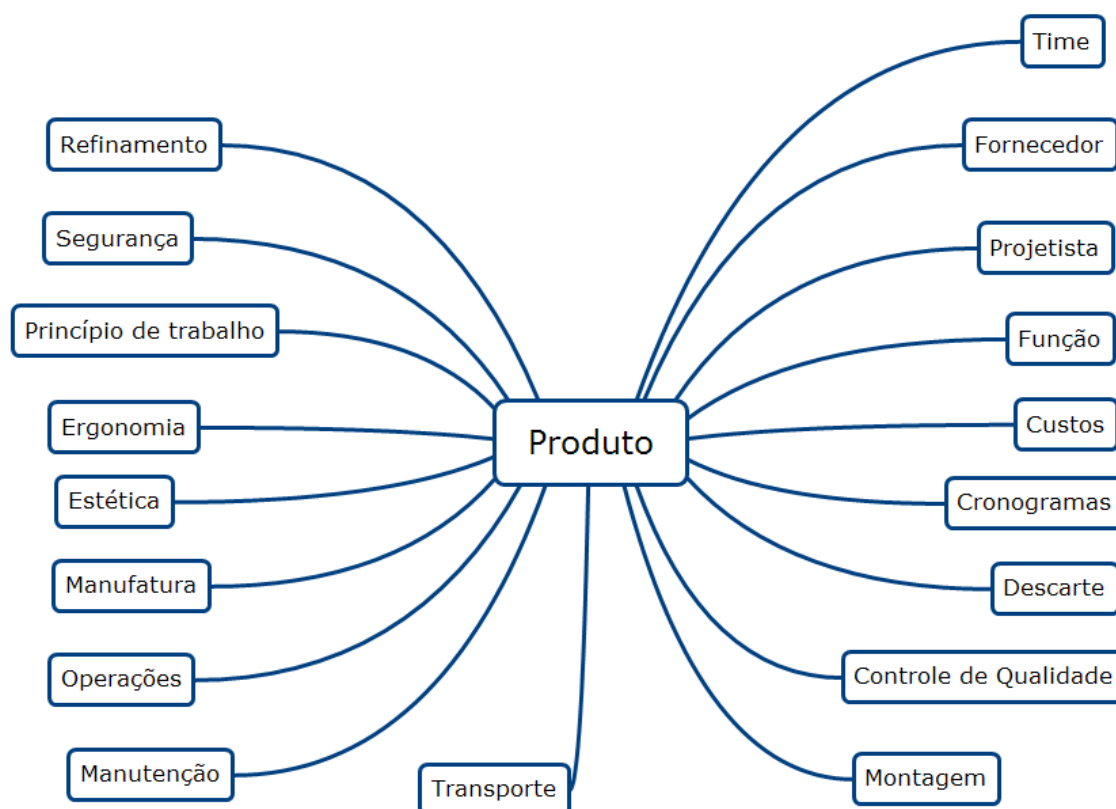


Figura 23 – Restrições de um produto
 Fonte: Adaptado de Pahl et al. (2013)

O relacionamento entre as necessidades dos clientes e especificações do produto tem papel fundamental nas etapas iniciais do PDP, apoiando todo o ciclo de vida do produto (SHARMA; RAWANI, 2006). Neste cenário, o Desdobramento da Função Qualidade (QFD), proposta por Akao (2004), é uma abordagem que auxilia

esse processo, traduzindo os requisitos de clientes em requisitos técnicos, os quais são entrada para todas as etapas do PDP e para a produção de um produto. O QFD costuma ser aplicado através de matrizes chamadas de Casas da Qualidade, ou *Houses of Quality* (HoQ). Uma estrutura simplificada de uma HoQ é ilustrada na Figura 24.

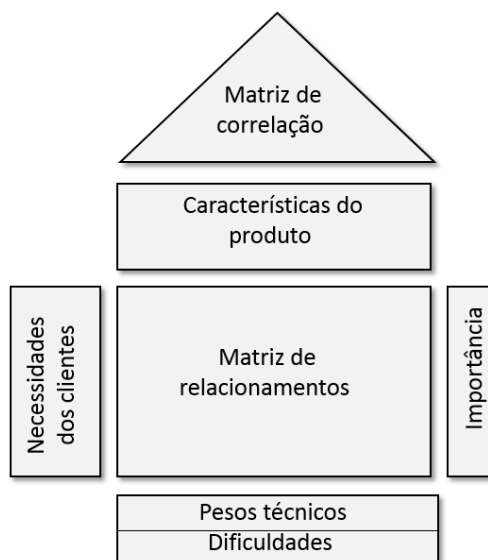


Figura 24 – Estrutura básica HoQ
Fonte: Adaptado de Akao (2004)

Os dados sobre as necessidades dos clientes são preenchidos no campo lateral esquerdo. As características do produto (i.e. atributos técnicos) são relacionadas com tais necessidades através da matriz de correlação, também conhecida como telhado da HoQ (AKAO, 2004). Nesse telhado, são preenchidos os relacionamentos entre as características de produto. O nível de importância de cada uma das necessidades é preenchido no campo lateral direito. Por meio desses dados é determinado o peso de cada característica de produto e preenchido o nível de dificuldade para solucionar cada uma das características.

Em produtos que englobam vários sistemas, os requisitos são dinâmicos. Isto ocorre devido às interações existentes entre eles ao longo do PDP, além das interações entre os vários elementos (e.g. ferramentas computacionais; métodos; linguagens) envolvidos no sistema (DUBOIS; PERALDI-FRATI; LAKHAL, 2010). Nesse contexto, Gausemeier e Moehring (2002) propõem um processo, denominado Processo V, para o desenvolvimento de produtos complexos como os mecatrônicos (Figura 25).

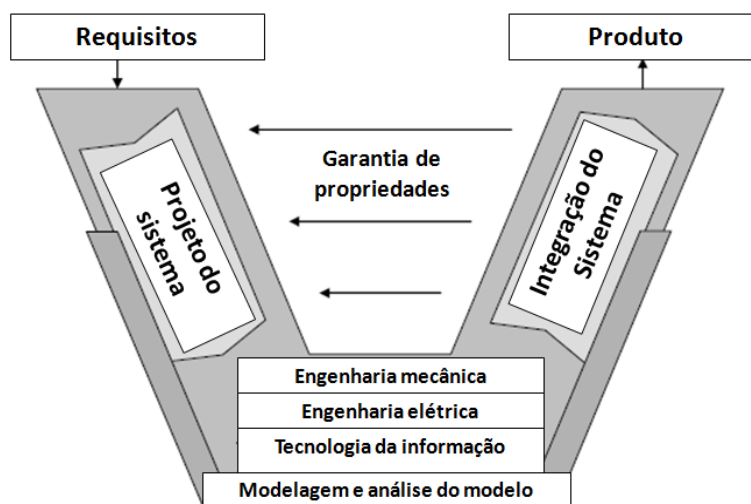


Figura 25 – Processo V
Fonte: Adaptado de Gausemeier e Moehring (2002)

No Processo V, os requisitos são informações de entrada. Porém, o desenvolvimento dos sistemas ocorre separadamente dos domínios específicos (e.g. engenharia mecânica; engenharia elétrica; tecnologia da informação), para que, então, todos os sistemas sejam integrados. Já, Nattermann e Anderl (2010) propõem uma variação deste formato, denominado Processo W (Figura 26). Tal proposta considera a interação entre todas as disciplinas envolvidas, mesmo em atividades paralelas não dependentes, pois, do ponto de vista da ES, estas interagem. Além disso, o Processo W apresenta o modelo do sistema como o núcleo do processo de desenvolvimento, alinhado com a abordagem MbSE. O processo W assemelha-se com o proposto por Pahl et al. (2013), uma vez que ambos tratam da interação existente entre as atividades do PDP, gerando alterações nos requisitos ao longo do processo.

Requisitos são coletados, geralmente, em expressões textuais de diversos tipos de documentos (e.g. doc, xls, pdf). Sendo assim, existem estratégias como a *boilerplates*, a qual padroniza a linguagem na definição de requisitos. Essa estratégia consiste na utilização de palavras-chave que auxiliarão a identificar um requisito dentro de um texto. Neste sentido, vários *templates* podem ser definidos para padronizar diferentes tipos de requisitos (HULL; JACKSON; DICK, 2010). A Figura 27 apresenta um *boilerplate* representando um requisito de desempenho. Cada palavra-chave representa um dado da definição do requisito. Logo, no texto “A máquina de café deve produzir café a cada 5 segundos”, tem-se o sistema representado pela

máquina; a função é produzir; o objeto é o café; o desempenho com unidade é 5 segundos.

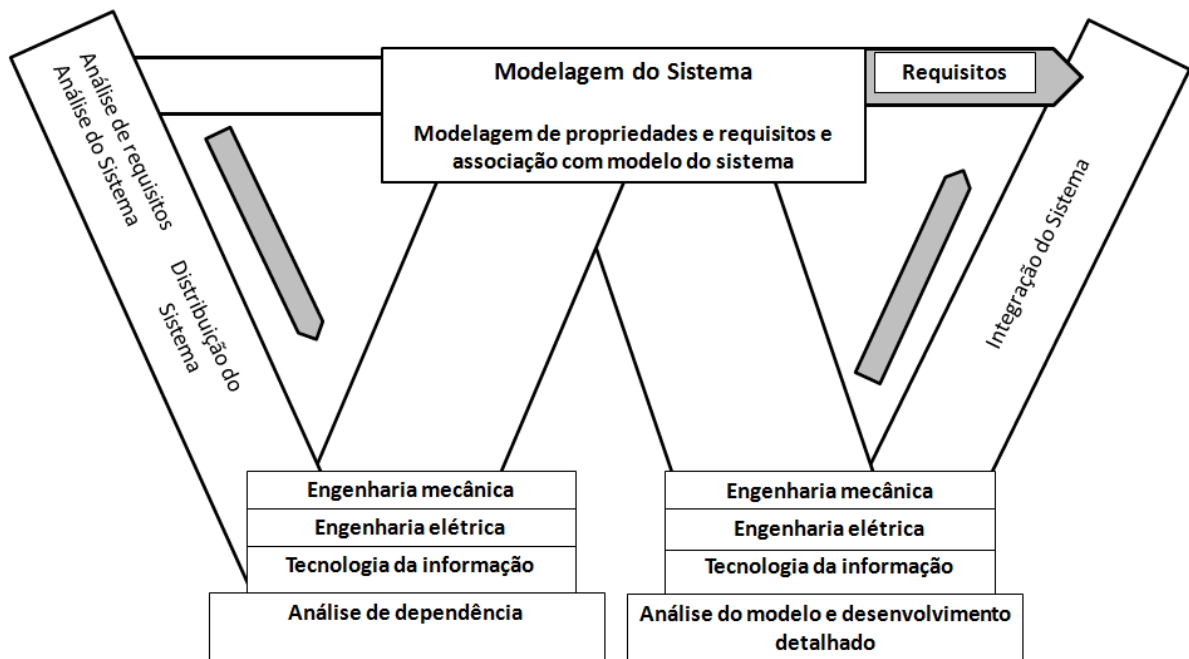
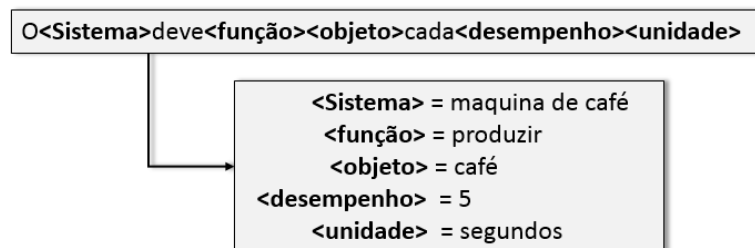


Figura 26 – Processo W
Fonte: Adaptado de Nattermann e Anderl (2010)



27 – Sintaxe de um boilerplate
Adaptado de Hull e Jackson e Dick (2010)

2.6 CONSIDERAÇÕES SOBRE O AMBIENTE DO PDP

Diante do dinamismo dos requisitos que englobam um produto e da multidisciplinaridade envolvida, bem como as interações existentes entre seus elementos, o PDP demanda uma abordagem como a MbSE. As linguagens e padrões ISO auxiliam o intercâmbio e a compreensão das informações ao longo do PDP. Entretanto, para que as informações do produto sejam interpretadas de uma forma

única, considerando diferentes formatos e linguagens, necessita-se de uma representação de produto sistêmica e padronizada, como a linguagem SysML. Todavia, o desafio, nessa representação, é alimentar o modelo do produto (i.e. sistema, subsistemas, componentes e requisitos) com as informações corretas e necessárias. Neste sentido, o uso de ferramentas tradicionais como o QFD e boas práticas de desenvolvimento de produtos e modelagem de sistemas são elementos fundamentais na aplicação da abordagem MbSE no PDP.

3 ASPECTOS METODOLÓGICOS

Neste capítulo, são apresentadas as características e procedimentos a serem utilizados, de forma que permitam êxito na obtenção dos objetivos propostos no trabalho.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA

A pesquisa apresentada no presente trabalho é baseada na metodologia *Design Science Research* (DSR). De acordo com March e Smith (1995), a ciência natural tenta entender e explicar fenômenos, enquanto a metodologia DSR preocupa-se em desenvolver caminhos para alcançar objetivos. Dessa forma, segundo Heravi e Lycett e DeCesare (2014), o objetivo da DSR é resolver problemas que necessitam do desenvolvimento de soluções, o qual utilizará um conjunto de artefatos. De acordo com Kroll e Kruchten (2003), um artefato consiste em uma parte de informação gerada, alterada ou usada em um processo. Kruchten (2004), por sua vez, define de forma mais específica artefato como o resultado de um trabalho final, ou resultados intermediários, gerado e utilizado durante um projeto, que será utilizado na captura e transmissão de informações. Os artefatos podem assumir quatro tipos diferentes de formatos (MARCH; SMITH, 1995):

- a) construções: consistem em linguagens ou conceitos básicos para caracterizar um fenômeno;
- b) modelos: descrevem situações, atividades e seu fluxo de trabalho;
- c) métodos: caminhos que devem ser seguidos para buscar os objetivos; e
- d) implementações: aplicações físicas para realizar determinadas atividades.

O artefato construído neste trabalho consiste em um metamodelo que representa um produto. Tal metamodelo pode ser instanciado na modelagem de novos produtos.

Segundo Vaishnavi e Kuechler (2004), o objetivo da metodologia DSR não é testar ou criar novas teorias, mas, sim, criar conhecimento através de soluções significativas, validadas por meio de provas de conceito, uso e valor, além de comunicar os resultados ao público adequado. Quando um artefato assume o formato de modelo, este deve ser fiel ao cenário de estudo, pleno, com o detalhamento

necessário à representação do fenômeno, robusto e com consistência entre os elementos que o compõem. Neste âmbito, o modelo proposto é demonstrado e avaliado utilizando como contexto o desenvolvimento de tratores agrícolas.

3.2 PROCEDIMENTO METODOLÓGICO

As atividades de uma pesquisa científica geralmente consistem em: construir, avaliar, teorizar e comprovar (MARCH; SMITH, 1995; BRYMAN, 2012; CRESWELL, 2013.). Dentro do escopo da metodologia DSR estão incluídas as seguintes atividades: construir e avaliar (MARCH; SMITH, 1995). De forma mais detalhada, Peffers et al. (2007) propõem as seguintes etapas para a DSR:

- a) identificar problema e motivação da pesquisa;
- b) definir os objetivos da solução;
- c) projetar e desenvolver a solução;
- d) demonstrar da solução;
- e) avaliar a solução;
- f) comunicar os resultados.

A fim de responder às questões de pesquisa e satisfazer os objetivos do trabalho (seções 1.2.3 e 1.3.2), e com base na proposta de Peffers et al. (2007), foram definidas treze tarefas que compõem o procedimento metodológico deste trabalho. Na Figura 28 estão representadas as tarefas, as quais estão relacionadas com as fases da metodologia DSR e os objetivos específicos do trabalho.

Para o diagnóstico (Etapa 1) do PDP da empresa, foi utilizado um período de permanência de 45 dias em uma indústria global do segmento de máquinas agrícolas. A coleta de informações utilizou como ferramentas entrevistas e análise de documentação de projetos. O objetivo da análise é evidenciar as lacunas no fluxo de informações do PDP, em um caso real na indústria, conforme previstos por Pahl e Beitz (2013) e ilustrados na Figura 1.

Os critérios definidos para a avaliação do modelo (tarefa 2) seguem a abordagem proposta por Mohagheghi; Dehlen; Neple (2009) para avaliação de modelos MbSE. Os critérios são: exatidão; completude; consistência; compreensibilidade; alterabilidade e fidelidade. O critério de exatidão permite avaliar a organização do modelo e seu atendimento a uma sintaxe padronizada, com uma correta definição de elementos e as relações entre eles. Já o objetivo da completude

é analisar se o modelo possui a quantidade de informações necessárias para a representação do produto. A presença ou não de inconsistências no modelo é avaliada pelo critério de consistência. A compreensibilidade tem o objetivo de analisar o nível de compreensão do modelo pelos *stakeholders* que o utilizarão. O desdobramento do modelo é avaliado pelo detalhamento. A capacidade de permitir alterações é avaliada pelo critério de alterabilidade.

O cenário de estudo (tarefa 3) deve estar alinhado com objetivos estratégicos da organização, a fim de motivar a pesquisa e incentivar a contribuição da empresa no estudo. Através de uma coleta de informações na empresa, durante aproximadamente quatro meses (e.g. documentos e normas disponíveis na intranet e entrevistas), identificou-se os requisitos do modelo e gerou-se a especificação-meta do produto (tarefas 4 e 5). Para a representação das informações coletadas, foi adotado uma padronização, baseada no padrão ReqIF e empregando a abordagem de *boilerplates* (tarefa 6). Com as especificações do produto identificadas, realizou-se a modelagem dos requisitos através da linguagem SysML, o que permitiu o início do desenvolvimento do modelo SysML (tarefa 7).

Por meio do Diagrama de Caso de Uso (UCDs) da SysML, modelou-se os cenários de uso do produto (tarefa 8). Alinhadas a estes cenários, aos requisitos já modelados e aos sistemas que compõem o produto, foi representada a estrutura do produto através de Diagramas de Definição de Blocos (BDDs) (tarefa 9). Nestes diagramas, foram incorporadas a seus componentes as informações coletadas do produto, atribuindo-lhes requisitos e funções (tarefa 10). Além disso, o uso de Diagramas Internos (IBDs) e Diagramas Paramétricos possibilitou a atribuição de propriedades, regras e relações entre os elementos do modelo (tarefa 11).

Com o modelo definido, foi proposta uma estratégia para a rastreabilidade das informações (tarefa 12). A demonstração do modelo foi realizada no contexto de uma empresa fabricante de máquinas agrícolas (tarefa 13). A demonstração possibilitou a avaliação do modelo (tarefa 14), através dos critérios identificados na tarefa 2.

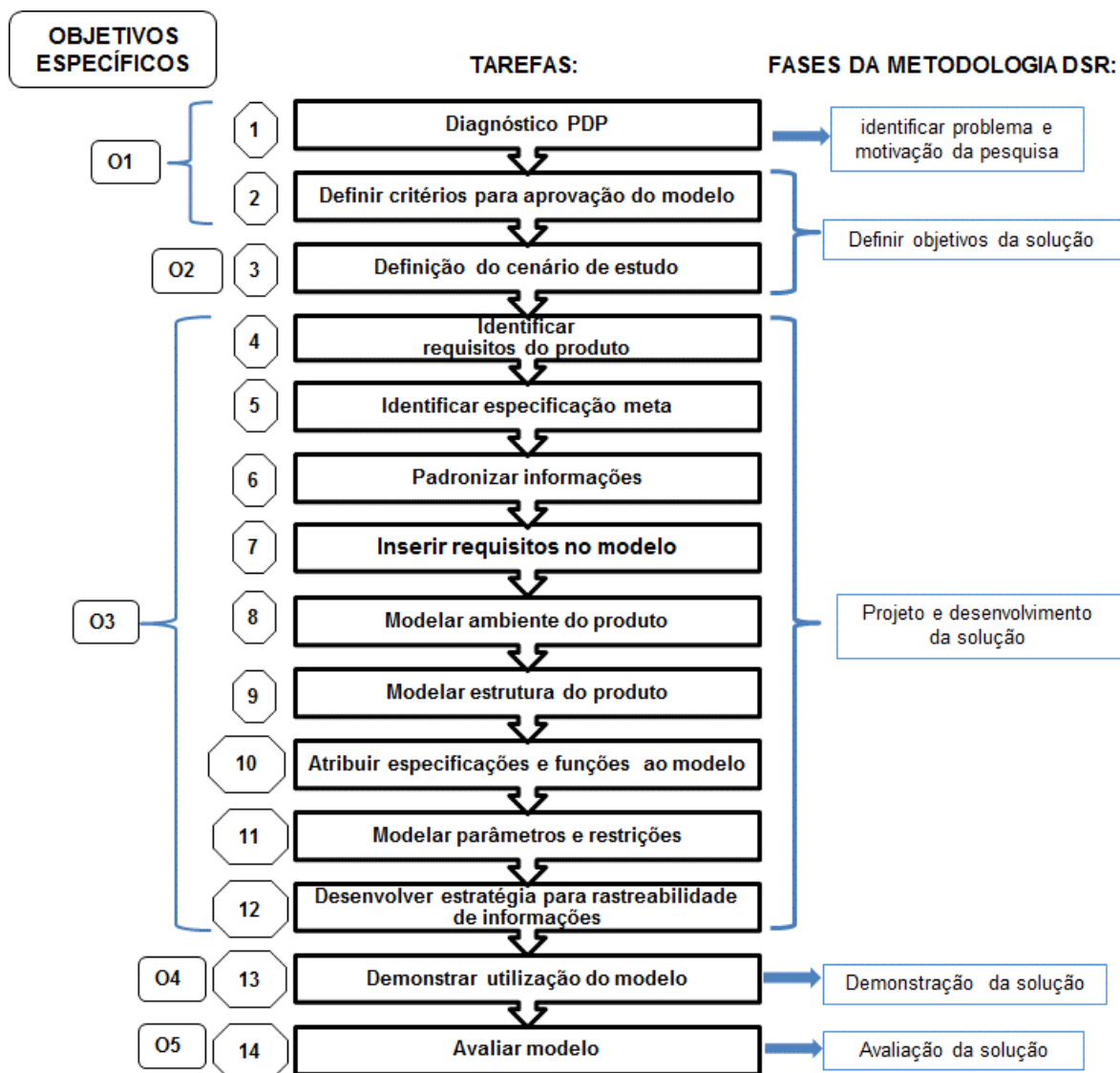


Figura 28 – Procedimento metodológico

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CONSIDERAÇÕES SOBRE A EMPRESA

O contexto utilizado para a execução da pesquisa é uma empresa fabricante global de máquinas agrícolas localizada em Curitiba. Os principais produtos fabricados por esta planta da organização são tratores e colheitadeiras. O desenvolvimento, demonstração e avaliação do modelo proposto abordam um modelo de trator, o qual será denominado ao longo do trabalho como Trator de Estudo (TE). Um trator é formado por uma grande variedade de sistemas (e.g. mecânico, hidráulico, elétrico), o que o caracteriza como um produto complexo.

Diversos estudos relacionados a tratores agrícolas têm sido publicados, com um grande foco na ergonomia e conforto dos operadores, relacionados, principalmente, ao desenvolvimento de cabines e elementos de interface com o operador (ELTAWIL; HEGAZY; MEHTA et al., 2008; RUŽIŪ, 2011; DI GIRONIMO et al., 2012; KUSHWAHA; TIWARI, 2016). Existem aproximadamente 62 normas ISO aplicadas ao desenvolvimento de tratores, as quais devem ser consultadas diariamente por engenheiros durante o PDP (INGLE, 2011). Entretanto, normas internacionais importantes são descritas pela *Organization for Economic Co-operation and Development* (OECD) (CODES, 2009).

A Figura 29 apresenta de forma resumida a estrutura do PDP identificado na empresa. O processo é baseado na abordagem proposta por Cooper (1990), denominada *Stage Gate* (i.e. processo sequencial dividido em etapas com marcos decisórios, denominados *Gates*). Uma planilha eletrônica, a qual contém descrições das entregas desejadas a cada uma das etapas do processo, pode ser acessada pelos *stakeholders* de um projeto.

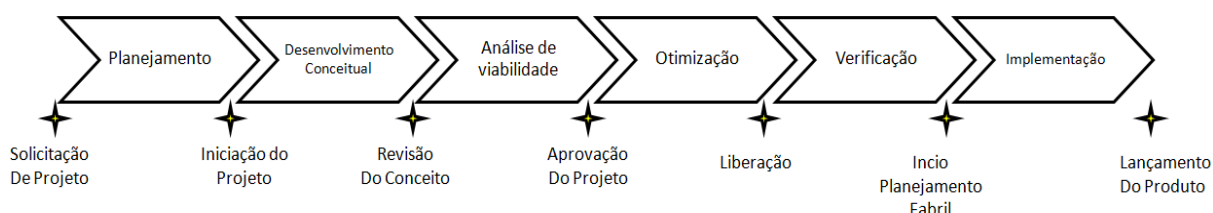


Figura 29 – PDP empresa estudada

O produto é representado através de um documento com uma estrutura hierárquica, contendo os sistemas e subsistemas do TE. Atividades de desenvolvimento são motivadas pela necessidade de criação ou alteração de algum componente dentro de tal estrutura. A Figura 30 ilustra o documento observado na empresa (i.e. denominado internamente como *Functional Block Diagram – FBD*). Os blocos brancos representam componentes (e.g. protetor do motor) ou subsistemas (e.g. sistema de injeção) que necessitam ser examinados. Essa hierarquia gera uma lista prévia de componentes *prévia* (*Bill of Materials – BOM*), a qual assume o papel de referência ao desenvolvimento. Os requisitos do produto são consultados por meio de outros documentos (e.g. apresentações e planilhas), porém, sem um relacionamento direto com a estrutura da Figura 30.

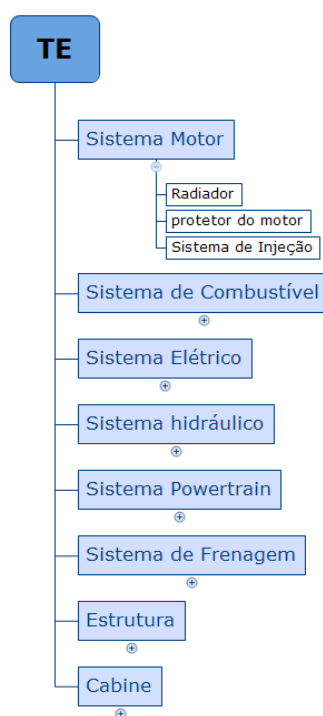


Figura 30 – Estrutura hierárquica do TE

4.2 DIAGNÓSTICO

Foram analisadas as solicitações de alteração de engenharia (*Engineering Change Request - ECR*) geradas nos últimos 18 meses, aplicadas ao TE. Estas informações foram consultadas através do PLM Enovia. No total, foram registradas, aproximadamente, 150 solicitações. Estas passaram por uma triagem, sendo que foram consideradas apenas as solicitações que demandavam alterações significativas no projeto do produto (e.g. substituição de peças, alterações geométricas,

posicionamento) ou que retratavam problemas identificados em fases críticas do ciclo de vida do produto (e.g. fases finais do PDP, manufatura, campo). Sendo assim, foram analisadas 48 solicitações. O Quadro 5 mostra um resumo dos motivos das solicitações realizadas.

Motivo	Área solicitante
Interferências mecânicas	Protótipo
Caminhos dos chicotes elétricos dificultam a montagem, ou colidem com peças ou mecanismos	Manufatura
Desconexão de mangueiras hidráulicas	Testes em campo
Esforços excessivos em pedais e alavancas	Cliente
Dificuldades de acesso para manutenção	Manufatura
	Cliente
	Protótipo
Problemas relacionados à eficiência do produto (e.g. torque; frenagem)	Cliente
Ausência de furos ou rasgos necessários à montagem	Protótipo
Falha em sistemas elétricos (e.g. luz indicadora de pressão de óleo não acendendo)	Cliente
Mau funcionamento do ar condicionado da cabine	Cliente

Quadro 5 – Solicitações de engenharia

Foram entrevistados os envolvidos na execução das solicitações, além dos solicitantes, totalizando 17 pessoas. Um roteiro de entrevista (Apêndice A) foi realizado de forma a compreender o fluxo de informações no PDP da empresa, identificando oportunidades de melhoria. O foco do diagnóstico foi o processo de criação de novas peças e componentes do TE, denominado, ao longo do trabalho, como Processo de Criação de Componentes (PCC). A Figura 31 mostra resumidamente a estratégia utilizada para o diagnóstico.

A identificação dos principais *stakeholders* envolvidos no PCC foi realizada através do software de PLM e de planilhas de controle disponibilizadas pela empresa. O Enovia contém o registro das solicitações e identificação dos solicitantes. As planilhas, por sua vez, informam os responsáveis pelo atendimento das ECRs. ~~Através~~ Por meio das informações coletadas nas entrevistas, foi possível identificar as principais atividades executadas e a forma como as informações trafegam no PCC.

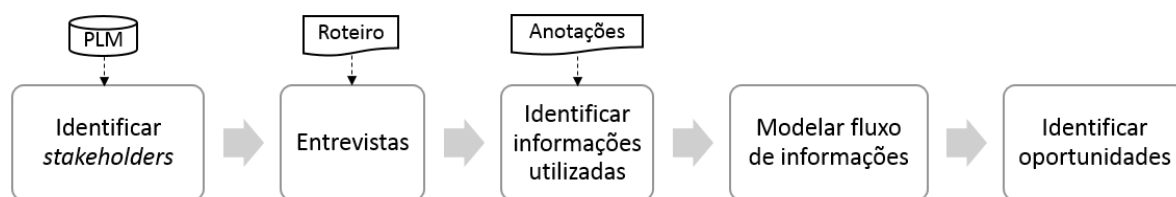


Figura 31 – Estratégia utilizada no diagnóstico

Fonte: Autoria própria

A Figura 32 apresenta um processo em BPMN, com o mapeamento do PCC resultante do diagnóstico. Foram identificadas onze principais atividades, representadas por blocos azuis:

1) solicitar criação: as ECRs, embora possam ser solicitadas requeridas por qualquer área (i.e. em alterações de produto), no início do desenvolvimento, são, geralmente, solicitadas pelo Departamento de Marketing, o qual utiliza como entrada um documento de especificação de produto chamado *Product Profile* e o FBD;

2) planejar: o chefe de engenharia planeja as atividades necessárias ao atendimento das ECRs (Figura 30 – Estrutura hierárquica do TE);

3) criar DMU preliminar: a equipe de *Packaging* (i.e. responsável pela arquitetura do produto) cria o DMU preliminar do produto, através da BOM prévia precedente, disponibilizada no PLM. Tal DMU contém posições prévias de conjuntos do produto, utilizando *skeletons* (i.e. esboços com pontos, linhas e planos);

4) analisar conjunto diretamente impactado: engenheiros de produto analisam os conjuntos e subconjuntos afetados pela alteração ou criação de um novo componente;

5) criar modelo 3D: os engenheiros de produtos criam modelos 3D dos componentes, através da consulta de documentos com normas e troca de informações com os departamentos de manufatura e validação do produto;

6) informar restrições de manufatura: o departamento de Manufatura informa a Engenharia de Produto, através de reuniões e e-mails, sobre restrições relacionadas à fabricação e montagem do produto;

7) informar restrições de segurança e legislação: O departamento de Validação do Produto informa as restrições de segurança e ambientais, leis e normas aplicáveis ao produto;

8) monitorar projeto: o chefe de engenharia monitora as atividades realizadas pelos engenheiros de produto por meio de reuniões, e observa a necessidade de análises e simulações relacionadas aos modelos 3D criados. Para isso, troca informações com os engenheiros de produto e departamentos de Validação e Manufatura;

9) analisar DMU: a equipe de *Packaging* realiza a análise DMU com o objetivo de verificar impactos dos componentes criados na arquitetura do produto (e.g. folgas, interferências, montagem, acessos). Ao fim da análise, é gerado um relatório com o resultado e restrições identificadas;

10) realizar simulações: a equipe de simulações as realiza de forma computacional, a fim de avaliar estruturalmente o produto (e.g. fadiga, ruptura). Para a realização da atividade, utilizam normas e padrões internos da empresa; e

11) aprovar modelos 3D.

Por meio das entrevistas e do mapeamento do processo, identificaram-se oportunidades relevantes de melhoria sobre o fluxo de informações do processo. O Quadro 6 apresenta uma síntese das oportunidades averiguadas.

De uma forma geral, através do Quadro 6, verifica-se a oportunidade de desenvolver uma nova estratégia de representação de produto via incorporação de informações de requisitos, parâmetros e funções, e do estabelecimento de relações com os sistemas do produto. Tal estratégia está alinhada com a abordagem MbSE e DTw. Na próxima seção a proposta do modelo é descrita detalhadamente.

4.3 DESENVOLVIMENTO DO MODELO

A fim de definir o conjunto de artefatos necessários ao desenvolvimento do modelo SysML, elaborou-se uma Estrutura Analítica de Trabalho (EAP), apresentada na Figura 33. Os números apresentam a ordem considerada na execução das atividades.

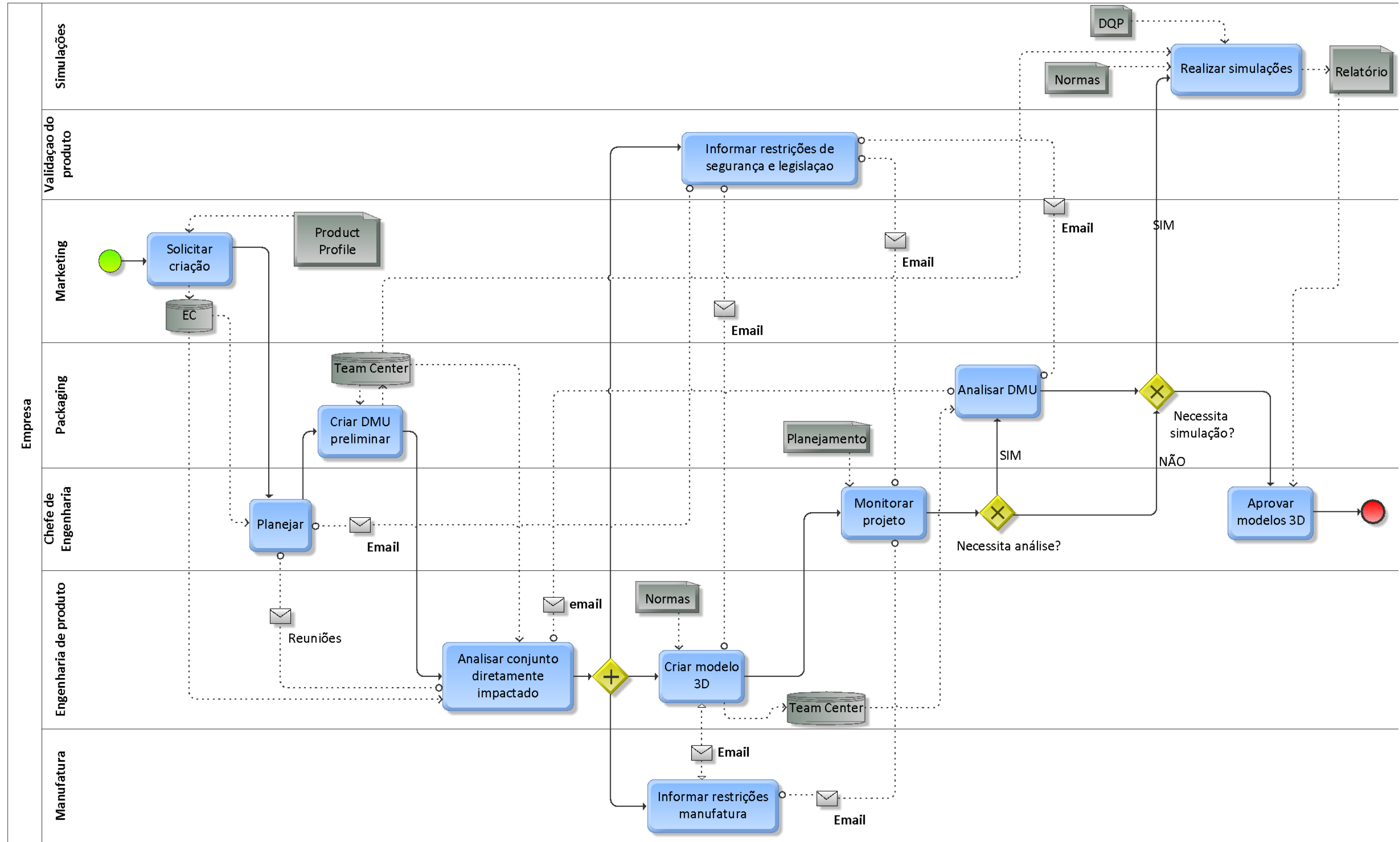


Figura 32 – Processo de Criação de Componentes

Evento	Oportunidades
Os requisitos estão presentes em diversos documentos e formatos.	Padronizar a especificação do produto, utilizando um único documento e sintaxe. Além disso, possibilitar o acesso aos requisitos, permitindo uma única interpretação e rastreabilidade
Estrutura do produto representada pelo FBD e BOM	Representar a estrutura do produto, permitindo o relacionamento dos sistemas com suas funções e requisitos
Solicitações realizadas com expressões textuais não padronizadas	Permitir que as solicitações sejam relacionadas com os requisitos e estrutura funcional do produto, deixando claro os parâmetros e critérios para a satisfação dos requisitos
Dificuldades no rastreamento de requisitos para simulações	Permitir que o departamento de simulações tenha acesso aos requisitos e parâmetros relevantes para as simulações, sem necessitar buscar as informações em diversos documentos.
Dificuldades no rastreamento de requisitos para análises DMU	Agregar valor ao DMU, para que o mesmo seja relacionado com os requisitos e parâmetros do produto, auxiliando as análises. Neste sentido, um DMU preliminar pode antecipar decisões de projeto e evitar retrabalhos
Dificuldades na priorização de atividades	Representar as relações entre atividades de projeto e os elementos do modelo (e.g. requisitos, funções, entre outras) de forma a auxiliar a tomada de decisões e planejamento de atividades

Quadro 6 – Oportunidades no PCC

A primeira tarefa na EAP é a definição de uma estratégia para a elicitação de requisitos. Conforme citado na seção 2.5, a gestão de requisitos inicia com a identificação das necessidades dos clientes, que, por sua vez, devem ser desdobradas em características do produto. Após a identificação das necessidades do cliente, deve-se consultar *stakeholders*-chave (i.e. especialistas) que auxiliem na identificação preliminar de restrições do produto. A Figura 34 apresenta um fluxograma com as etapas propostas para a elicitação de requisitos.

A HoQ1 tem a função de relacionar as necessidades dos clientes com características prévias do produto. Logo, as necessidades são requisitos com o maior nível de abstração presentes no modelo. Já, as características do produto consistem em uma primeira derivação dos requisitos. A HoQ2 tem o objetivo de realizar uma segunda derivação dos requisitos, relacionando as características iniciais com requisitos de sistemas e subsistemas. A priorização das características de projeto da HoQ1 são consideradas na HoQ2 para a determinação de prioridades dos requisitos dos sistemas e subsistemas. Além disso, define-se o nível de dificuldade para atingir cada requisito. Os relacionamentos entre os requisitos são identificados através do telhado da HoQ2.

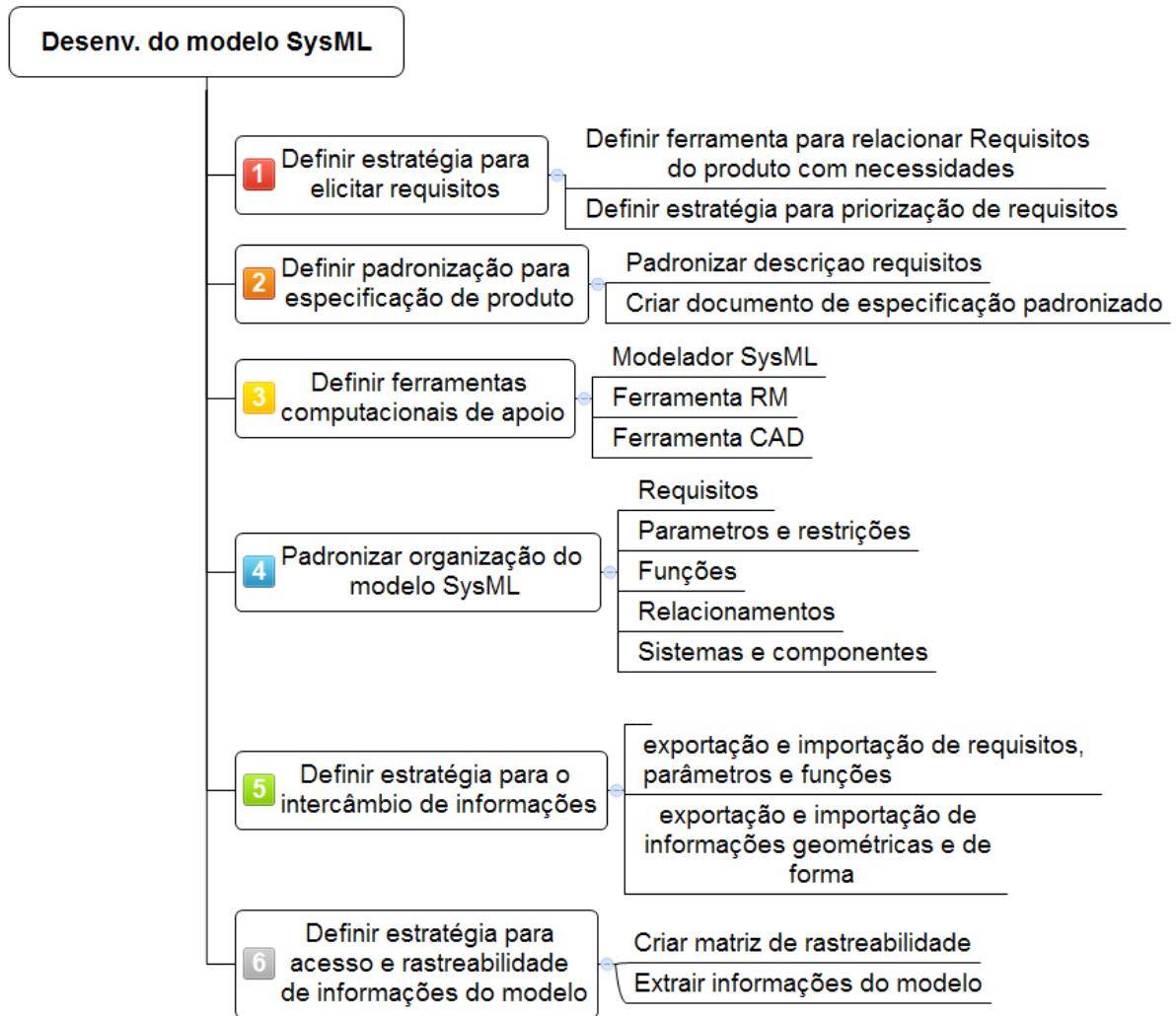


Figura 33 – Procedimento para o desenvolvimento do modelo

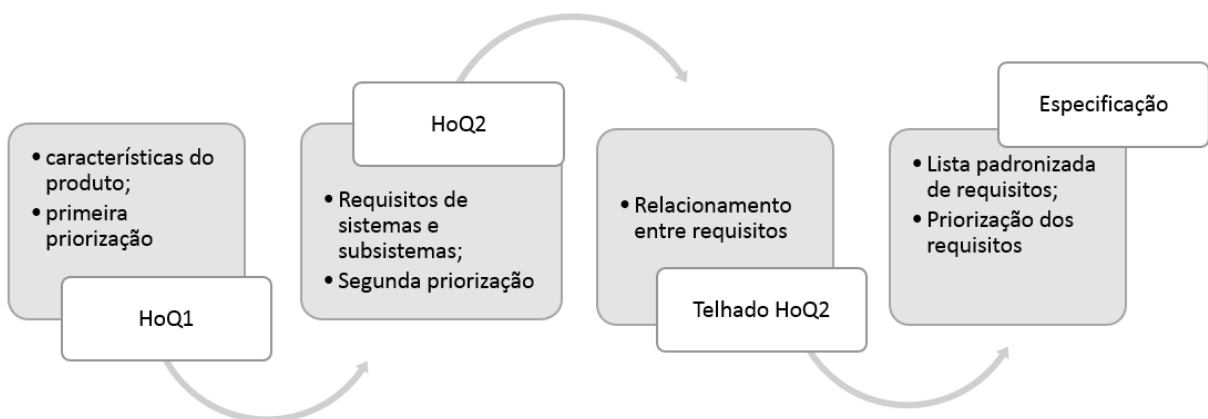


Figura 34 – Procedimento para elicitação de requisitos

Os requisitos conhecidos e hierarquizados devem povoar um documento de especificação-meta padronizado. A Figura 35 apresenta o leiaute proposto para o

documento de especificação de requisitos do produto. Os campos são baseados na estrutura do padrão ReqIF, de forma a facilitar a importação em uma ferramenta RM. A coluna de categorias auxilia a rastreabilidade dos requisitos. Baseando-se em Friedenthal e Moore e Steiner (2014), os requisitos podem ser categorizados em Desempenho (D), Funcional (F) e de Interface (I). Entretanto, mais categorias podem ser criadas conforme o contexto do produto (e.g. requisitos organizacionais, requisitos externos). A coluna de descrição é o campo mais importante do leiaute e segue a abordagem de *boilerplates*. A coluna P representa a ordem de prioridade do requisito (i.e. 3 para baixa, 5 para média, 7 para alta) herdada do HoQ2. A coluna S, também extraída do HoQ2, representa a severidade dos requisitos. A aba de status identifica a situação dos requisitos (e.g. proposto, aprovado, implementado).

ID	Categoria	Título	Descrição	P (3;5;7)	S (3;5;7)	Revisão	Status
REQ1	D	Esforço mínimo	O< sistema >deve < função >< objeto > mais que< valor >< unidade >	7	5	1.0	Proposto
REQ2	F	Acionamento	O< subsistema >deve< permitir acionamento >	7	5	1.1	Aprovado
REQ3	I	Acesso	O< componente >deve< permitir acesso >do < objeto >entre < valor x >a< valor y >unidade	7	5	1.2	Implementado

Figura 35 – Leiaute especificação-meta

Antes de iniciar a modelagem SysML, devem ser identificadas as interações e objetivos do usuário no uso do produto. Neste sentido, propõe-se a utilização de quadros de caso de uso (*Use Case – UC*). A Figura 36 apresenta um exemplo de um UC. O campo ID e o nome têm o objetivo de identificar o quadro. No exemplo, observa-se o quadro para o cenário motorista entra no veículo. O ator, no sistema, é o motorista. Os campos 1, 2 e 3 referem-se às ações executadas pelo motorista ao entrar no veículo. Os UCs são informações de entrada para a modelagem dos diagramas UCD na linguagem SysML.

ID: UC1 NOME: MOTORISTA ENTRA NO VEÍCULO ATOR: MOTORISTA
Cenário: 1. Abre a porta; 2. Senta no banco; 3. Fecha a porta;

Figura 36 – Quadro UC

Para padronizar a modelagem do produto, deve-se determinar a correspondência entre a sintaxe da linguagem SysML e os elementos do produto. A

Figura 37 mostra o objetivo de cada elemento da linguagem na representação do produto.

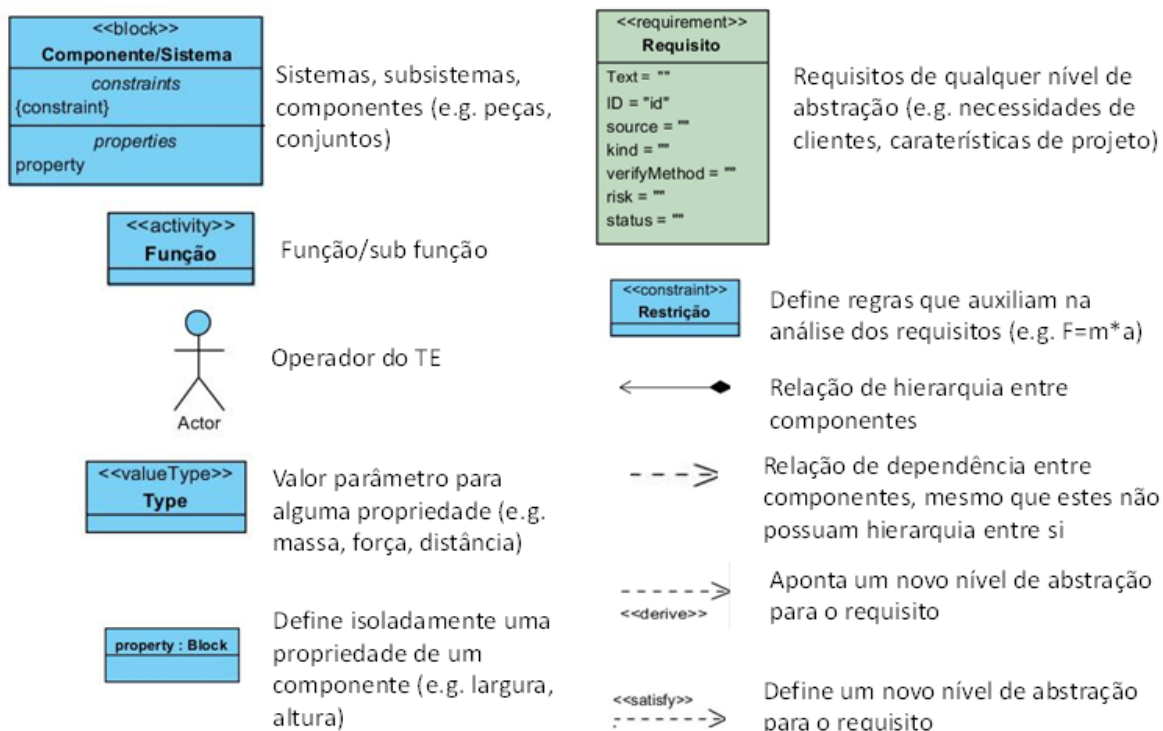


Figura 37 – Objetivos dos elementos do modelo SysML

Além da compreensão sobre a sintaxe da linguagem SysML, o Quadro 7 apresenta uma proposta para a organização dos diagramas a serem modelados. Cada diagrama tem sua função na representação do produto.

Categoria	Diagramas	Objetivo
Ambiente	UCD	Representar ações realizadas pelo usuário do produto
Categorização	<i>Packages</i>	Categorização e organização dos elementos do modelo
Especificação	Diagramas de requisitos	Requisitos do produto
Estrutura	IBD e BDD	Estrutura hierárquica e funcional entre os componentes do produto
Funções	BDD	Estrutura funcional do produto
Parâmetros	Diagramas paramétricos e BDD	Regras e parâmetros de controle para os requisitos

Quadro 7 – Organização do modelo SysML

Seguindo as boas práticas de desenvolvimento de produto e modelagem de sistemas propostas por Pahl et al. (2013) e Friedenthal e Moore e Steiner (2014),

respectivamente, as etapas propostas para a modelagem SysML são: a) modelagem do ambiente; b) modelagem de requisitos; modelagem funcional; modelagem estrutural e modelagem paramétrica.

A modelagem do ambiente refere-se a uma representação em alto nível dos elementos envolvidos no sistema que engloba o produto. No modelo proposto, diagramas UCD assumem esse papel. A modelagem dos requisitos deriva das necessidades dos clientes. Porém, deve considerar, também, as ações presentes nos diagramas UCD. Tais ações representam casos de uso do produto pelo usuário.

As funções relacionam-se com a modelagem estrutural do modelo, a qual tem o objetivo de representar a estrutura do produto (i.e. sistemas, subsistemas e componentes) por meio de diagramas BDD. Por sua vez, as interações existentes entre os componentes do produto são representadas através de diagramas IBD. Já a modelagem paramétrica refere-se à representação de regras e restrições, as quais podem ser utilizadas para a avaliação dos requisitos do produto. Além disso, blocos de atividades, representados em diagramas BDD, podem representar atividades de desenvolvimento, as quais podem ser relacionadas com os demais elementos do modelo, auxiliando o planejamento de atividades no PDP.

Os modeladores SysML comerciais possuem a capacidade de exportar uma matriz de rastreabilidade (documento padrão xls), a qual mostra o relacionamento entre os elementos do modelo. A Figura 38 apresenta o leiaute proposto para uma matriz de rastreabilidade de relacionamentos do modelo. Essa matriz relaciona os requisitos (células laranjadas), incluindo as necessidades dos clientes (células amarelas), com as funções (células verdes) e os sistemas, subsistemas e componentes (células azuis) do produto. A legenda no canto superior esquerdo indica os tipos de relações existentes entre os elementos do produto (e.g. dependência, hierarquia, alocação). A matriz é uma estratégia de permitir a visualização dos relacionamentos no modelo, por *stakeholders* não familiarizados com a linguagem SysML (e.g. compras, marketing, engenheiros mecânicos).

A matriz da Figura 38 apresenta visualmente os relacionamentos entre elementos. A troca efetiva de informações entre o modelo e ferramentas computacionais (e.g. CAD, CAE, PLM, RM) é realizada, contudo, através do padrão ReqIF (i.e. documentos baseados no padrão XML) e XMI, conforme citado na seção 2.42. O XMI é utilizado para a interoperabilidade com documentos no padrão STEP.

O ReqIF, entretanto, é a base para o intercâmbio de requisitos entre o modelo SysML e ferramentas RM, ou demais ferramentas que suportem o padrão ReqIF.

LEGENDA:		REQUISITOS						FUNÇÕES				SISTEMAS/COMPONENTES									
		Requisito 1	Requisito 2	Requisito 3	Requisito 4	Requisito 5	Requisito 6	Função 1	Função 2	Função 3	Função 4	Sistema 1	Sistema 2	Sistema 3	Subsistema 1	Subsistema 2	Subsistema 3	Componente 1	Componente 2	Componente 3	
Requisitos	Requisito 1		R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R	R				R	R	R	
	Requisito 2			R	R	R	R	R			R	R	R	R				R	R	R	
	Requisito 3				R	R	R	R	R	R	R										
	Requisito 4					R	R	R	R	R	R										
	Requisito 5						R	R	R	R	R										
	Requisito 6									R		R									
Funções	Função 1									R		A								A	
	Função 2										R			A							
	Função 3												A								
	Função 4											A			A			A			
Sistemas/Componentes	Sistema 1											>H	>H	>H				>H	>H	>H	
	Sistema 2																				
	Sistema 3																				
	Subsistema 1																				
	Subsistema 2																				
	Subsistema 3																				
	Componente 1																		R		
	Componente 2																				
	Componente 3																				

Figura 38 – Leiaute Matriz de Rastreabilidade

A Figura 39 apresenta, de forma esquemática, a estrutura do metamodelo proposto nesta seção. O *layer* intermediário representa o modelo SysML. As setas indicam o fluxo de informações. O *layer* superior representa as informações de entrada para a modelagem dos diagramas do modelo (blocos brancos). O *layer* inferior representa as ferramentas utilizadas pelos *stakeholders*. Percebe-se que a troca de informações entre tais ferramentas e o modelo é bidirecional. Isso está relacionado à constante interação entre as áreas de conhecimento no PDP e o modelo do sistema, bem como o dinamismo dos requisitos ao longo do processo, conforme citado na seção 2.5.

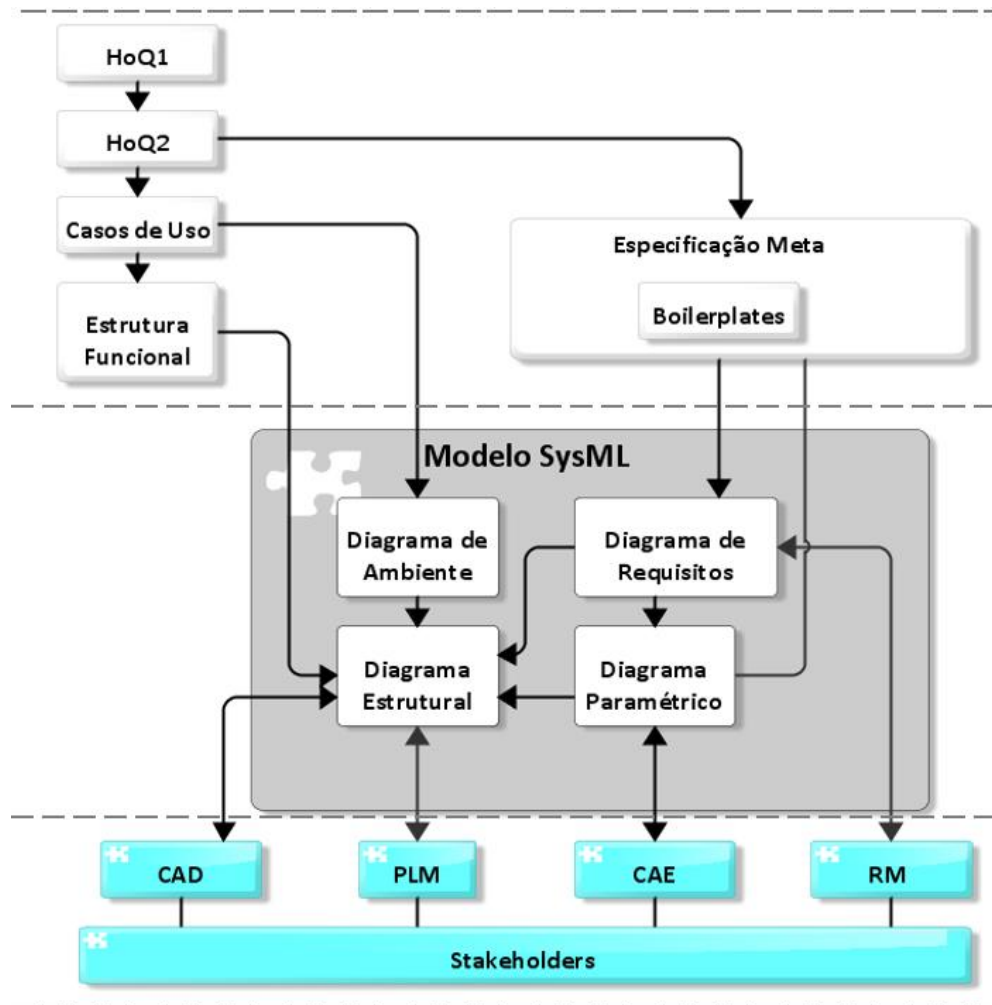


Figura 39 – Estrutura do modelo proposto

Através do metamodelo, os *stakeholders* podem inserir e extrair informações pertinentes às atividades de desenvolvimento. Requisitos podem ser exportados do modelo SysML e importados na ferramenta RM, ou importados no modelo no sentido contrário, conforme já mostrado na Figura 21. Isso possibilita a revisão e criação de novos requisitos ao longo do PDP, bem como sua rastreabilidade. Engenheiros de produto podem importar modelos 3D prévios em ferramentas CAD, com parâmetros e restrições especificadas no modelo SysML. No sentido contrário, modelos 3D criados na ferramenta CAD podem ser importados no modelo SysML. A interoperabilidade é possível através da linguagem Express, conforme mencionado na seção 2.45. De forma semelhante, ferramentas PLM e CAE podem acessar informações do modelo SysML por meio do padrão STEP (i.e. padrão XMI transformado).

A Figura 40 ilustra o uso do modelo por *stakeholders*. As colunas representam *stakeholders* (e.g. engenheiro de produto e engenheiro de sistemas) e suas ferramentas (e.g. CAD e modelador SysML). As setas, por sua vez, indicam a troca

de informações em uma sequência. O engenheiro de produto cria um modelo 3D e exporta um documento no padrão STEP através da ferramenta CAD. Esse documento é enviado ao engenheiro de sistemas, o qual importa o documento na ferramenta de transformação. O documento é transformado em XMI e importado no modelo SysML. O processo inverso, no qual o documento XMI é transformando em STEP e importado na ferramenta CAD pelo engenheiro de produto – também é representado.

4.4 DEMONSTRAÇÃO DO MODELO

Nesta seção é descrita a instanciação do metamodelo da Figura 39 no contexto do TE, caracterizando a demonstração do modelo proposto. Inicialmente, são descritas a incorporação das informações no modelo SysML e a modelagem do produto. Num segundo momento, é realizada uma instanciação do metamodelo, aplicando seu uso no contexto do TE.

4.4.1 FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS UTILIZADAS

Existem alguns modeladores SysML comerciais disponíveis no mercado (e.g. IBM *Rhapsody*, *Enterprise Architect*, *MagicDraw*). Para a pesquisa, foram selecionados três modeladores gratuitos disponíveis no mercado: *Modelio*, *Eclipse Papyrus* e *Visual Paradigm* (versão de avaliação). A versão gratuita do *Modelio* trabalha com uma quantidade reduzida de diagramas, o que compromete o desenvolvimento. O *Papyrus* e *Visual Paradigm* não possuem tal limitação, porém o *Visual Paradigm* contém um maior número de bibliotecas e funções que facilitam o processo de modelagem. Logo, o modelador SysML escolhido foi o *Visual Paradigm*.

O software CAD utilizado foi o *Catia V5*, com as ferramentas KBE *Ergonomic Design Analysis* (EDA) e *DMU*. Não se optou pelo software *CREO*, utilizado na empresa contexto da demonstração, pois a versão disponibilizada não contém algumas ferramentas KBE, úteis na demonstração do modelo. Já a ferramenta RM utilizada no trabalho foi uma versão de avaliação do software *Polarion*.

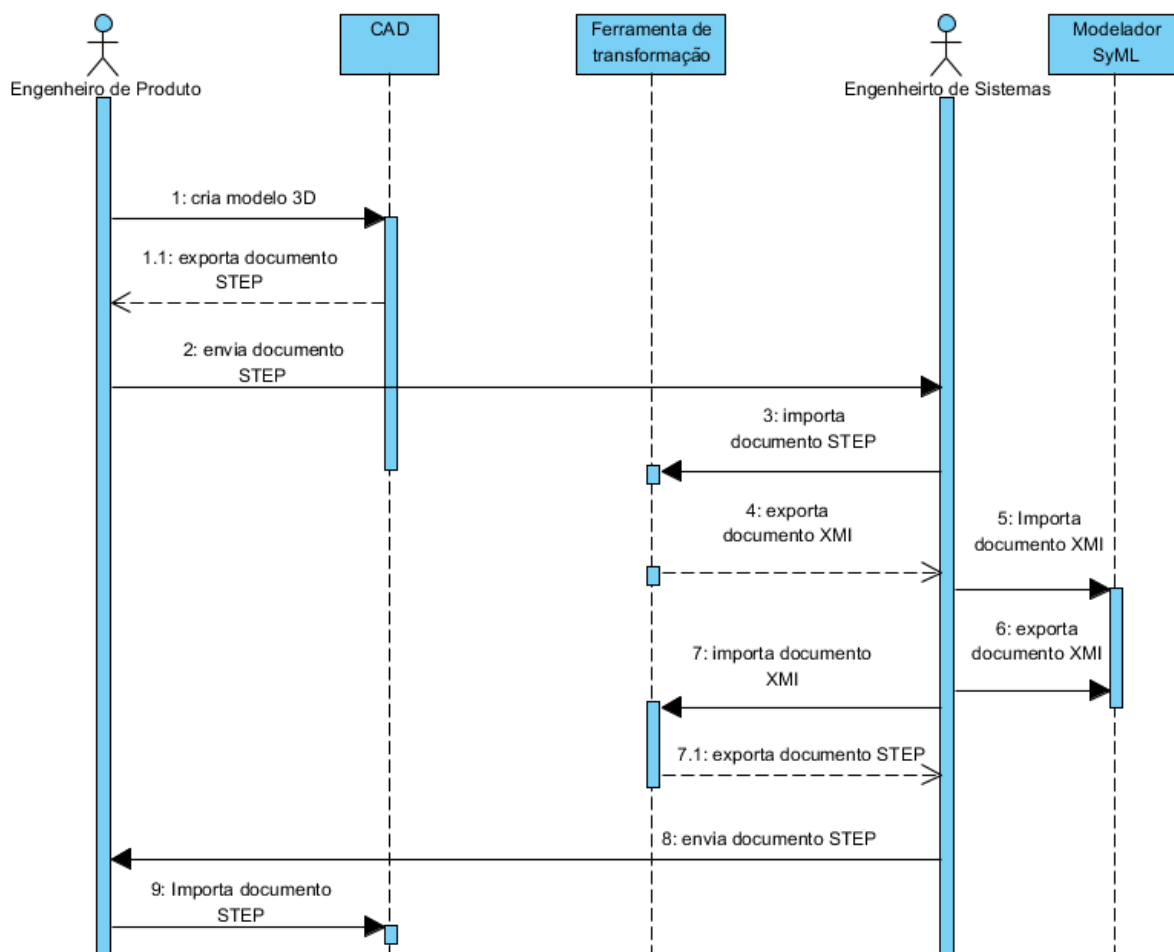


Figura 40 – Intercâmbio de informações entre o modelo SysML e ferramenta CAD

4.4.2 DELIMITAÇÃO DO SISTEMA

Para compor a proposta do modelo, buscou-se delimitar o TE. Este é composto por sete subsistemas (cabine, sistema hidráulico, sistema de frenagem, sistema motor, sistema de combustível, sistema elétrico e sistema de direção) e tem como foco um sistema de grande impacto no usuário. Os demais são considerados como Caixas-Pretas (i.e. o detalhamento destes sistemas não afetam o entendimento da proposta do modelo). Logo, o contexto da demonstração é a Cabine do TE, destacado em amarelo na Figura 41.

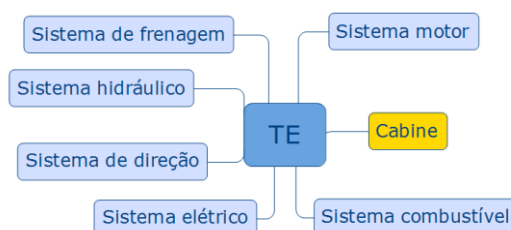


Figura 41 – Sistemas no TE

4.4.3 FUNÇÕES DO PRODUTO

Considerando os sistemas presentes do TE, determinou-se um desdobramento funcional básico. Sua função global é tracionar carga, e as subfunções diretamente ligadas são: desacelerar trator, armazenar combustível, transmitir energia, conduzir combustível, guiar trator, proteger operador, permitir controle, fornecer energia, conduzir eletricidade, transmitir energia, armazenar combustível. A Figura 42 ilustra tal estrutura.

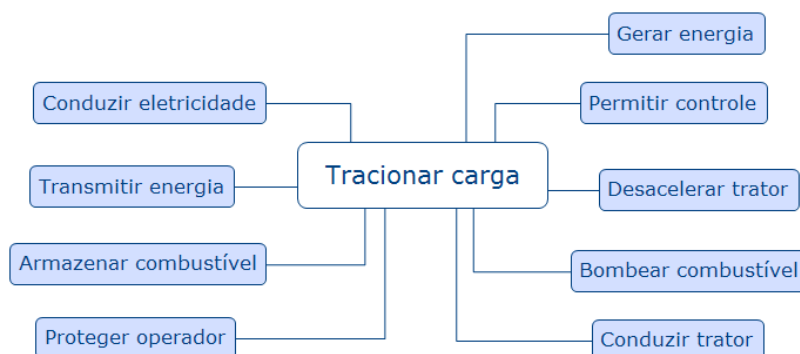


Figura 42 – Estrutura funcional básica TE

Como o TE foi delimitado ao subsistema cabine, desdobrou-se a subfunção Proteger operador, diretamente ligada a tal subsistema. A Figura 43 apresenta as principais subfunções ligadas à cabine.

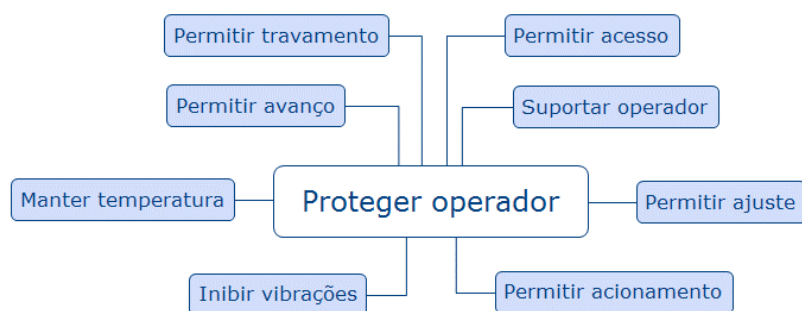


Figura 43 – Estrutura funcional básica da cabine

		Características do projeto													
		MTBF	Durabilidade componentes do motor	Capacidade de torque	Acomodação dos bancos	Alcance do operador	Visibilidade do operador	Acesso a controles	Exposição à vibração	Exposição a ruído	Segurança direção	Segurança ao conduzir veículo	Esforço do operador	Conforto térmico	
Direção de melhoria		▲	▲	▲	▲	x	▲	x	▼	▲	▲	▲	▼	▼	
Importância	Necessidades dos clientes														
	9	Produtividade			9	5	9	3	9					5	
	5	Confiabilidade	9	9					5						
	5	Conforto operador				9	9	9	9				5	9	9
	5	Fácil manutenção					5		9						
	9	Segurança				5		9	5	9	9	9	9	5	3
	5	Fácil operação				9	5	5	5	9	9	5	5	5	3
	9	Desempenho			9							5			
5	Custo	5	5	5	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
Peso dos requisitos		70	70	115	195	191	193	281	141	141	166	110	175	102	

Figura 44 – HoQ 1

4.4.4 ELICITAÇÃO DE REQUISITOS

Através de reuniões com o departamento de Marketing e documentos gerados durante o projeto informacional do TE (e.g. *Product Profile* – documento com especificações básicas do produto), determinaram-se as necessidades dos clientes e características de projeto de maior relevância. Tais informações foram inseridas na HoQ1 (Figura 44). As características de projeto representam uma primeira derivação dos requisitos (e.g. a necessidade conforto do operador, foi desdobrada em acomodação dos bancos, alcance e visibilidade do operador, níveis de ruído, vibração e sensação térmica). Logo, por meio da HoQ1, tem-se o relacionamento entre as necessidade de cliente e características do produto, bem como o peso de tais características (e.g. o acesso a dispositivos de controle e acomodação dos bancos são prioritários). Nesta etapa, não se utilizou o telhado da HoQ1.

Num segundo momento, por meio de reuniões com a equipe de validação de produto, foram coletados requisitos ligados à Cabine (Figuras 103 e 104 dos Anexos), dando origem à HoQ2 (Apêndice B). Por meio dela são observadas as características

mais relevantes ao TE (e.g. ajuste do banco e alcance do operador), enquanto algumas necessidades não são impactadas por tal sistema (e.g. durabilidade de componentes do motor). Através de um documento chamado *Design Quality Procedure* (DQP) (i.e. documento confidencial da empresa, com boas práticas e procedimentos de projeto), foi possível identificar os requisitos ligados a um subsistema da Cabine, que consiste no Conjunto Banco Operador (CBO). Tais informações também foram inseridas no HoQ2.

Os pesos das características de projeto da HoQ1 foram utilizados no HoQ2 para a determinação das prioridades dos requisitos da Cabine. Para analisar os relacionamentos entre os requisitos, utilizou-se o telhado da HoQ2 (Figura 45).

4.4.5 ESPECIFICAÇÃO-META

Através de informações fornecidas pelo departamento de Validação do produto, foi criado o quadro de especificação-meta. O Quadro 8 apresenta os principais requisitos da cabine e do subsistema CBO. Os índices de severidade foram identificados empiricamente, conforme opiniões dos envolvidos sobre a dificuldade em atender a cada requisito.

ID	Categoria	Título	Descrição	P	S	Status	Revisão
REQ1	I	Alcance superior A	A<Esfera_A>deve<ocupar a cabine> mais que<550><mm>	7	5	Proposto	1.0
REQ2	I	Alcance superior B	A<Esfera_B>deve<ocupar a cabine> entre<550 mm>a<1000>mm	7	5	Proposto	1.0
REQ3	I	Acesso alavanca frontal	A<Alavanca_frontend>deve<permitir acesso>mais que<25><mm>	7	9	Proposto	1.0
REQ4	I	Inclinação do banco	O<Cinto_de_segurança>deve<permitir_inclinação>do<plano horizontal>entre <40><graus>e<50>graus	7	5	Proposto	1.0
REQ5	I	Acesso alavanca lateral	A<alavanca_lateral>deve<permitir acesso>mais que<50><mm>	7	5	Proposto	1.0
REQ6	I	Largura descanso de braço	O<descanso_de_braço>deve<sustentar><operador>maior que<50><mm>	7	3	Proposto	1.0
REQ7	I	Comprimento descanso de braço	O <descanso de braço>deve<suportar><braço_operador>mais que<250><mm>	7	3	Proposto	1.0
REQ8	I	Posição vertical SIP	O<SIP>deve<distanciar>do< piso_da_cabine>entre<300>e<420>mm	7	3	Proposto	1.0
REQ9	I	Distância encosto traseiro e SIP	O<encosto_traseiro>deve<distanciar>do<SIP>mais que<320><mm>	5	3	Proposto	1.0
REQ10	I	Distância encosto lombar e SIP	O<encosto_lombar>deve<distanciar>_do<SIP>mais que <320><mm>	5	3	Proposto	1.0
REQ11	I	Largura do assento inferior	O<assento_inferior>deve<suportar_operador>entre<450><mm>e<480><mm>	5	3	Proposto	1.0
REQ12	F	Inclinação encosto traseiro	O<encosto_traseiro>deve<permitir_inclinação>entre<7,5>e<4,5graus>	5	3	Proposto	1.0

Quadro 8 – Especificação-meta

REQ13	F	Inclinação encosto lombar	O<encosto_lombar>deve<permitir_inclinação>mais_que<26><graus>	5	3	Proposto	1.0
REQ14	F	Esforço acionamento alavanca controle	A<alavanca_de_controle>deve<permitir_acionamento>entre<10>e<100><N>	3	9	Proposto	1.0
REQ15	F	Esforço acionamento trava de ajuste	A<trava_de_ajuste>deve<permitir_acionamento>entre<1>e<20><N>	3	9	Proposto	1.0
REQ16	F	Dimensões manipulo de ajuste	O<manipulo_de_ajuste><ocupar_mão_operador>mais_que<200><mm>	3	5	Proposto	1.0
REQ17	F	Esforço travamento manipulo de ajuste	O<manipulo_de_ajuste>deve<permitir_travamento>entre<0,5>e<6,5><Nm>	3	9	Proposto	1.0
REQ18	F	Ajuste suspensão mecânica	A<suspensão_mecânica>deve<permitir_ajuste>maior_que<50><mm>	7	5	Proposto	1.0
REQ19	D	Carga mínima suspensão mecânica	A<suspensão_mecânica>deve<suportar_operador>entre<50>e<130><kg>	7	3	Proposto	1.0
REQ20	P	Carga mínima suspensão pneumática	A<suspensão_pneumática>deve<suportar_operador>mais_que<150><kg>	7	3	Proposto	1.0
REQ21	F	Inclinação encosto traseiro	O<enconsto_traseiro>deve<permitir_ajuste>entre<-5>e<+5><graus>	7	5	Proposto	1.0
REQ22	F	Avanço enconsto traseiro	O<encosto_traseiro>deve<permitir_avanços>menor_que<2,5><graus>	7	9	Proposto	1.0
REQ23	F	Espaço livre trilhos	Os<trilhos>devem<permitir_movimento>entre<-100>e<+100><mm>	7	5	Proposto	1.0
REQ24	F	Avanços nos trilhos	Os<trilhos>devem<permitir_avanços>menores_que<15><mm>	7	5	Proposto	1.0
REQ25	D	Inflamabilidade dos acentos	Os<encostos>deve<suportar_o_fogo>mais_que<200><mm/min>	1	9	Proposto	1.0
REQ26	D	Material das espumas	As<espumas>dos<encostos>não_deve<conter_CFC>	1	3	Proposto	1.0
REQ27	D	Carga mínima no banco	O<banco>deve<suportar_operador>mais_que<250><kg>	5	3	Proposto	1.0
REQ28	D	Resistência a intempéries	Os<encostos><deve_suportar><radiação_solar>	5	3	Proposto	1.0
REQ29	D	Nível de ruído	A<cabine><deve_absorver_ruído>menos_que<69><dB>	5	9	Proposto	1.0
REQ30	D	Força de acionamento pedais do freio	O<pedal_freio><deve_permitir_atuação>menos_que<230><Mpa>	9	9	Proposto	1.0
REQ31	D	Força de acionamento pedais do freio pedal da embreagem	O<pedal_embreagem><deve_permitir_atuação>menos_que<180><Mpa>	9	9	Proposto	1.0
REQ32	D	Força de acionamento alavanca da marcha	A<alavanca_de_marcha>deve<permitir_acionamento>menor_que<40><N>	9	5	Proposto	1.0
REQ33	F	Flexibilidade descanso de braço	O<descanso_de_braço>deve<permitir_amortecimento>entre<45>e<55><ShoreA>	9	3	Proposto	1.0
REQ34	I	Altura do banco	O<CBO><deve><suportar_costas_do_operador>entre<734>e<744><mm>	7	3	Proposto	1.0
REQ35	D	Conforto térmico	A<cabine>deve<manter_temperatura>entre<22>e<28><C°>	7	5	Proposto	1.0
REQ36	D	Nível de vibração	O<assento_inferior><deve><inibir_vibrações>mais_que<15><m-1,75>	3	7	Proposto	1.0
REQ37	D	Acesso pedal dir. freio	O<pedal_dir_freio><deve><permitir_aceeso>menos_que<380><mm>	5	7	Proposto	1.0
REQ38	D	Acesso pedal esq. freio	O<pedal_esq_freio><deve><permitir_aceeso>mais_que<75><mm>	5	7	Proposto	1.0
REQ39	D	Acesso pedal embreagem	O<pedal_embreagem><deve><permitir_aceeso>entre<235>e<300><mm>	5	7	Proposto	1.0

Quadro 8 (Cont.) – Especificação-meta

4.4.6 CASOS DE USO

Na Figura 46, observa-se um UC criado para o uso da cabine pelo operador. O operador realiza 10 ações principais (e.g. sentar no banco, ajustar altura do banco).

	Acessibilidade e folga com componentes de interface	Altura do banco	Largura do banco	Altura do encosto	Inclinação do encosto	Altura do encosto lombar	Força atuação manivelas	Força atuação alavanca	Ajuste da altura do banco	Ajuste dianteiro	Ajuste Traseiro	Resistencia a esforços mecânico e vibração	Imflamabilidade dos materiais	Aparência da superfície do assento do banco	Alcance do pé do operador	Alcance da mão do operador	Resistencia ao atrito pedal	Altura painel de controle	esforço pedais freio	segurança mangueiras e tubos	área livre inspeção	Esforço acionamento alavancas	Ruído interior cabine	Facilidade Ajuste do banco	Temperatura interna	Reciclabilidade	Vibração aplicada ao operador
Acessibilidade e folga com componentes de interface	x	x		x					x						x	x		x			x		x				
Altura do banco			x	x	x				x	x	x							x									
Largura do banco																				x			x			x	
Altura do encosto					x	x			x														x				
Inclinação do encosto						x			x														x				
Altura do encosto lombar									x														x				
Força atuação manivelas							x											x				x					
Força atuação alavanca																		x				x					
Ajuste da altura do banco										x	x							x				x					
Ajuste dianteiro											x												x				
Ajuste Traseiro																							x				
Resistencia a esforços mecânico e vibração																	x										
Imflamabilidade dos materiais																											
Aparência da superfície do assento do banco																											
Alcance do pé do operador															x			x		x			x				
Alcance da mão do operador																x				x		x					
Resistencia ao atrito pedal																		x									
Altura painel de controle																			x								
esforço pedais freio																						x					
segurança mangueiras e tubos																											
área livre inspeção																							x				
Esforço acionamento alavancas																							x				
Ruído interior cabine																										x	
Facilidade Ajuste do banco																											
Temperatura interna																											
Reciclabilidade																											
Vibração aplicada ao operador																											

Figura 45 – Telhado HoQ

ID: UC1 NAME: Operador na cabine Ator: Operador	
Cenário:	
1. Abrir a porta lateral;	7. Acionar pedal do freio de serviço;
2. Fechar porta lateral;	8. Acionar freio estacionamento
3. Sentar no banco;	9. Pisar nos pedais;
4. Ajustar altura do banco;	10. Visualizar ao redor do trator
5. Ajustar banco longitudinalmente;	
6. Acessar painel de controle;	

Figura 46 – Quadro de Caso e uso

Através do UC, das HoQs, da estrutura funcional e da especificação-meta, concluem-se as informações de entrada do metamodelo, conforme ilustrado na Figura 47.

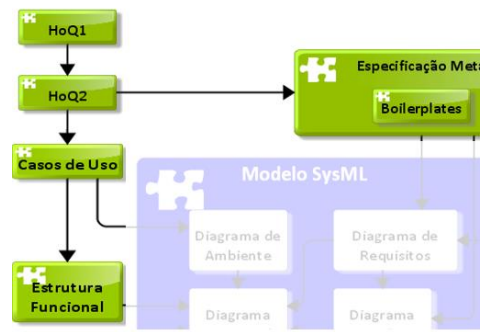


Figura 47 – Informações de entrada para o modelo SysML

4.4.7 ORGANIZAÇÃO DO MODELO SYSML

Para organizar o modelo, foram utilizados diagramas PD, criando categorias para os diagramas. Na Figura 48, observa-se que a organização do modelo é apresentada através de pastas dentro do software *Visual Paradigm*.

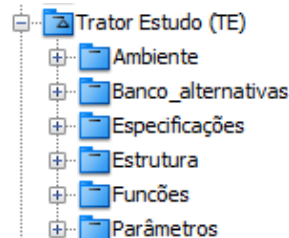


Figura 48 – Browser Visual Paradigm

4.4.8 MODELAGEM DO AMBIENTE

A modelagem do ambiente da Cabine compreende a primeira parte do modelo SysML, conforme ilustrado na Figura 49.

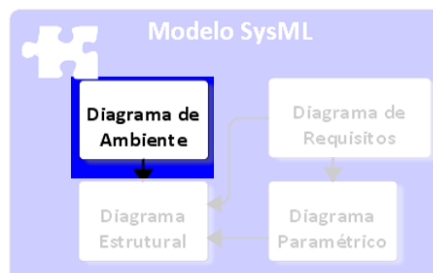


Figura 49 – Primeira parte do modelo SysML proposto

A Figura 50 mostra o UCD para a Cabine, baseado do UC da Figura 46. Cada elipse representa um objetivo a ser alcançado na Cabine (e.g. acionar pedal do freio). As linhas indicam a associação entre atores que interagem com a cabine (i.e. operador, sistema de frenagem, sistema hidráulico) e os objetivos. Através deste

UCD, tem-se uma visão, num alto grau de abstração, sobre os cenários de uso da cabine pelo operador.

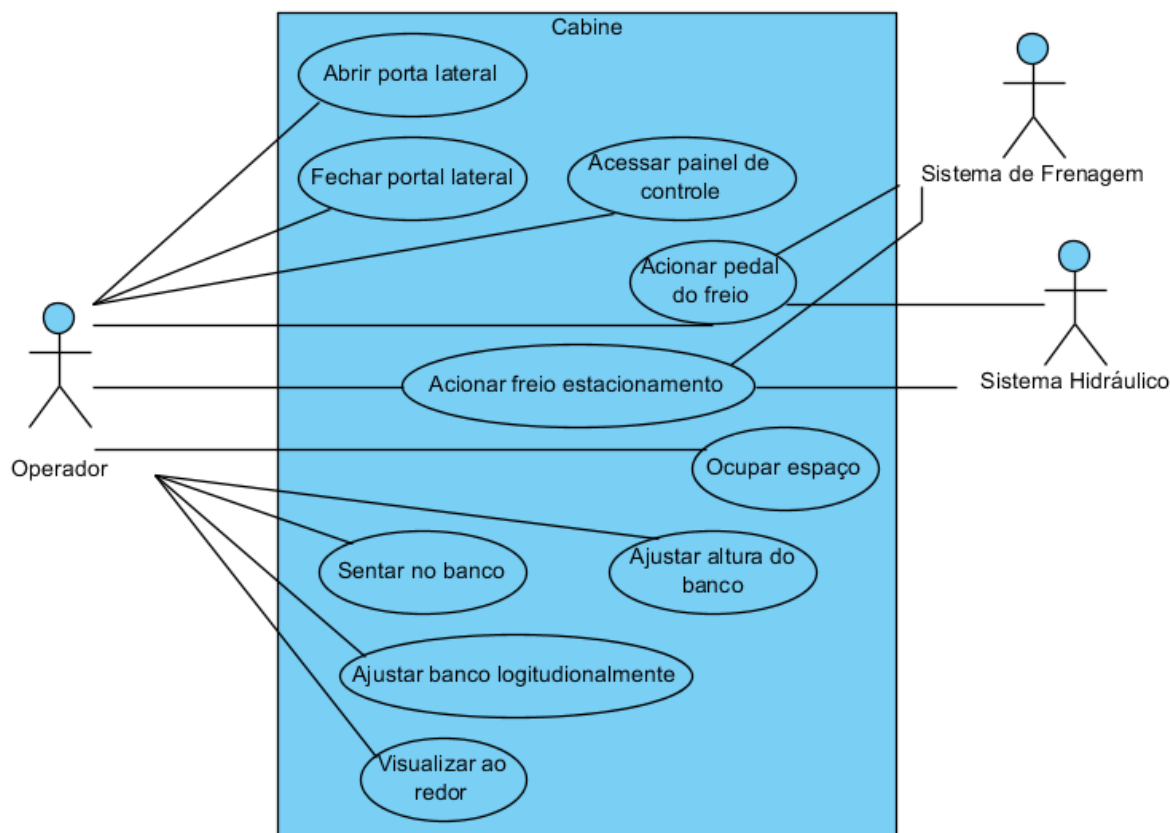


Figura 50 – Diagrama UCD para cenário de estudo

4.4.9 MODELAGEM FUNCIONAL

Através das informações de especificações-meta foram desdobradas as funções do produto. A Figura 51 apresenta um diagrama BDD com o desdobramento da função global do produto. As setas escuras indicam a direção do desdobramento (e.g. permitir ajuste é uma subfunção de proteger operador), representando a estrutura hierárquica. A seta com linha tracejada representa um relacionamento entre funções, sem hierarquia (e.g. proteger operador relaciona-se com permitir controle).

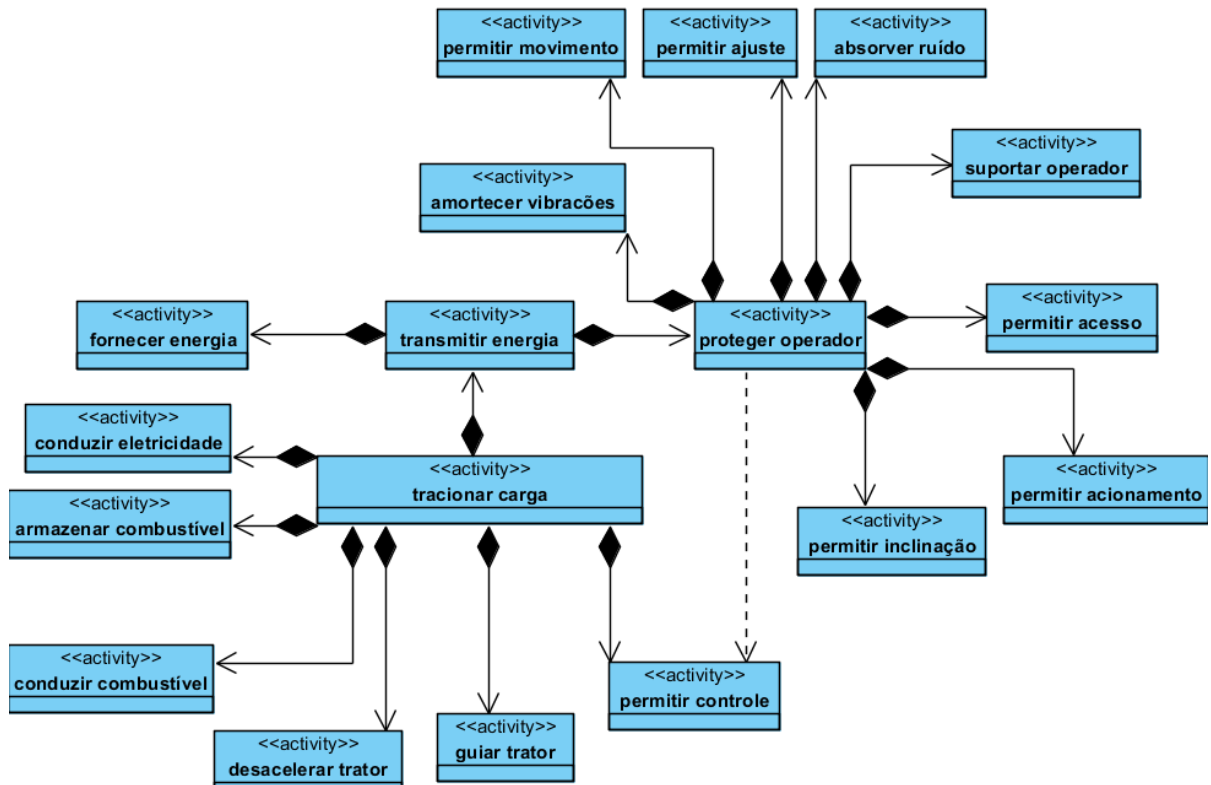


Figura 51 – Diagrama BDD estrutura funcional

4.4.10 MODELAGEM DOS REQUISITOS

A modelagem de requisitos caracteriza a segunda parte do modelo SysML (Diagrama de Requisitos), conforme ilustrado na Figura 52.

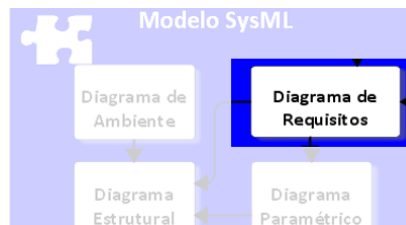


Figura 52 – Segunda parte do modelo SysML

Na Figura 53, observa-se a representação de um dos requisitos no modelo SysML. As informações destacadas em azul são as informações originadas da especificação-meta. Além disso, percebe-se que, através do SysML, foi possível especificar o método de verificação do requisito (i.e. análise no software Jack, utilizado como suporte ao software CREO, em análises ergonômicas).

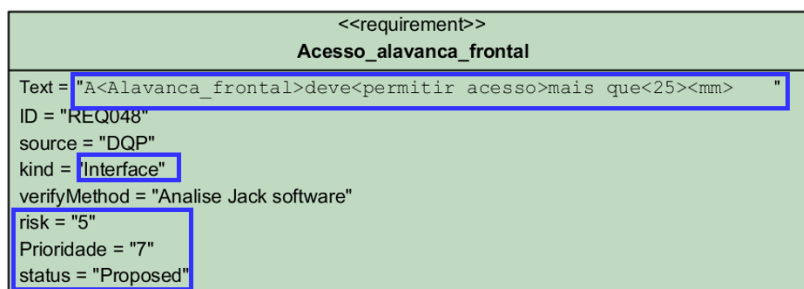


Figura 53 – Representação de requisitos

O requisito da Figura 53 foi derivado de características de projeto que, por sua vez, são oriundas de necessidades de clientes. No modelo SysML, tais informações são todas consideradas requisitos, com diferentes níveis de abstração e relacionadas através de alocações. Na Figura 54, a necessidade facilidade de operação decompõe-se nos requisitos acesso comando controle, visibilidade do operador, ajuste nos bancos e alcance do operador. Este último deriva de vários requisitos, como o acesso alavanca frontal e acesso movimentação superior. As decomposições, representadas por losangos, têm o objetivo de hierarquizar os requisitos (e.g. facilidade de operação é um elemento-pai de alcance do operador). Já a derivação tem o objetivo de evoluir o requisito para um nível de abstração maior, com um maior detalhamento (e.g. alcance do operador somente será satisfeito se o acesso alavanca frontal, acesso movimentação superior e demais requisitos derivados sejam satisfeitos).

Componentes e funções também foram alocados no modelo por meio do diagrama de requisitos. Percebe-se, na Figura 55, o relacionamento do TE com o requisito facilidade de operação, e da Cabine com vários requisitos, através da relação <<trace>>. O requisito acesso alavanca frontal deve ser satisfeito pelo componente alavanca frontal, sendo utilizada, para isso, uma alocação *satisfy*. De forma semelhante, a função permitir acesso, representada por um bloco *activity*, é dependente do requisito acesso alavanca frontal. Além disso, observa-se que o requisito visibilidade do operador é afetado pelos ajustes dos bancos, através de uma relação de dependência, embora estejam no mesmo nível hierárquico.

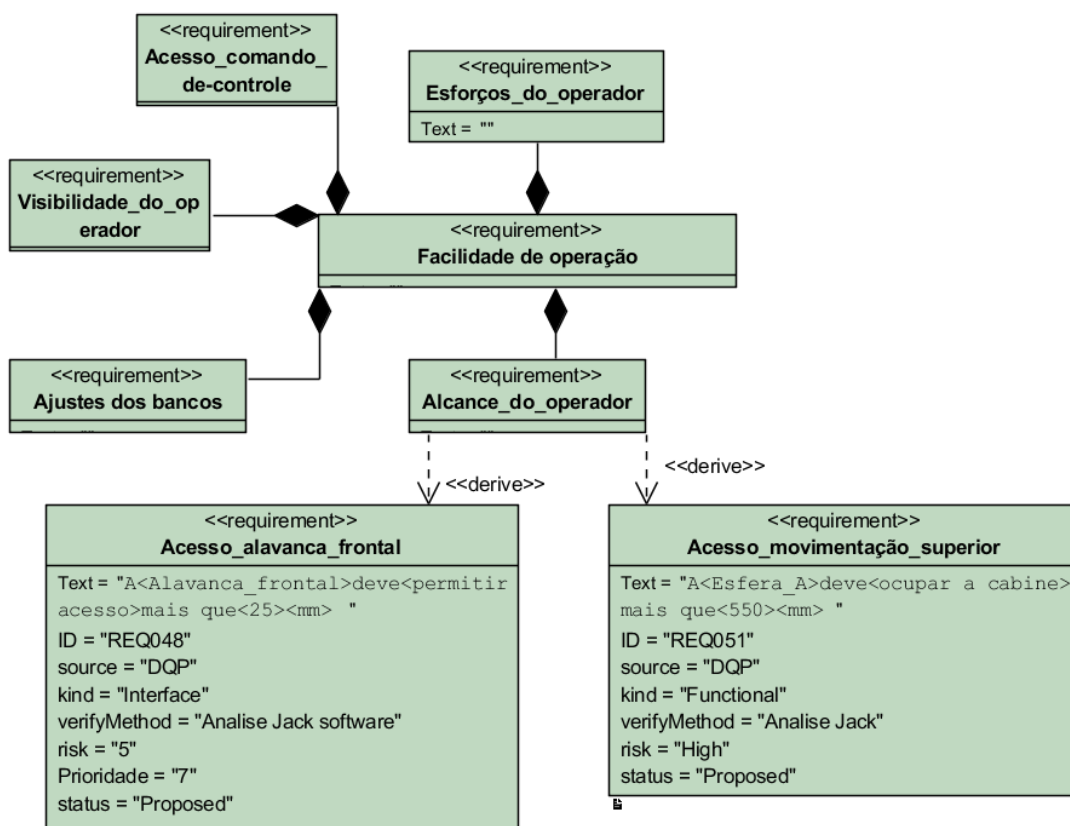


Figura 54 – Desdobramento de requisitos

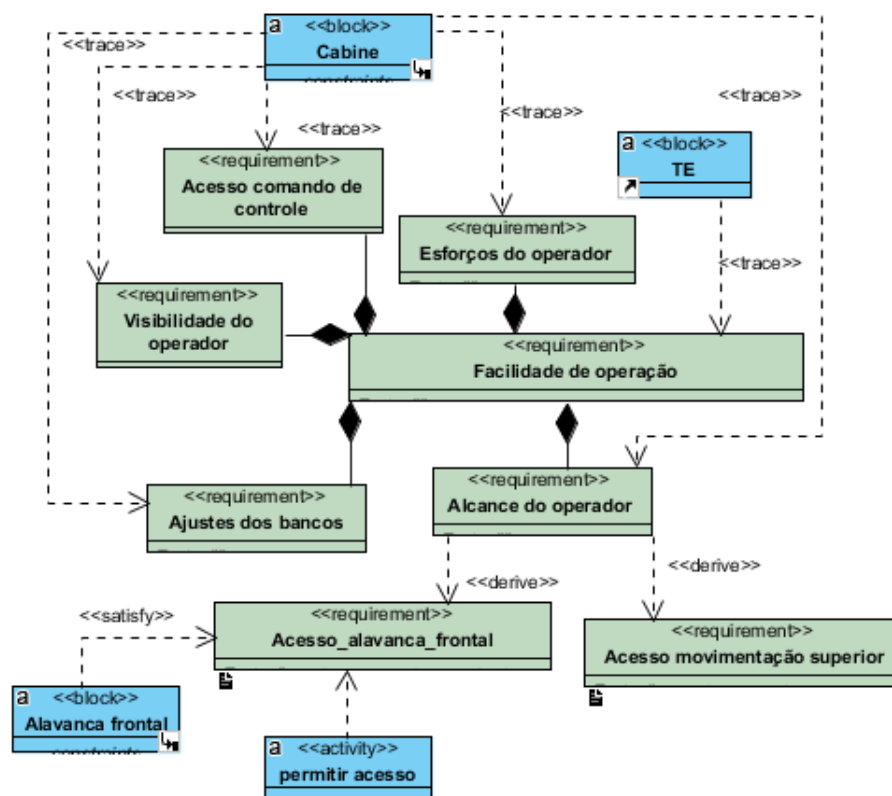


Figura 55 – Alocações de funções

4.4.11 MODELAGEM ESTRUTURAL

Através da BOM disponibilizada no Enovia, foi possível modelar a estrutura hierárquica do TE. Essa etapa inicia a terceira parte do modelo SysML, conforme ilustrado na Figura 56.

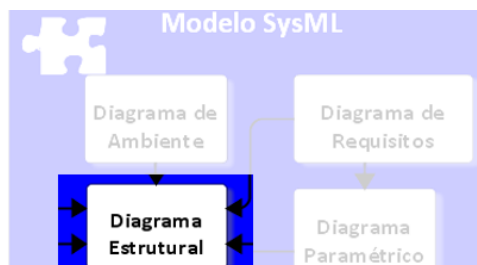


Figura 56 – Terceira parte do modelo SysML

Na Figura 57, observa-se que, no primeiro nível hierárquico, tem-se o TE, desdobrado em seu subsistema Cabine que, por sua vez, desdobra-se em componentes e subsistemas. Semelhante aos desdobramentos dos requisitos, a estrutura do produto utiliza as alocações. As setas tracejadas na Figura 57 são relações de dependência entre componentes do mesmo sistema, ou sistemas diferentes. Uma delas relaciona os pedais direito e esquerdo do freio de trabalho, os quais podem trabalhar sincronizados. As demais relacionam os pedais do freio com o sistema de frenagem, pois participam funcionalmente deste sistema, permitindo sua atuação.

4.4.12 MODELAGEM DE RESTRIÇÕES

Na execução do PDP, além das restrições identificadas na especificação-meta, surgem, constantemente, inúmeras restrições no produto, as quais geram derivações dos requisitos e necessitam incorporar o modelo. Nessa seção estão descritas as principais restrições atribuídas ao modelo SysML do produto. As restrições têm o objetivo de estabelecer regras ao sistema, sendo relacionadas aos requisitos através de diagramas paramétricos, que, por sua vez, possibilitam a validação de tais requisitos.

A Figura 58 ilustra uma importante restrição de forma na estrutura da Cabine do trator, ligada aos requisitos de segurança do operador, com base na regra número 4 da norma OECD (*Testing of the strength of protective structures for agricultural and*

forestry tractors - static test) (CODES, 2009). A tabela ao lado da representação da cabine apresenta distâncias mínimas a serem obedecidas.

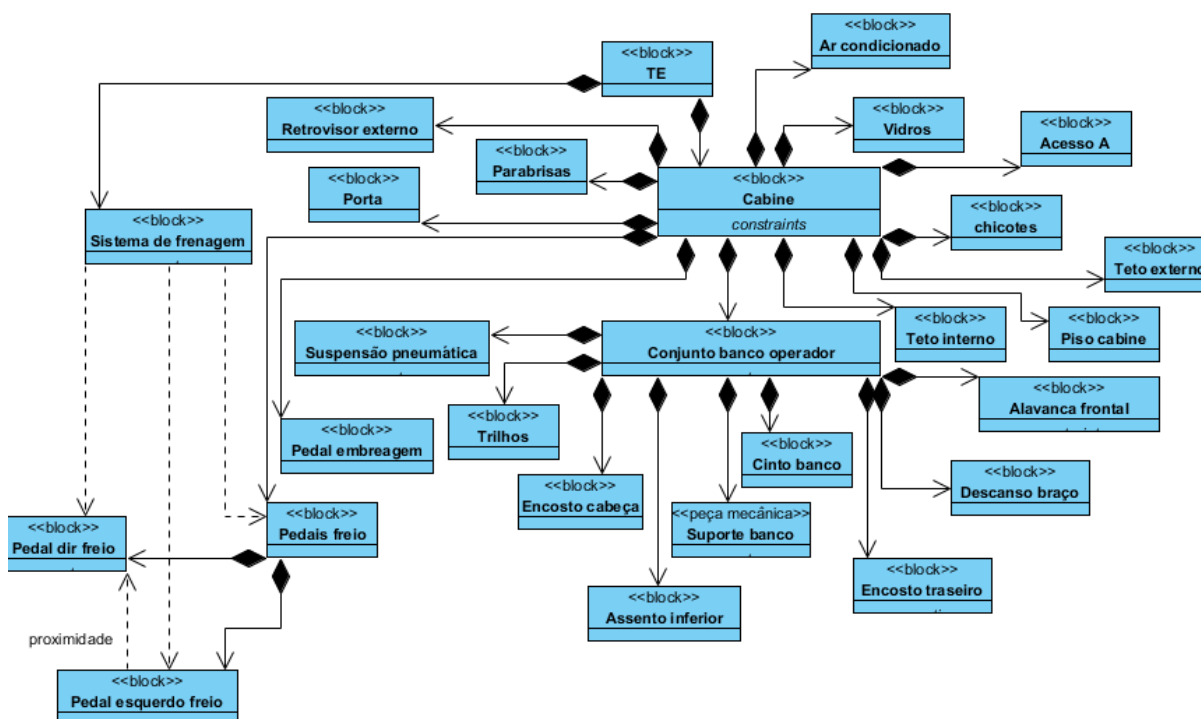
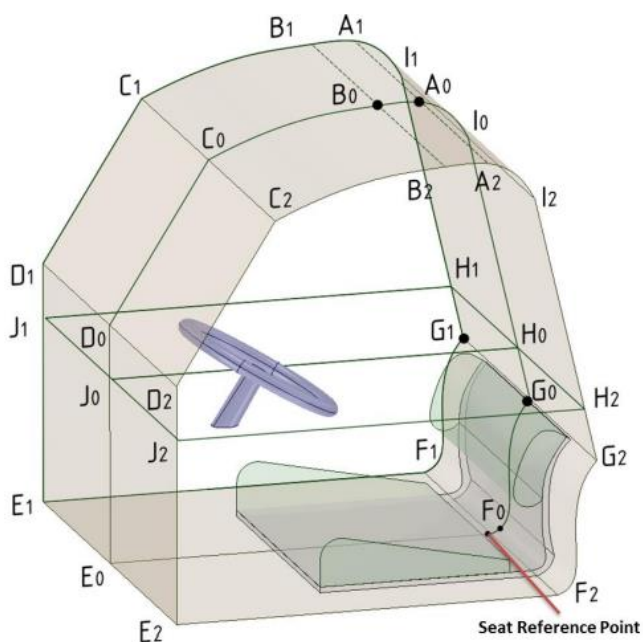


Figura 57 – Desdobramento hierárquico do TE



Dimension	mm	Comment
A1 A0	100	Minimum
B1 B0	100	Minimum
F1 F0	250	Minimum
F2 F0	250	Minimum
G1 G0	250	Minimum
G2 G0	250	Minimum
H1 H0	250	Minimum
H2 H0	250	Minimum
J1 J0	250	Minimum
J2 J0	250	Minimum
E1 E0	250	Minimum
E2 E0	250	Minimum
D0 E0	300	Minimum
J0 E0	300	Minimum
A1 A2	500	Minimum
B1 B2	500	Minimum
C1 C2	500	Minimum
D1 D2	500	Minimum
I1 I2	500	Minimum
F0 G0	-	It depends by tractor
I0 G0	-	It depends by tractor
C0 D	-	It depends by tractor
E0 F0	-	It depends by tractor

Figura 58 – Restrição de forma Cabine
Fonte: Adaptado de Di Gironimo et al. (2012)

Requisitos geométricos e de forma estão diretamente relacionados ao DMU do produto, formado por modelos 3D. Neste sentido, utilizou-se a estrutura proposta por Fan et al. (2015) para especificar um modelo 3D, representando-o na linguagem SysML. Conforme mostra a Figura 59, um modelo 3D é representado por um componente (e.g. assento traseiro) e por restrições (e.g. distância, inclinação). O componente é formado por uma forma e elementos geométricos que o orientam. Neste trabalho, a representação do modelo 3D – através da linguagem SysML – tem o objetivo de especificar preliminarmente (i.e. forma e posição) os modelos 3D, orientando o detalhamento deles pelos projetistas. Neste sentido, optou-se por utilizar volumes primários (i.e. volumes com formatos simples que sirvam como referência para limites dimensionais). A geometria especificada no modelo SysML deve ser mapeada no padrão STEP, gerando um modelo 3D preliminar.

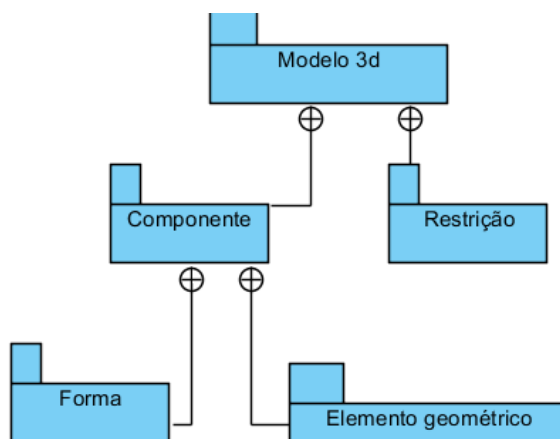


Figura 59 – Diagrama *Packaging* para modelo 3D

Com o objetivo de especificar volumes críticos na cabine, foram inseridas no modelo as principais restrições de espaço da cabine, levando em consideração as especificações-meta. Como mostra a Figura 60, cada bloco representa uma forma (e.g. Cilindro, Paralelepípedo, Esfera), sendo que o bloco OECD representa os pontos de controle da estrutura da cabine, no qual cada distância crítica é tratada como uma propriedade do bloco, utilizando a unidade milímetros.

Assim como Fan et al. (2015), foram utilizados elementos geométricos básicos como ponto, linha e plano, a fim de possibilitar a interpretação das formas no modelo SysML. No diagrama BDD da Figura 61, o bloco Linha é representado por um vetor de direção “dir”, o Ponto é definido por um sistema de coordenadas (CS), e o Plano por um vetor normal.



Figura 60 – Diagrama BDD para restrições de forma

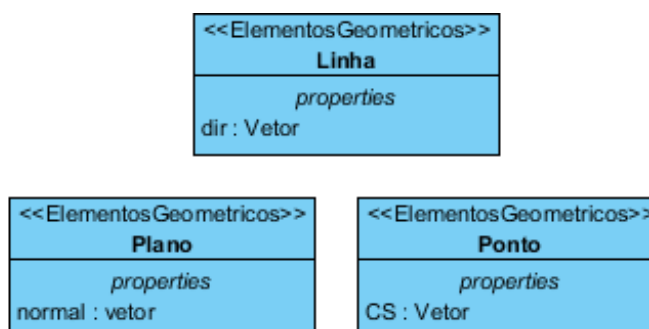


Figura 61 – Diagrama BDD para elementos geométricos

Além das formas preliminares, torna-se necessária a modelagem de restrições que representem a interface entre tais formas. Para isso, foram modeladas, no diagrama da Figura 62, restrições de direção e posição. A restrição Ângulo linha representa, através do campo *constraints*, uma inclinação máxima de 82 graus e mínima de 18 graus, que corresponde aos limites para a inclinação do encosto traseiro do CBO. O ponto e plano fixo são restrições para a especificação de pontos e planos críticos ou de referência (e.g. solo, piso da cabine, entre outros). Já a restrição ponto coincidente e direção do plano representam, respectivamente, restrições de contato e distância entre planos.

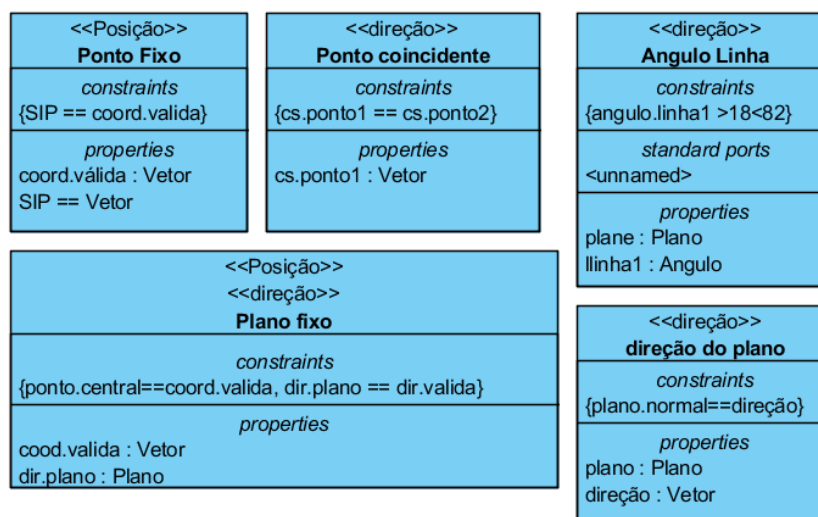


Figura 62 – Diagrama BDD para restrições geométricas

As restrições da Figura 62 têm o objetivo de relacionar geometricamente os componentes do produto (i.e. especificar geometria preliminar na linguagem SysML), auxiliando a geração de modelos CAD preliminares. De forma semelhante, restrições de manufatura foram representadas no modelo. Para ilustrar este cenário, foram modeladas restrições para a fabricação da chapa metálica estampada (Figura 63), que forma o suporte do banco. Essas restrições são representadas pelo diagrama da Figura 64. O diagrama representa regras que auxiliam o desenvolvimento da peça (e.g. raio de dobra deve ser 3/8 da espessura da chapa).

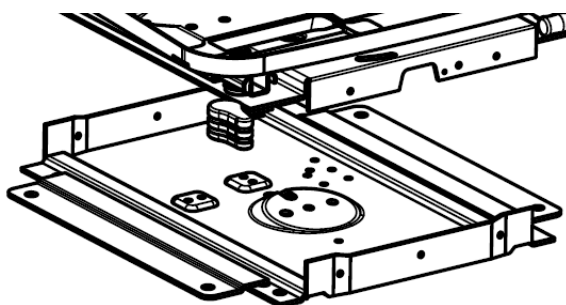


Figura 63 – Suporte metálico do banco
 Fonte: Documentos coletados na empresa

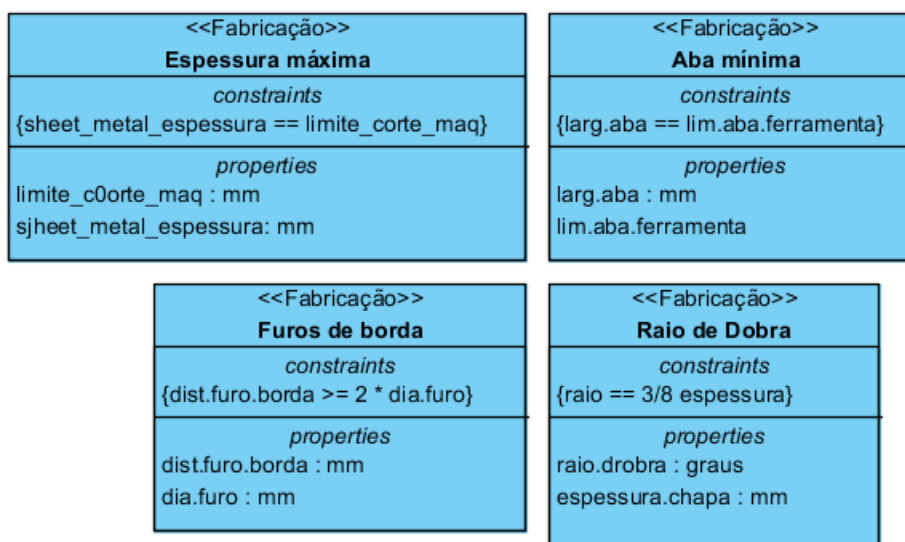


Figura 64 – Diagrama BDD para restrições de manufatura

Nas especificações-meta, existem requisitos funcionais e de desempenho relacionados a esforços do operador no manuseio de pedais e alavancas do trator, bem como a carga mínima que a suspensão pneumática deve suportar para permitir seu funcionamento. Neste sentido, foram modeladas restrições de esforços (i.e. Força e Tensão) apresentadas na Figura 65. Com as restrições modeladas, possibilita-se mapear as relações entre os componentes do sistema da cabine.

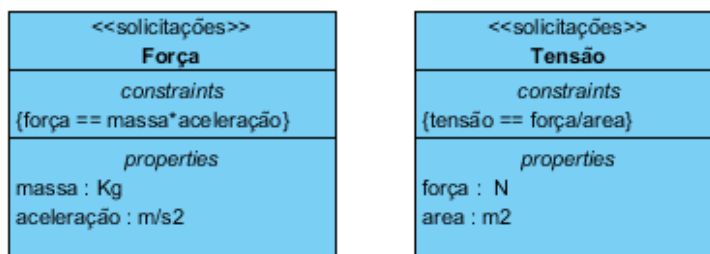


Figura 65 – Diagrama BDD para restrições de esforços

4.4.13 MODELAGEM INTERNA DO SISTEMA

As restrições modeladas na seção anterior são alocadas entre os componentes do sistema através de diagramas IBDs. As restrições geométricas foram utilizadas para especificar o posicionamento e distâncias entre os elementos da Cabine. No diagrama da Figura 66, observa-se uma restrição de ponto fixo ligada ao assento inferior do CBO. Tal restrição representa o SIP (*Seat Index Point*), o qual consiste em um ponto de referência utilizado para posicionar os componentes da cabine (e.g. Acesso A e B, alavanca freio estacionamento, pedais do freio). Os textos próximos às portas dos blocos representam os planos ligados às relações (e.g.

inferior, traseiro, central). Os blocos Acesso A, Acesso B e Projeção visível representam, respectivamente, volumes para acesso e visibilidade do operador.

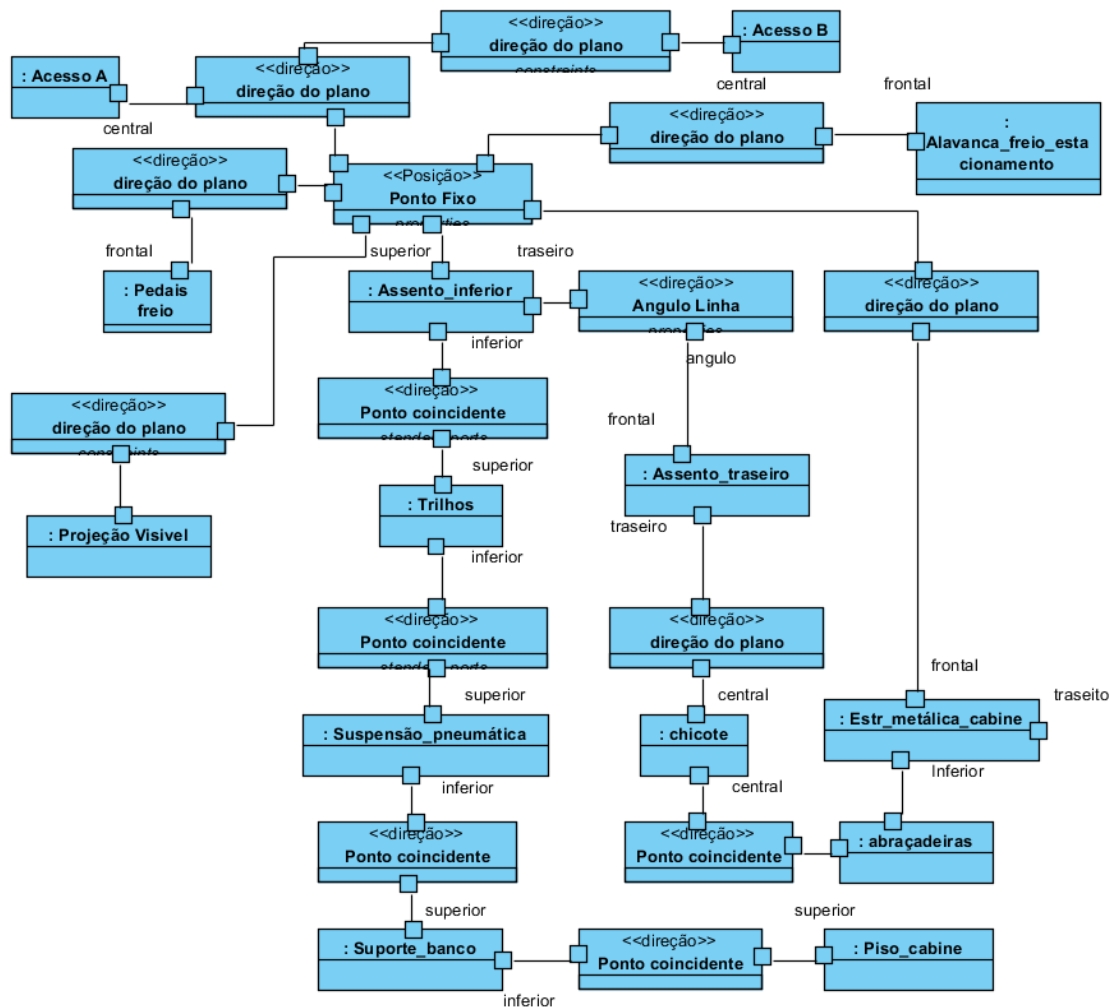


Figura 66 – Diagrama IBD para Cabine

Outros diagramas IBDs foram criados para especificar relações não geométricas no sistema. No diagrama da Figura 67, há uma porta (i.e. seta para direita) no bloco do assento inferior, a qual representa a entrada de uma força. O bloco de restrição <<solicitações>> propaga o parâmetro de força aplicada no assento à suspensão do banco.



Figura 67 – Diagrama IBD para CBO

O diagrama da Figura 68 mostra um diagrama IBD representando a estrutura interna do suporte do CBO. A peça é dividida em três partes (base, aba esquerda e

direita), as quais formam o suporte através de uma operação de dobra, representada pela restrição Raio de dobra.

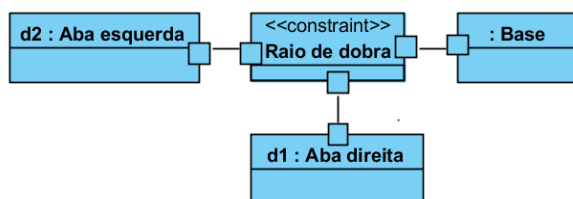


Figura 68 – Diagrama IBD para suporte do banco

Alguns componentes presentes na cabine interagem com outros sistemas do TE. Tais relações também são representadas através de IBDs. A Figura 69 mostra um diagrama representando os relacionamentos entre os pedais do freio e o Sistema de Frenagem do TE. Percebe-se, na imagem, que os pedais recebem uma solicitação de força F , a qual resulta em um sinal para a tensão no cilindro hidráulico do freio, integrante de outro subsistema do TE. Além disso, o bloco inferior indica que os pedais têm uma relação de inclinação com o piso da cabine.

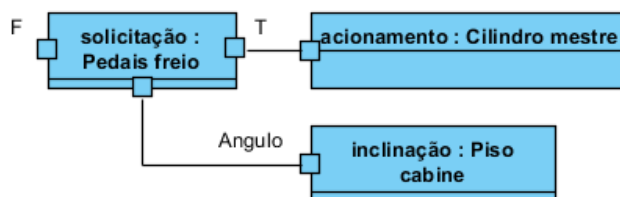


Figura 69 – Diagrama IBD relação pedal do freio e Sistema de Frenagem

Os IBDs criados até aqui apresentam restrições presentes em um sistema ou subsistema. Porém, conforme o produto é detalhado ao longo do PDP, um maior detalhamento de restrições é necessário. A Figura 70 apresenta os componentes relacionados aos pedais do freio do TE. O conjunto pedal é formado por dois pedais (direito e esquerdo) que, por sua vez, são formados por uma base, superfície antidesslizante, suporte e mola. O conjunto é fixado na estrutura metálica da cabine. Os pedais relacionam-se com o sistema de frenagem, conectados aos cilindros através do suporte. O IBD representando tais relações é mostrado na Figura 71. A superfície do pedal sofre esforços realizados pelo operador conforme ISO26322, os quais são representados por três forças F de entrada no bloco da superfície. A força F_{at} representa a força de atrito aplicada ao pé do operador. Os esforços aplicados à base são transmitidos à mola (i.e. Tensão T) e, conseqüentemente, à estrutura metálica, por meio do momento no suporte.

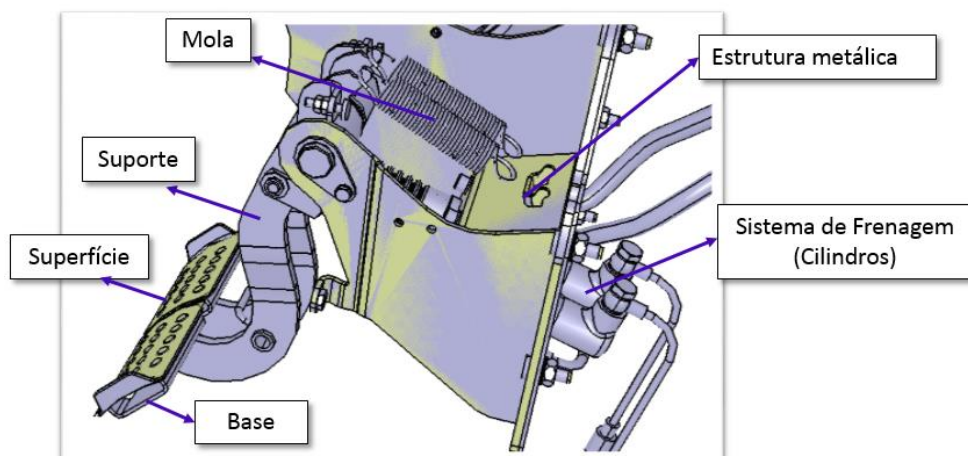


Figura 70 – Pedal do freio

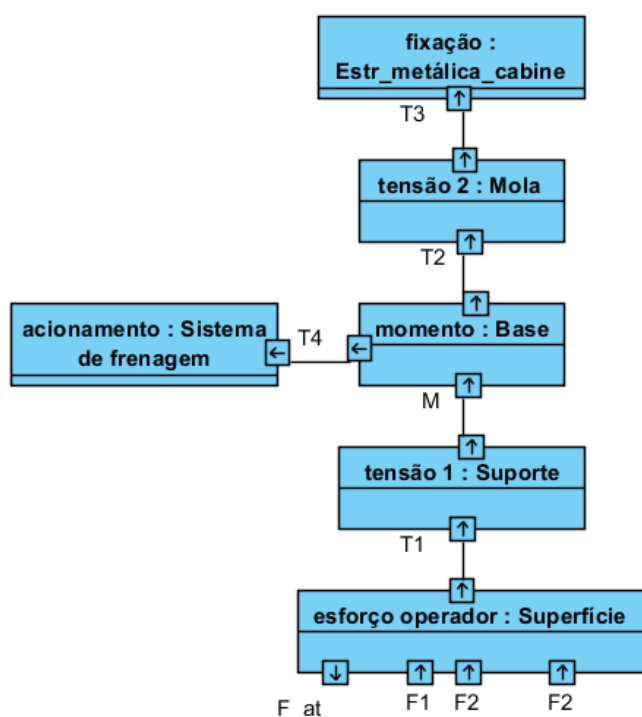


Figura 71 – Diagrama IBD pedal direito do freio

No momento em que o subsistema representado pelo conjunto do pedal é detalhado, o mesmo faz com que novas restrições sejam inseridas no modelo, além de novos componentes na estrutura hierárquica do produto. Neste caso, componentes não presentes inicialmente passam a contemplar o modelo. Os relacionamentos criados são visualizados no bloco que representa o pedal, no campo `parts`, apresentado na Figura 72, e, também, na estrutura hierárquica da Figura 73.

Com as restrições e interações do sistema modeladas, finalizou-se a terceira parte do modelo (Figura 56).

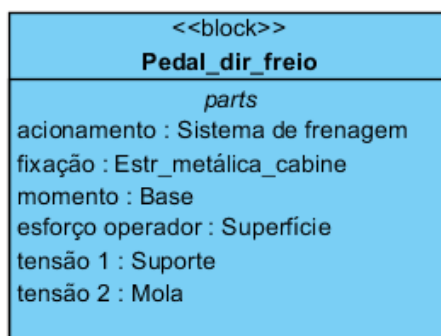


Figura 72 – Bloco atualizado pedal direito do freio

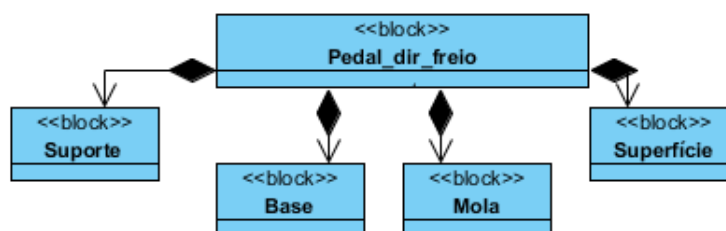


Figura 73 – Diagrama BDD de composição pedal direito do freio

4.4.14 MODELAGEM PARAMÉTRICA

Esta etapa demonstra a última parte do modelo SysML (Figura 74). As restrições alocadas no sistema necessitam de parâmetros (e.g. valores, regras, equações) que especifiquem a interação delas com o sistema, e possibilitem a análise e avaliação dos requisitos. Neste sentido, foram criados diagramas paramétricos.

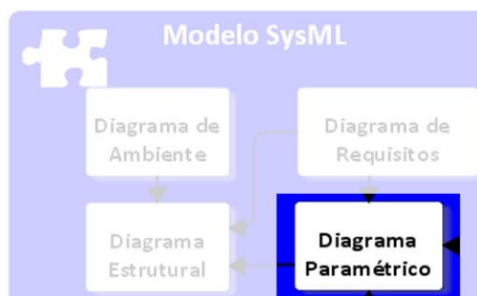


Figura 74 – Quarta parte do modelo SysML

No diagrama da Figura 75, a restrição Força possui uma equação (i.e. Lei de Newton) e massa e aceleração como parâmetros de entrada. A Tensão, por sua vez, possui como parâmetros de entrada um valor para área e a força F (i.e. Saída do bloco da restrição força). Através deste diagrama, é possível analisar requisitos ligados a esforços máximos presentes na especificação-meta, como as alavancas do banco e pedais de freio. Na Figura 76, observa-se a relação entre os requisitos, o componente alavanca e as restrições inseridas no modelo.

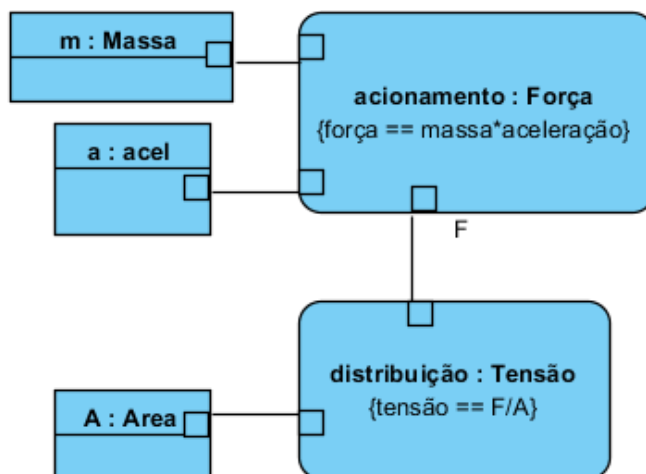


Figura 75 – Diagrama BDD decomposição pedal direito do freio

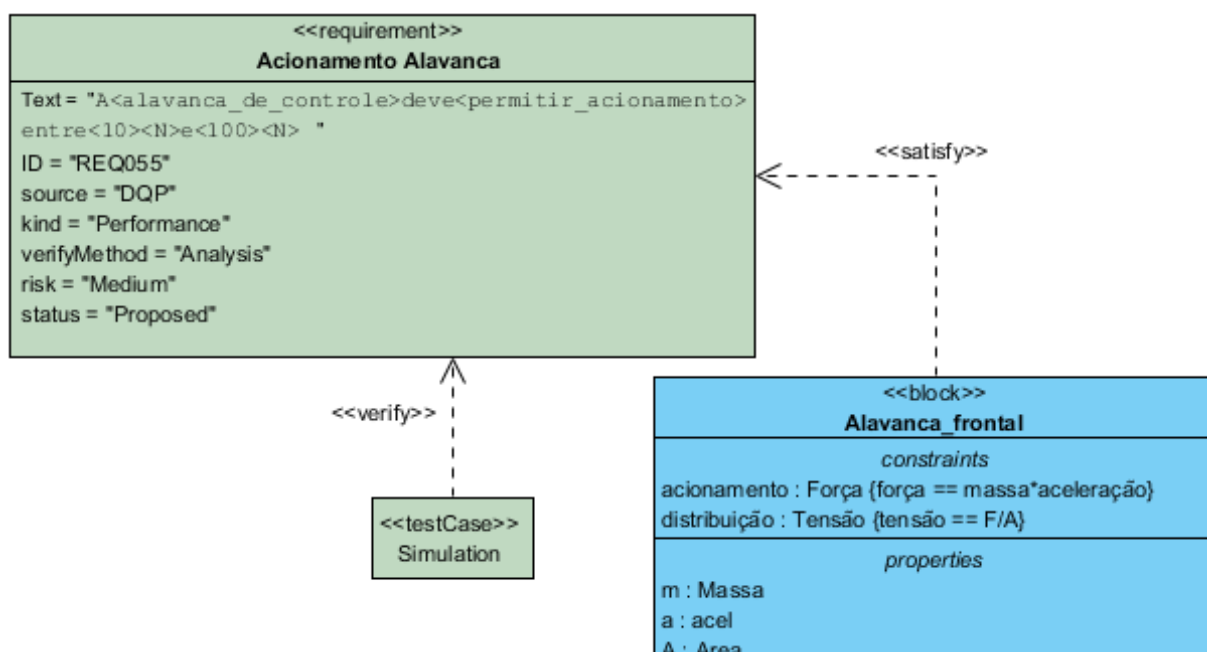


Figura 76 – Diagrama de requisitos alavanca

Um diagrama paramétrico (Figura 77) foi criado para as restrições de forma OEDC ligada à estrutura da cabine. Os blocos menores representam os valores de distâncias. O bloco maior representa a restrição de forma especificada na norma OEDC, com distâncias mínimas entre os pontos (e.g. a distância mínima entre A1 e A0 é 100mm). Tal diagrama tem o objetivo de verificar o requisito de atendimento à norma OEDC.

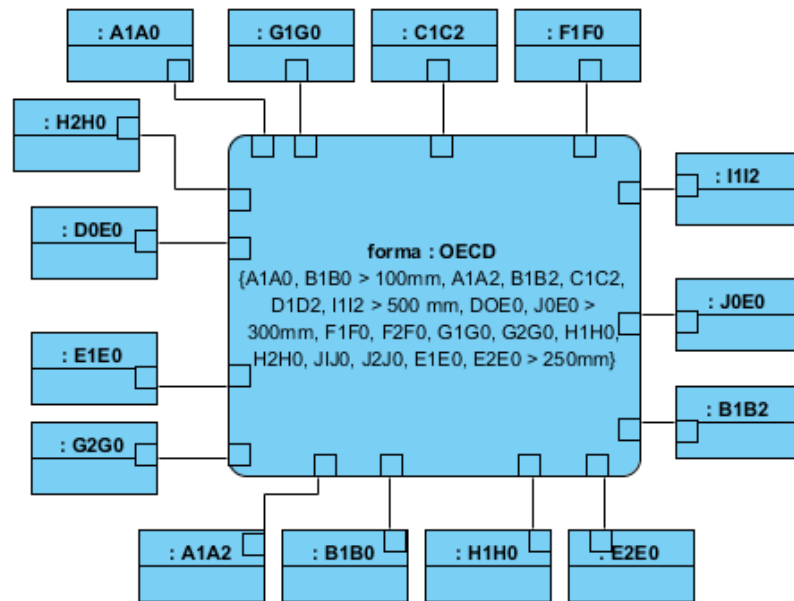


Figura 77 – Diagrama paramétrico para norma OECD

Na Figura 78, observa-se que a estrutura metálica deve satisfazer o requisito Norma OECD, respeitando as restrições alocadas. O bloco análise preliminar DMU especifica o método de verificação do requisito.

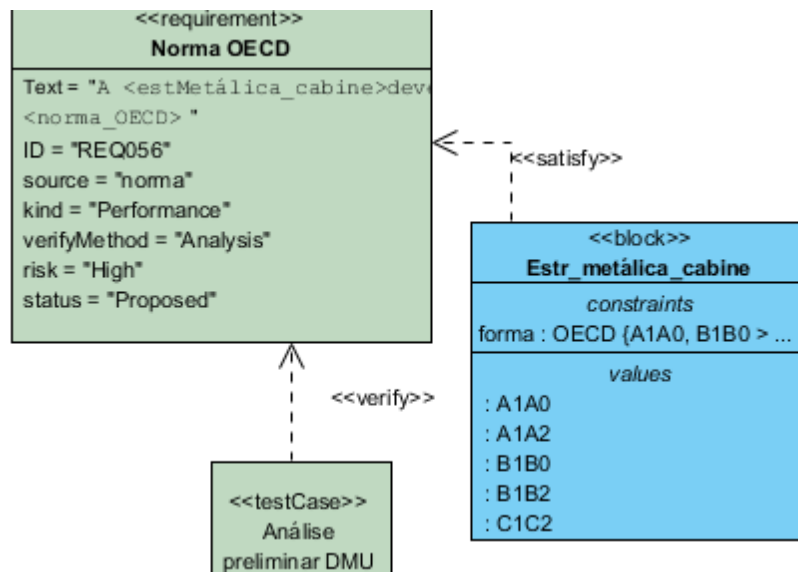


Figura 78 – Relacionamentos requisito norma OECD

De forma semelhante ao diagrama da Figura 78, foram criados diagramas para especificar as principais restrições de posição dentro da Cabine, conforme normas IS12343, NR17, NR12 e padrões internos da empresa. A Figura 79 apresenta estas restrições. A referência utilizada para posicionar os elementos é o SIP, conforme indicado. Para inserir as restrições no modelo, foram criadas novas restrições,

conforme mostra a Figura 80. Estas foram inseridas em novos diagramas paramétricos (Figura 81). As novas restrições são ligadas através de portas aos valores (i.e. parâmetros) de entrada.

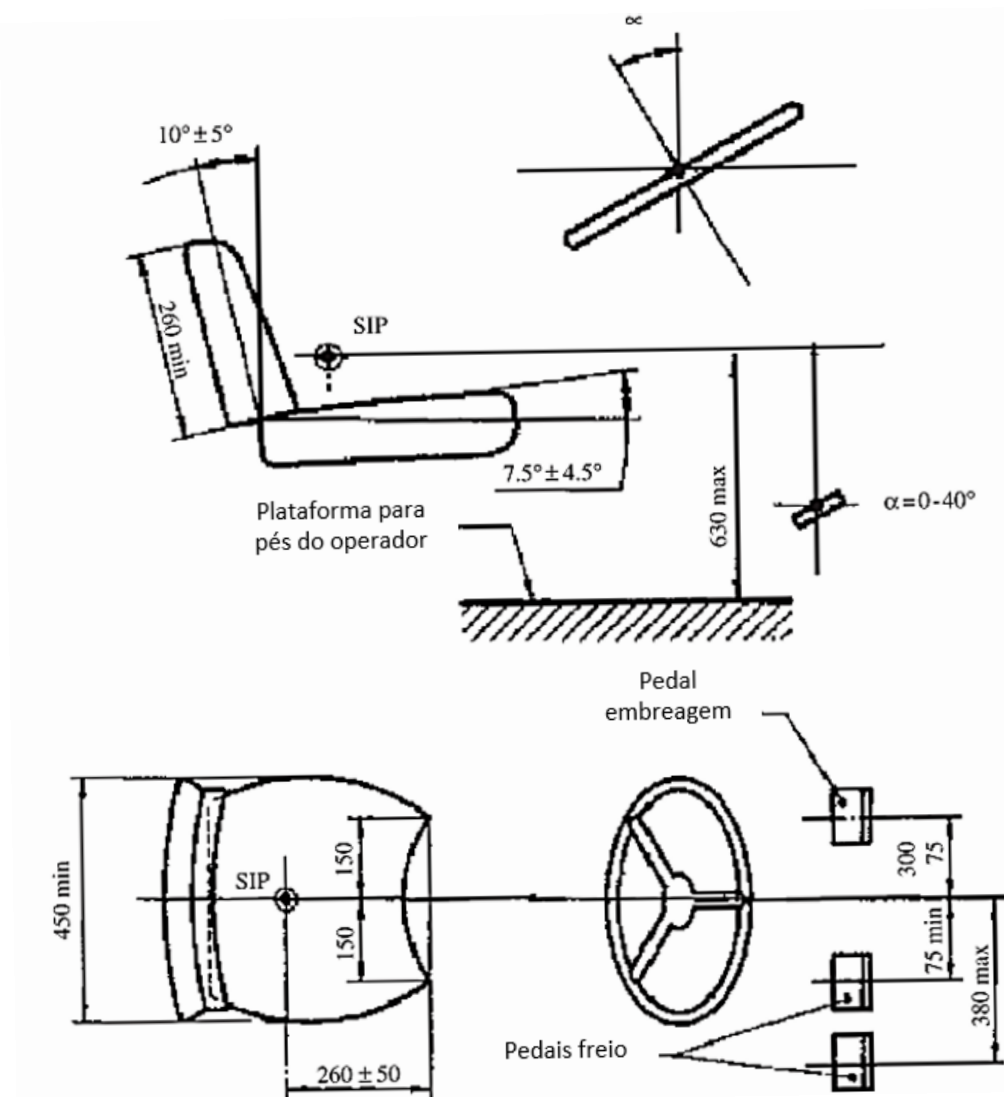


Figura 79 – Distâncias mínimas aplicadas à cabine
Fonte: Adaptado de Mehta et al. (2008)

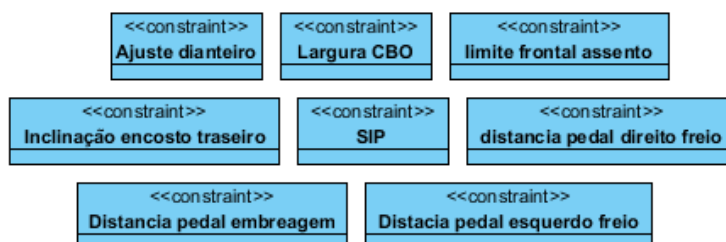


Figura 80 – Diagrama BDD para restrições de posicionamentos

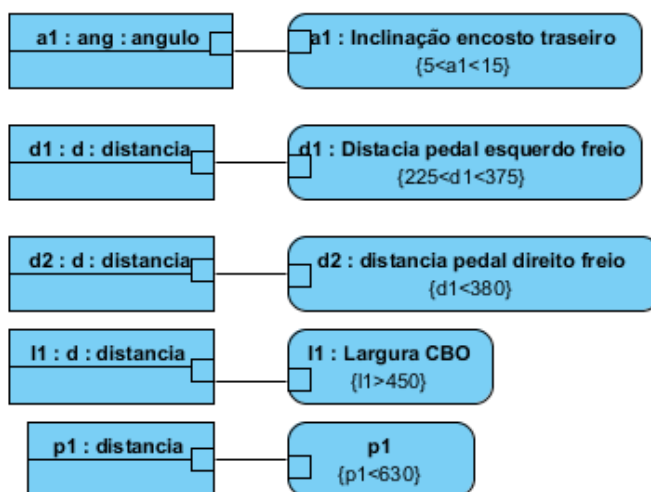


Figura 81 – Diagrama paramétrico de posicionamentos

As novas restrições criadas dão origem a novos requisitos, os quais são, então, relacionados ao sistema da cabine. Na Figura 82, observa-se tal relacionamento entre sistemas, componentes e funções. Os requisitos `Acesso pedal embreagem`, `Acesso pedal direito freio` e `Acesso pedal esquerdo freio` são dependentes. Tais requisitos devem ser satisfeitos, respectivamente, pelo `pedal direito freio`, `pedal esquerdo freio` e `pedal da embreagem`. O requisito `Inclinação encosto traseiro` é satisfeito pelo `Encosto Traseiro`, porém, se relaciona com `Piso da cabine`. As relações `<<trace>>` permitem o rastreamento das informações contidas no diagrama (e.g. a função `permitir acesso` pode ser rastreada através do requisito `Acesso pedal embreagem`).

Com os parâmetros e restrições alocadas ao modelo SysML, finalizou-se a quarta e última parte do modelo SysML.

4.4.15 RASTREABILIDADE DE INFORMAÇÕES

Após o desenvolvimento do modelo no *Visual Paradigm*, pode-se rastrear as informações através do comando *Navigate To*. A Figura 83 mostra uma busca pelos elementos ligados ao pedal direito do freio. Na coluna *relationship* está o tipo de relação encontrada e na *to* estão os elementos ligados (e.g. alocação da função `permitir acesso`, associação de hierarquia com a cabine, proximidade com pedal esquerdo, satisfaz o requisito `Acesso pedal dir freio`).

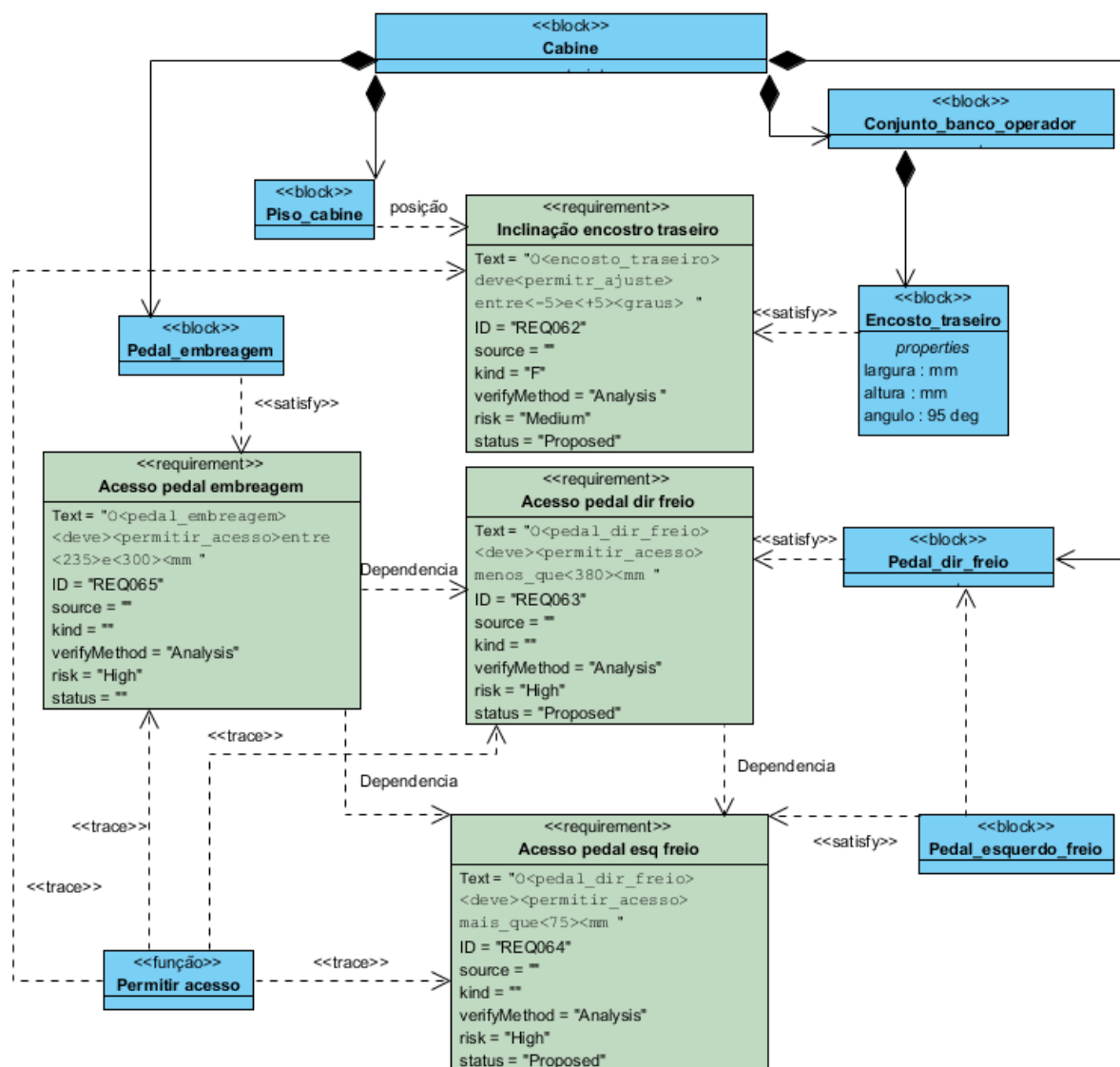


Figura 82 – Diagrama de requisitos Cabine

To	Relationship
Acesso pedal dir freio	Unnamed:Satisfy
Cabine	Unnamed:Association
Pedal_esquerdo_freio	proximidade:Dependency
Permitir acesso	alocação:Dependency

Figura 83 – Rastreabilidade de informações no *Visual Paradigm*

Para possibilitar o uso das informações por outras linguagens no PDP, é necessário exportar as informações no padrão XML e mapeá-las nos padrões solicitados a cada aplicação, através de modelos de transformação. Porém, a versão do *Visual Paradigm* utilizada não possibilita tal transformação. Desta forma, para auxiliar o rastreamento das informações do modelo, foi exportada uma tabela na extensão xls, com todos os elementos relacionados no modelo. Entretanto, esta tabela

foi alterada manualmente para mostrar apenas as informações pertinentes aos *stakeholders* do projeto, gerando a Matriz de Rastreabilidade (Apêndice C). A Figura 84 mostra uma parte da matriz.

LEGENDA:		REQUISITOS						FUNÇÕES			SISTEMAS		
		Conforto	Fácil Manutenção	Segurança	Fácil operação	Desempenho	Força de acionamento alavanca da marcha	Flexibilidade de descanso de braço	Permitir inclinação	Permitir acionamento	Transmitir força	Cabine	Pedal embreagem
Requisitos	Conforto	R	R	R		>H	>H	R	R		R	R	R
	Fácil Manutenção		R	R		R					R	R	R
	Segurança			R	R	R					R	R	R
	Fácil operação					R	R	R	R		R	R	R
	Desempenho					R							
	Força de acionamento alavanca da marcha								R				
	Flexibilidade de descanso de braço												
Func	Proteger Operador							R			A		
	Suportar operador										R		
Sistema	Cabine											>H	>H
	Trava ajuste												

Figura 84 – Recorte da Matriz de Rastreabilidade

4.4.16 USO DO MODELO NO PCC

Para avaliar o modelo proposto no contexto da empresa, simulou-se, em laboratório, a execução do PCC, utilizando o modelo SysML. Para isso, foram aplicadas as seguintes etapas:

- importação dos requisitos do SysML no *software Polarion*;
- importação de informações do modelo na ferramenta CAD;
- criação de DMU preliminar a partir do modelo;
- atualização de restrições no modelo SysML;
- análise DMU preliminar;
- criação de atividade de desenvolvimento e importação no modelo

SysML.

Nas versões do *Visual Paradigm* e *Polarion* utilizadas não há uma forma automática de mapear o SysML para o *Polarion*. Neste sentido, optou-se por realizar uma transformação manual utilizando arquivos na extensão xls. A Figura 85 mostra alguns requisitos mapeados no *Polarion*.

ID	Title	Priority	Severity	Status
TTE-80	Acesso superior B	90.0	+	
TTE-79	Acesso superior A	90.0	+	
TTE-86	Altura Cj banco operador	80.0	+	
TTE-85	Inclinação encosto lombar	70.0	+	
TTE-83	Capacidade carga banco	70.0	+	
TTE-84	Largura assento inferior	70.0	+	
TTE-82	Material do banco	50.0	+	
TTE-81	Inclinação cinto segurança	50.0	+	

Figura 85 – Importação de requisitos no *Polarion*

Como não foi utilizado um modelo de transformação, os elementos do modelo SysML ligados aos requisitos (e.g. componentes, funções) foram inseridos manualmente no *Polarion*. Na Figura 86, circuladas em azul, observam-se as informações buscadas automaticamente na importação do arquivo xls. Circuladas em vermelho estão as informações que necessitaram ser inseridas manualmente no *Polarion*. Percebe-se que a descrição padrão do *boilerplate* foi mantida.

Type: Requirement

*Severity: Should Have

*Req. Type: Functional Requirement

Project: Trator IE

Author: ed.hinckel@gmail.com

Categories:

Assignee(s):

*Status: Draft

Resolution:

*Priority: Medium [50.0]

Description

O<assento_inferior>deve<possuir_largura>entre<450><mm>e<480><mm>

Função

Suportar operador

Linked Work Items

Suspect	Role	Title
	relates to	TTE-87 - Assento inferior
	relates to	TTE-88 - Análise preliminar DMU

Figura 86 – Estrutura dos requisitos no *Polarion*

Através do *Polarion* podem ser criadas tarefas ligadas aos requisitos, que, por sua vez, devem ser atualizadas no modelo SysML. Na parte superior da Figura 87, observa-se a criação da atividade realizar modelagem 3D, no *Polarion*. A parte inferior mostra a representação da tarefa *no modelo SysML* e sua alocação ao componente Acesso superior B.

The image shows the Polarion interface for creating a task. The top bar displays 'REQ-12 - Realizar modelagem 3D'. The task configuration includes:

- Type: Task
- *Severity: Normal
- Author: ed.hinckel@gmail.com
- Project: ed.hinckel_gmail.com
- Categories:
- Assignee(s):
- *Status: Open
- Resolution:
- *Priority: High [70.0]
- Due Date:
- Time Point:
- Planned In:
- Initial Estimate:
- Time Spent:
- Remaining Estimate:

Below the configuration, there is a table with columns 'Suspect', 'Role', and 'Title'. A row shows a relationship 'relates to' between 'REQ-6' and 'Acesso superior B'.

The bottom part of the image shows a SysML diagram. A requirement box labeled 'Acesso superior B' with the text 'Text = "A<Esfera_B>deve<ocupar a cabine> entre<550 mm>a<1000>mm "' is connected by a dashed arrow to an activity box labeled 'Realizar Modelagem 3D'.

Figura 87 – Criação de atividades no *Polarion*

Transformando os diagramas que definem as restrições geométricas do produto, através dos fluxos descritos anteriormente na Figura 40, o projetista pode acessar um leiaute preliminar do produto. A Figura 88 ilustra a importação do leiaute preliminar da Cabine na ferramenta CAD. Entretanto, devido à indisponibilidade de uma ferramenta de transformação, a modelagem 3D foi realizada manualmente, através dos requisitos consultados no *Polarion*, baseados na norma NR12 (Anexo B) e no documento DQP. Tal figura apresenta uma analogia entre os blocos básicos do SysML que representam as formas e os volumes criados no CAD.

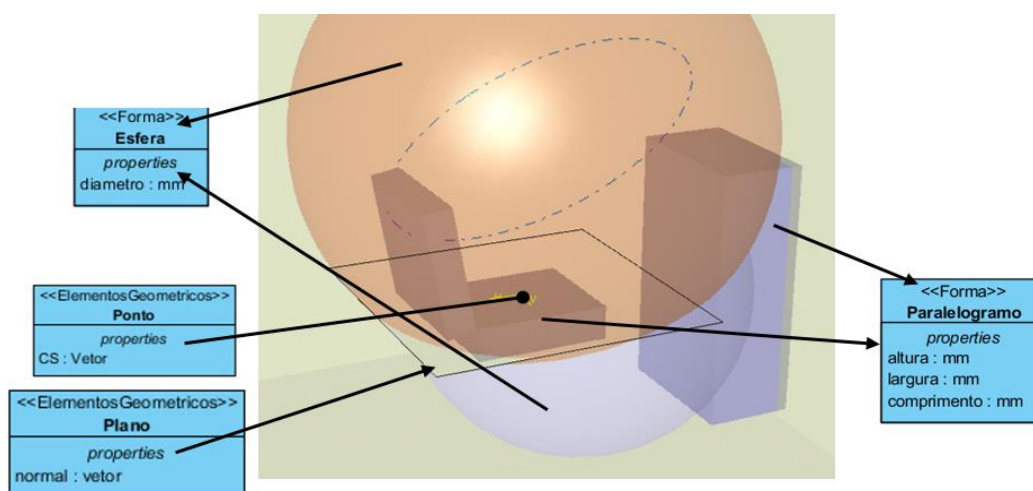


Figura 88 – DMU preliminar Cabine TE

Através do modelo CAD preliminar, o projetista possui a informação sobre os limites mínimos de acesso do operador, representados pelas esferas, bem como do posicionamento do CBO (e.g. referenciados pelo ponto SIP). Por meio de um exame preliminar, o projetista antecipa análises (e.g. ergonomia, folgas, interferências), as quais são realizadas na versão corrente do PCC, apenas nas etapas finais do PDP. De forma semelhante, outros elementos do sistema (e.g. pedais, painel de controle, alavancas) podem ser previstos através desta abordagem.

Novas restrições identificadas na Cabine devem ser atualizadas no modelo SysML. A Figura 89 exemplifica tal situação. A previsão de volumes (i.e. modelos 3D) para o roteamento de chicotes elétricos e mangueiras no interior da Cabine é modelada na ferramenta CAD. Do lado esquerdo, observa-se o roteamento preliminar de cabos, em regiões próximas ao CBO. O lado direito representa o roteamento definitivo.

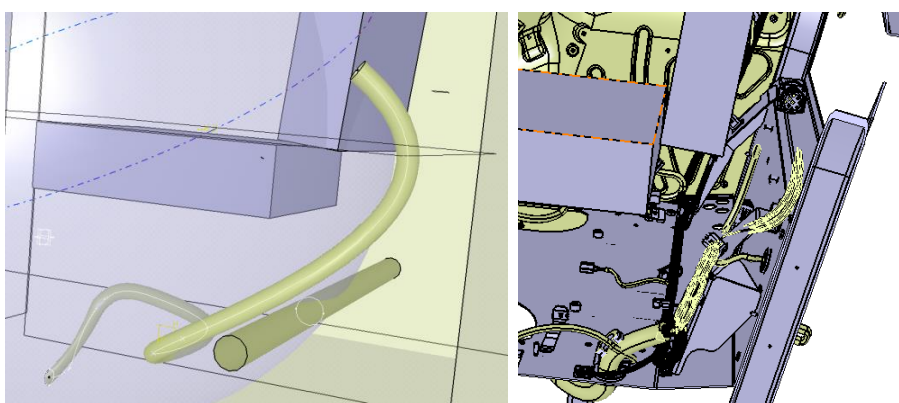


Figura 89 – Previsão roteamento de cabos e chicotes Cabine TE

A nova especificação dos cabos (i.e. modelo 3D aproximado dos caminhos dos chicotes elétricos e mangueiras) deve ser importada no modelo SysML, seguindo o fluxo representado anteriormente na Figura 40. Tais informações geram um novo diagrama IBD no modelo SysML. A Figura 90 apresenta esse diagrama com a especificação da varredura (i.e. estratégia da ferramenta CAD para gerar sólidos guiados por curvas e esboços). Tal forma é especificada por meio de uma curva mapeada através de pontos e um valor de diâmetro.

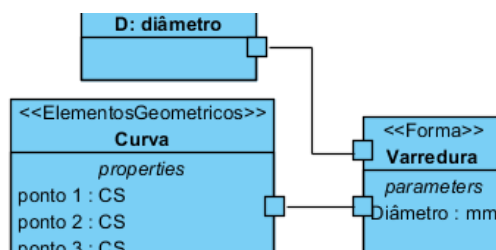


Figura 90 – Diagrama IBD para geometria prévia de roteamento

As especificações presentes no modelo SysML ligadas ao CBO são inseridas em uma lista de propriedades presentes na ferramenta CAD (Catia). A Figura 91 apresenta parte dessa lista, a qual contém a descrição padronizada do requisito na aba *property name*, sendo que a coluna *value* é preenchida pelo projetista, com os parâmetros atualizados de cada requisito. Além dos requisitos, a lista contém a descrição do sistema pai, o quadro UC utilizado, métodos de verificação dos requisitos e função. Observa-se que o sistema pai do CBO é a Cabine; sua função é suportar o operador, análise DMU e simulações na ferramenta *Ergomics Design & Analysis* (EDA) – métodos de verificação especificados.

property name	value	type
O<manipulo_de_ajuste> deve<permitir_travamento> entre<0,5> <Nm> e<6,5> <Nm>		String
O<encosto_lombar> deve<inclinat> mais_que<26> <graus>	26deg	Angle
A<suspensão_mecânica> deve<permitir_ajuste> maior_que<50> <mm>	0mm	Length
O<encosto_traseiro> deve<permitir_avanços> menor_que<2,5> <graus>	0mm	Length
Os<trilhos> devem<permitir_movimento> entre<-100> <m> e<+100> <mm>.1	0mm	Length
O<encosto_traseiro> deve<inclinat> entre<7,5> <graus> e<4,5graus>	0mm	Length
O<assento_inferior> deve<possuir_largura> entre<450> <mm> e<480> <mm>	0mm	Length
A<alavanca_de_controle> deve<permitir_acionamento> entre<10> <N> e<100> <N>	0N	Force
Funcao	Suportar operador	String
Sistema Pai	Cabine	String
Caso de Uso	UC1	String
Verificado por	Análise DMU, Ergonomics Simulation	String

Figura 91 – Lista de propriedades CBO

Análises ergonômicas mais detalhas utilizando a ferramenta *EDA* (integrada ao Catia) geram novas restrições, as quais devem ser atualizadas no modelo SysML,

utilizando o fluxo da Figura 40. Na Figura 92, observa-se um modelo já detalhado da cabine do trator, a qual utiliza um *manikin* (i.e. um modelo 3D humano) posicionado. Percebe-se que, do lado direito da imagem, existe um registro com as coordenadas dos posicionamentos analisados, caracterizando novas restrições ao modelo, as quais, por sua vez, geram novos requisitos.

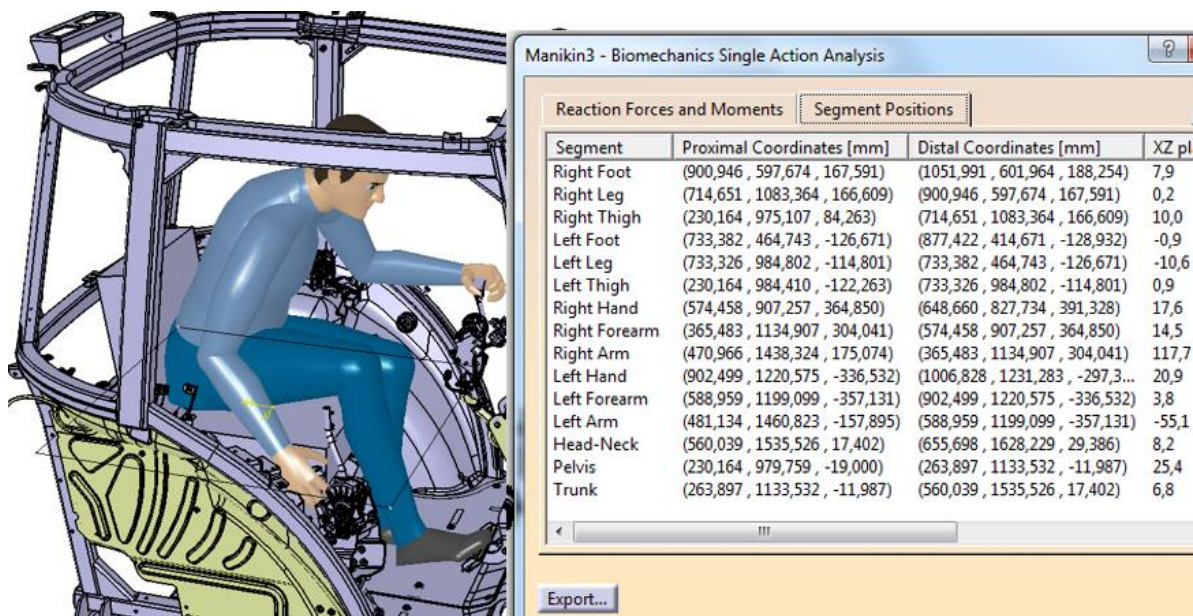


Figura 92 – Simulação no *Design Ergonomic Analysis*

As informações da lista de propriedades do Catia, além de servir como *checklist* ao projetista, podem ser utilizadas como parâmetros durante a modelagem 3D dos componentes. Na Figura 93, observa-se a utilização de um dos parâmetros da lista, referente à inclinação do encosto traseiro do banco. O ângulo (95 graus) entre o assento traseiro e o assento inferior do CBO é importado da lista de propriedades. Nesta figura, está representada uma analogia entre o parâmetro importado no modelo 3D e as propriedades especificadas no modelo SysML, para o assento traseiro do CBO.

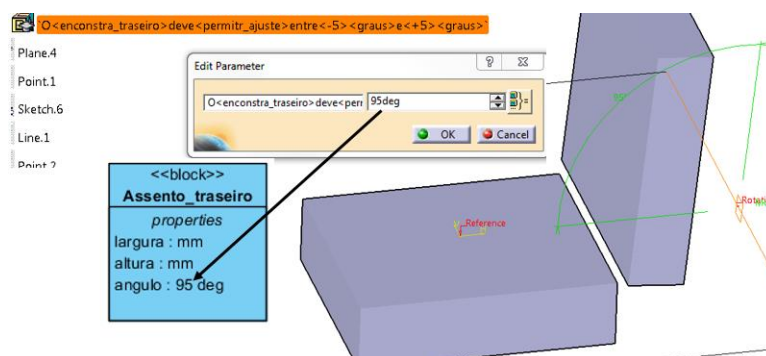


Figura 93 – Importação de parâmetros do CBO no CAD

Restrições de manufatura especificadas no modelo SysML também são importadas na ferramenta CAD. A Figura 94 ilustra o desenvolvimento do suporte metálico do CBO, com características importadas do diagrama IBD da Figura 68. Tal importação, bem como a atualização dos parâmetros no CAD, devem ser atualizadas no modelo SysML, seguem o fluxo da Figura 40.

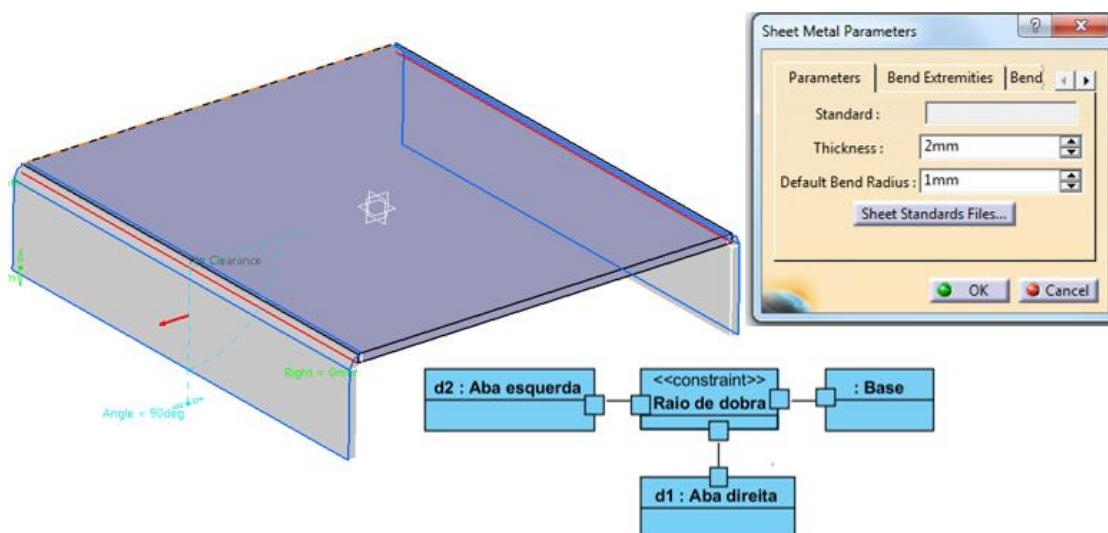


Figura 94 – Aplicando restrições de manufatura no CAD

A Figura 95 mostra um dos requisitos ligados ao pedal, na tela do *Polarion*. Através do campo *description*, identifica-se o esforço máximo (230 MPa) aceito para a atuação do pedal do freio. No campo inferior *linked work items*, identifica-se o componente e a função ligada ao requisito (i.e. pedal do freio e permitir acionamento). Através das informações consultadas no *Polarion*, foi gerada a lista de propriedades no Catia, para o pedal de freio (Figura 96). São observados os parâmetros, funções e caso de teste (i.e. Análise DMU) previstos para avaliar os requisitos do componente. As informações da lista de propriedades podem, também, ser utilizadas em simulações CAE.

Foi acompanhada uma simulação realizada na empresa sobre o suporte de um dos pedais do freio. A análise busca identificar o impacto de uma alteração na geometria da peça sobre sua resistência à fadiga. Para a realização da análise, os engenheiros acessam documentos internos, com procedimentos relacionados à norma ISO15077. A Figura 97 ilustra as restrições consideradas na análise (e.g. força e rigidez da mola). Porém, a definição das restrições de rigidez na mola força nos três pontos (i.e. direito, esquerdo e centro do pedal) e demais elementos de contorno na

análise (e.g. reação do cilindro, força de atrito na superfície do pedal) poderiam ser inseridas na lista da Figura 96, a partir do modelo SysML, através do diagrama da Figura 71.

TE-42 TE-44

TE-40 - Acionamento pedais freio

Type: Requirement

Project: TEmodel

Author: ed.hinckel@gmail.com

Categories: -- not selected --

Severity: Should have

Due Date:

Description

O<pedal-do_freio><deve_permitir_atuação>menos_que<230><Mpa>

Linked Work Items

Suspect	Role	Title
	relates to	TE-42 - Pedal dir freio
	relates to	TE-44 - Permitir acionamento

Figura 95 – Consulta requisitos pedal do freio

property name	value	type
O<pedal_esq_freio><deve><permitir_aceso>mais_que<75><mm	0mm	Length
O<pedal_dir_freio><deve><permitir_aceso>menos_que<380><mm	0mm	Length
Função	Acionar sistema de freio	String
Função2	Permitir acesso	String
UC1	Operador acionando freio	String
Testcase2	DMU	String
O<pedal-do_freio><deve_permitir_atuação>menos_que<230><Mpa>	0N_m2	Pressure

Figura 96 – Lista propriedades pedal do freio

A lista de propriedades (Figura 96) foi utilizada como estratégia para o projetista importar informações não geométricas (e.g. requisitos, funções) na ferramenta CAD. Entretanto, deve ser ampliado o estudo, mostrando como tais informações podem ser mapeadas automaticamente do modelo SysML, sem a necessidade de criar a lista manualmente. De forma semelhante, deve-se estudar o mapeamento dos diagramas paramétricos, fornecendo parâmetros necessários a simulações CAE.

4.5 PROPOSTA PARA FUTURO PCC

O modelo SysML foi proposto como fonte de informações aos *stakeholders*. Entretanto, no contexto do PCC, um desafio consiste em quais informações devem ser direcionadas a determinado *stakeholder* e em qual momento esta informação necessita ser acessada. Diante deste cenário, propõe-se um processo que se utiliza

da notação BPMN (Figura 98), com um novo fluxo de informações para o PCC, tendo como fonte de informações o modelo SysML.

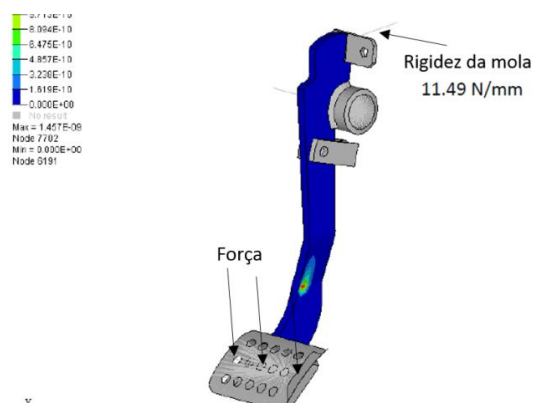


Figura 97 – Simulação CAE

O novo processo, assim como o vigente da empresa, inicia com uma ECR. Porém, no novo PCC, a ECR é realizada através do *Polarion*, que identifica uma necessidade (i.e. requisito). Tal solicitação é analisada pelo Chefe de Engenharia, o qual utiliza a Matriz de Rastreabilidade para identificar impactos no produto, podendo gerar novos requisitos, os quais devem ser atualizados no *Polarion*. Caso exista um modelo preliminar (*template*) para o componente, ligado aos novos requisitos, este é acessado pelo projetista por meio do *software* de PLM.

Novas restrições são atribuídas aos modelos 3D, através de uma análise sobre os componentes e subsistemas que fazem interface com o componente. As novas restrições identificadas pelo projetista são preenchidas na lista de propriedades do componente e atualizadas no *Polarion*, gerando, assim, novos requisitos, que, por sua vez, serão atualizados no SysML.

O DMU do produto deve ser acessado pela equipe de *Packaging*, a qual analisará o impacto das novas restrições nos demais sistemas do produto, adicionando novas restrições caso sejam identificadas, ou retornando ao projetista caso exista algum conflito. Quaisquer novas restrições identificadas pela equipe de *Packaging* geram novos requisitos que devem ser inseridos no *Polarion*.

Com a aprovação do DMU, o componente é então avaliado pela análise CAE (i.e. através da ferramenta *Abaqus*). Novas restrições identificadas nesta etapa também necessitam ser atualizadas no *Polarion*, para que possam, então, ser mapeadas e atualizadas no modelo SysML.

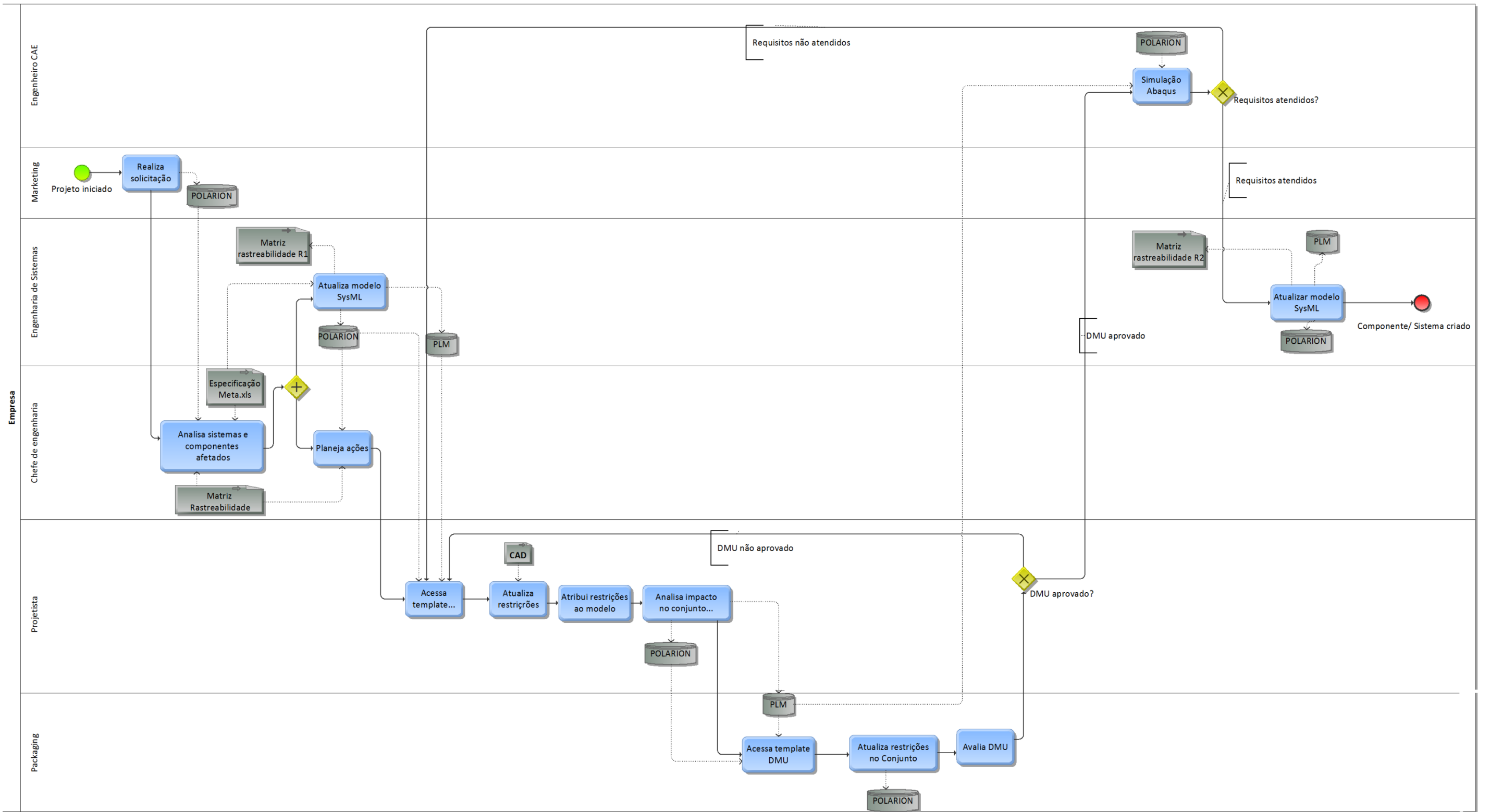


Figura 98 – Proposta novo PCC

4.6 DISCUSSÃO

O modelo SysML é a fonte das informações relacionadas ao produto, as quais são entrada para diversos sistemas utilizados pelos *stakeholders* (e.g. CAD, PLM, RM). O *Polarion* assume o papel de interface entre o SysML e os *stakeholders*, permitindo a rastreabilidade dos requisitos. Entretanto, no processo da Figura 98, foram propostas a matriz de rastreabilidade e a lista de propriedades do CAD como estratégia para rastrear informações além dos requisitos (e.g. relacionamentos), mesmo sem a utilização de modelos de transformação. Esta estratégia foi fundamental para a demonstração do modelo proposto. Entretanto, a utilização da linguagem SysML permite a utilização do modelo em aplicações computacionais, através da manipulação do padrão XML exportado do SysML. Neste cenário, destaca-se a oportunidade de gerar um DMU preliminar que oriente o início do projeto conceitual do produto.

4.7 AVALIAÇÃO DO MODELO

Através do uso do modelo, foi possível avaliá-lo, considerando os requisitos: exatidão, completeza, consistência, compreensibilidade, alterabilidade e fidelidade (MOHAGHEGHI; DEHLEN; NEPLE, 2009). O Quadro 8 apresenta, resumidamente, o que cada critério avalia no modelo, em forma de perguntas.

Critério	O que avalia?
Exatidão	O modelo proposto representa corretamente os elementos e relacionamentos presentes no produto?
Completeza	O modelo representa o produto de forma completa?
Consistência	Existem inconsistências no modelo?
Compreensibilidade	O modelo proposto é facilmente compreendido pelos <i>stakeholders</i> , os quais devem utilizar o modelo?
Alterabilidade	O modelo pode ser facilmente alterado durante o PDP?
Fidelidade	O modelo representa a realidade do produto usado como contexto?

Quadro 9 – Critérios para avaliação do modelo

Através da sintaxe da linguagem SysML, o modelo permitiu a representação de requisitos, parâmetros, funções, sistemas, subsistema, componentes, além dos relacionamentos e interações entre eles que caracterizam as principais informações de um produto, necessárias ao desenvolvimento. Logo, satisfaz-se o critério de exatidão. A demonstração do modelo usou como contexto apenas um sistema do produto, usado como contexto (i.e. Cabine do TE). Requisitos não técnicos (e.g. organizacionais, externos, custos), que impactam o PDP, não foram endereçados no modelo, ~~os quais impactam o PDP~~. Além disso, a demonstração do modelo focou *stakeholders* específicos (e.g. engenheiros de produto, chefe de engenharia, engenheiros de simulações e arquitetura do produto), não demonstrando o uso por *stakeholders* de outras áreas do conhecimento (e.g. financeiro, produção, logística). Estes fatores devem ser estudados futuramente, para melhorar a completude do modelo.

Um grande desafio para a consistência do modelo SysML é a ambiguidade semântica. A Figura 99 ilustra esta problemática. Por exemplo, o componente elemento frontal satisfaz dois requisitos, o Esforço acionamento alavanca frontal e Força acionamento alavanca frontal. Porém, ambos os requisitos relacionam-se com a mesma restrição e propriedade do componente, ocasionando uma duplicidade devido à ambiguidade entre as expressões Esforço e Força.

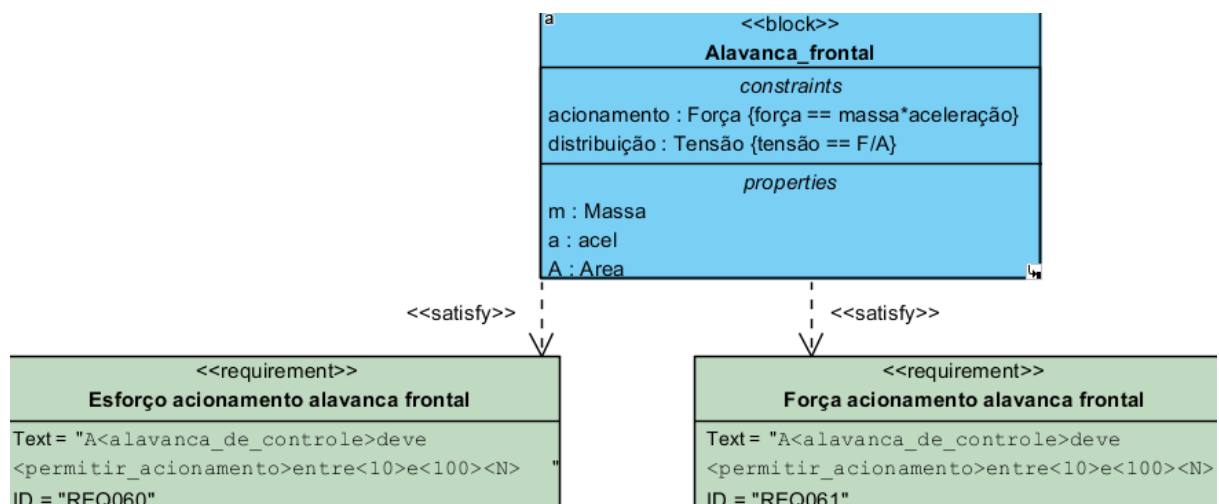


Figura 99 – Ambiguidade semântica entre requisitos

O modelo proposto utiliza uma série de artefatos e um complexo fluxo de informações que podem dificultar seu entendimento. Porém, processos como o proposto na Figura 98 auxiliam o entendimento sobre o fluxo das informações e as ferramentas necessárias ao uso do modelo, contribuindo para o entendimento do requisito compreensibilidade.

Através da interoperabilidade existente entre os padrões OMG utilizados no modelo (e.g. XMI, ReqIF e STEP), o modelo pode ser alterado de forma bidirecional. Modelos 3D podem ser importados em ferramentas CAD através do modelo SysML e vice-versa. O mesmo ocorre com restrições identificadas durante o PDP, originando novos requisitos, os quais podem ser inseridos no modelo SysML por meio da ferramenta RM e vice-versa. Neste sentido, o modelo atende ao critério de alterabilidade.

Todas as informações incorporadas no modelo, referentes aos PDP do TE, foram coletadas através de especialistas e documentos da empresa utilizada como contexto do estudo. Neste sentido, o modelo representa com fidelidade tais informações. Entretanto, uma extensão do estudo instanciando o modelo com todos os subsistemas do TE, bem como todos seus *stakeholders*, contribuiria com a fidelidade do modelo, representando a totalidade do produto.

5 CONCLUSÕES

A determinação do TE como contexto da pesquisa e a delimitação do cenário por meio da Cabine do TE satisfaz os objetivos O1 e O2 endereçados ao trabalho. Através do diagnóstico realizado na empresa, foi possível identificar: a) lacunas no fluxo de informações do PDP, conforme previsto por Pahl et al. (2013), e b) a utilização do modelo como oportunidade de solução. O QFD fez com que o procedimento adotado para a elicitacão de requisitos do TE permitisse a geraçao de informações básicas para o desenvolvimento do modelo. A padronizacão das informações, através do uso de *boilerplates* para a descriçao dos requisitos, possibilitou uma melhor interpretaçao dos requisitos. Esta abordagem se apresentou como uma soluçao para as ECRs direcionadas à engenharia de produto da empresa, segundo requisitos estruturados no Polarion.

Embora o modelo não tenha sido aplicado diretamente aos integrantes da empresa estudada, a instanciaçao do modelo aplicado ao PCC possibilitou o acesso às informações do produto (e.g. funçoes, parâmetros, componentes), representando, dessa foram, várias etapas e áreas de conhecimento do PDP (e.g. engenheiros de produto, *packaging*, engenheiros de simulaçoes, chefe de engenharia). As informações do modelo podem ser rastreadas através do Polarion e utilizadas em futuros projetos, o que satisfaz o objetivo O3 do trabalho. Além disso, por meio da instanciaçao do modelo e sua posterior avaliaçao, o trabalho atende aos objetivos O4 e O5.

O alinhamento dos elementos do modelo com as necessidade dos clientes foi possível através da ferramenta QFD. Neste sentido, a elicitacão dos requisitos na etapa inicial da pesquisa foi fundamental para o alcance dos objetivos. Além disso, a determinacão do fluxo de informações proposto no processo da Figura 98, e o nível de detalhamento dos diagramas, basearam-se nas boas práticas propostas por Nattermann e Anderl (2010) e Pahl et al. (2013).

O trabalho serve como referênci para a gestão do conhecimento gerado no desenvolvimento de um produto. Através da pesquisa, tem-se um guia sobre como padronizar as informações, e qual o caminho a ser seguido para que tais informações sejam incorporadas ao modelo do produto e disponibilizadas às áreas de conhecimento envolvidas. O conhecimento gerado no decorrer do PDP deve ser

mapeado, armazenado e transformado em diferentes níveis de abstração, permitindo seu entendimento durante o intercâmbio de informações.

O diagnóstico inicial realizado na empresa evidencia a ausência de uma representação de produto nas fases iniciais do PDP, não havendo uma conexão entre os conhecimentos gerados, principalmente antes de existir uma BOM e um DMU. Neste sentido, a pesquisa apresentou uma forma de representação de produto que conecta e armazena as informações ao longo do PDP.

Na execução dos procedimentos metodológicos identificou-se um pacote de ferramentas tecnológicas que permitem a aplicação da abordagem MbSE no contexto industrial (e.g. CAD, RM, KBE, DMU, modelos de transformação, modelador SysML, padrões de linguagem). Por outro lado, o uso de ferramentas tradicionais como o QFD e *boilerplates* fornece uma base inicial para futuras aplicações computacionais.

A pesquisa é aplicada no contexto de um produto já lançado no mercado. Entretanto, futuros estudos são necessários, uma vez que estão voltados à aplicação do modelo proposto em novos produtos e processos – alinhando a pesquisa com abordagens como a DTw.

Uma questão não endereçada neste trabalho é o impacto da aplicação do modelo por integrantes da empresa estudada, a qual utiliza métodos tradicionais de representação do produto, baseado em diretórios com documentos isolados. A inclusão de um novo papel dentro do PDP, que consiste na modelagem de sistemas, tende a gerar impactos culturais na empresa, os quais demandam métodos que minimizem tal impacto.

A busca e a escolha sobre quais informações devem alimentar o modelo são diretamente impactadas pela experiência do modelador do sistema e dos especialistas que fornecem as informações, bem como das abordagens e boas práticas seguidas. A importância das necessidades dos clientes inseridas no QFD foi elencada de acordo com documentos e opiniões dos *stakeholders*. Tal fato impacta diretamente a priorização dos requisitos inseridos no modelo SysML.

Na atual geração da Indústria 4.0 e da constante evolução tecnológica neste cenário, o uso computacional do modelo é fundamental. Neste sentido, o diagrama apresentado na Figura 68 pode auxiliar como um esboço para a criação de um *framework* que possa operacionalizar as atividades realizadas manualmente na proposta do modelo, facilitando sua aplicação no contexto industrial. Além disso,

estudos que visem à integração com outras linguagens que venham a solucionar o problema de ambiguidade semântica identificada podem auxiliar na consistência do modelo.

A interação de diversos elementos presentes no PDP de um produto afeta o sucesso deste no mercado. Além de requisitos técnicos, existem, também, requisitos não técnicos, como restrições relativas ao descarte, transporte, fornecimento, e, até mesmo, organizacionais. Tal complexidade desperta uma oportunidade de extensão do modelo proposto neste trabalho, a fim de conectar os elementos presentes no ciclo de vida do produto.

Atividades que sucedem o PDP – como retorno de clientes e clínicas de produto – são elementos que podem gerar informações relevantes a serem introduzidas no modelo que representa o produto. As necessidades dos clientes também são dinâmicas, devido à evolução do perfil dos consumidores. Logo, a proposta de um modelo que considere tal evolução pode auxiliar a geração de produtos mais competitivos.

REFERÊNCIAS

ABRAN, A.; KHELIFI, A.; SURYN, W.; SEFFAH, A. Usability meanings and interpretations in ISO standards. **Software Quality Journal**, v. 11, n. 4, p. 325-338, 2003.

AKAO, Y. **Quality Function Deployment: Integrating Customer Requirements Into Product Design**. Washington, DC: Taylor & Francis, 2004

ANDRIANARISON, E.; PIQUES, J.-D. SysML for embedded automotive Systems: a practical approach. **Embedded Real Time Software and Systems ERTS**, v. 2010, n., p., 2010.

APVRILLE, L.; ROUDIER, Y. Towards the model-driven engineering of secure yet safe embedded systems. **Electronic Proceedings in Theoretical Computer Science**, v. 148, n., p. 15-30, 2014.

BAJAJ, M.; ZWEMER, D.; PEAK, R.; PHUNG, A.; SCOTT, A. G.; WILSON, M. SLIM: collaborative model-based systems engineering workspace for next-generation complex systems. In: **Aerospace Conference, 2011 IEEE**, 2011, 5-12 March 2011, p. 1-15.

BAJAJ, M.; COLE, B.; ZWEMER, D. Architecture to geometry-integrating system models with mechanical design. **AIAA SPACE 2016**, v. 1, n. 7, p. 5470-5489, 2016.

BARBIERI, G.; FANTUZZI, C.; BORSARI, R. A model-based design methodology for the development of mechatronic systems. **Mechatronics**, v. 24, n. 7, p. 833-843, 2014.

BATARSEH, O. G.; HUANG, E.; MCGINNIS, L. Capturing simulation tool and application domain knowledge for automating simulation model creation. **Journal of Simulation**, v. 9, n. 1, p. 1-15, 2014.

BHANUMATHI, K.; HARIDAS, B. Communication through digital engineering processes in an aircraft program. **International journal of advanced Information technology**, v. 3, n. 4, p. 19, 2013.

BONDAR, S.; SHAMMAA, A.; STJEPANDIĆ, J.; TASHIRO, K. Advances in Parameterized CAD Feature Translation. **Transdisciplinary Lifecycle Analysis of Systems**, v., n., p. 615, 2015.

BOOCH, G.; RUMBAUGH, J.; JACOBSON, I. **UML: guia do usuário**. Rio de Janeiro - RJ: Elsevier Brasil, 2006

BORONAT, A.; MESEGUER, J. An algebraic semantics for MOF. In: (Ed.). **Fundamental Approaches to Software Engineering**: Springer, 2008, p.377-391.

BRACE, W.; EKMAN, K. CORAMOD: a checklist-oriented model-based requirements analysis approach. **Requirements Engineering**, v. 19, n. 1, p. 1-26, 2012.

BRYMAN, A. **Social research methods**. São Paulo, SP: Oxford university press, 2012

CHAMI, M.; BRUEL, J.-M. Towards an integrated conceptual design evaluation of mechatronic systems: the sysdice approach. **Procedia Computer Science**, v. 51, n., p. 650-659, 2015.

CHANDRASEGARAN, S. K.; RAMANI, K.; SRIRAM, R. D.; HORVÁTH, I.; BERNARD, A.; HARIK, R. F.; GAO, W. The evolution, challenges, and future of knowledge representation in product design systems. **Computer-Aided Design**, v. 45, n. 2, p. 204-228, 2013.

CHANG, C.-H.; LU, C.-W.; YANG, W. P.; CHU, W. C.-C.; YANG, C.-T.; TSAI, C.-T.; HSIUNG, P.-A. A SysML Based Requirement Modeling Automatic Transformation Approach. v., n., p. 474-479, 2014.

CLARK, K. B.; FUJIMOTO, T. **Product Development Performance: Strategy Management and Organization in the World Auto Industry**. Cambridge, MA: Harvard Business School Press, 1991

CODES, O. **OECD Standard Codes for the official testing of agricultural and forestry tractors**. Paris: OECD Headquarters, 2009

COLE, B.; DELP, C.; DONAHUE, K. Piloting model based engineering techniques for spacecraft concepts in early formulation. **JPL and INCOSE. July**, v., n., p. 12-15, 2010.

COOPER, R. G. Stage-gate systems: a new tool for managing new products. **Business horizons**, v. 33, n. 3, p. 44-54, 1990.

CRANE, J.; BROWNLOW, L. Optimization of multi-satellite systems using integrated Model Based System Engineering (MBSE) techniques. In: Systems Conference (SysCon), 2015 9th Annual IEEE International, 2015IEEE, p. 206-211.

CRESWELL, J. W. **Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches**. Nebraska, Lincoln: Sage publications, 2013.

DEMOLY, F.; MONTICOLO, D.; EYNARD, B.; RIVEST, L.; GOMES, S. Multiple viewpoint modelling framework enabling integrated product-process design. **International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)**, v. 4, n. 4, p. 269-280, 2010.

DESHPANDE, A. Development and consequences of cross functional team performance in the concurrent engineering context: An integrated framework. **Journal of Applied Business and Economics**, v. 14, n. 4, p. 24-36, 2013.

DI GIRONIMO, G.; LANZOTTI, A.; MELEMEZ, K.; RENNO, F. A top-down approach for virtual redesign and ergonomic optimization of an agricultural tractor's driver cab. In: **ASME 2012 11th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis**, 2012 American Society of Mechanical Engineers, p. 801-811.

DUBOIS, H.; PERALDI-FRATI, M.-A.; LAKHAL, F. A model for requirements traceability in a heterogeneous model-based design process: Application to automotive embedded systems. In: **Engineering of Complex Computer Systems (ICECCS)**, 2010 15th IEEE International Conference on Engineering of Complex Computer Systems, 2010 IEEE, p. 233-242.

DURUGBO, C. Integrated product-service analysis using SysML requirement diagrams. **Systems Engineering**, v. 16, n. 1, p. 111-123, 2013.

ELTAWIL, M.; HEGAZY, R. Ergonomic studies on controls layout, drivers anthropometric and noise exposure for egyptian farm tractors. **Farm Machinery and Power**, v. 28, n. 4, p. 898-916.

EPPINGER, S. The Fundamental Challenge of Product Design. **Journal of Product Innovation Management**, v. 28, n. 3, p. 399-400, 2011.

FAN, H.; LIU, Y.; LIU, D.; YE, X. Automated generation of the computer-aided design model from the system structure for mechanical systems based on systems modeling language. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, v. 230, n. 5, p. 883-908, 2015.

FERRARI, A.; FANTECHI, A.; GNESI, S.; MAGNANI, G. Model-based development and formal methods in the railway industry. **Software, IEEE**, v. 30, n. 3, p. 28-34, 2013.

FIELDING, E.; MCCARDLE, JR.; EYNARD, B.; HARTMAN, N.; FRASER, A. Product lifecycle management in design and engineering education: International perspectives. **Concurrent Eng.-Res. Appl.**, v. 22, n. 2, p. 123-134, 2014.

FOWLER, M. **UML distilled: a brief guide to the standard object modeling language**. Berkeley, CA: Addison-Wesley Professional, 2004

FRIEDENTHAL, S.; MOORE, A.; STEINER, R. **A practical guide to SysML: the systems modeling language**. Burlington, MA: Morgan Kaufmann, 2014

GARGOURI, F. **Ontology Theory, Management and Design: Advanced Tools and Models: Advanced Tools and Models**. New York, NY: Igi Global, 2010

GAUSEMEIER, J.; MOEHRINGER, S. **VDI 2206-A new guideline for the design of mechatronic systems**: secondary title. Berkeley, 2002.

GERBER, T.; THEORIN, A.; JOHNSON, C. Towards a seamless integration between process modeling descriptions at business and production levels: work in progress. **Journal of Intelligent Manufacturing**, v. 25, n. 5, p. 1089-1099, 2013.

GLAESSGEN, E. H.; STARGEL, D. The Digital Twin paradigm for future NASA and US Air Force vehicles. In: **53rd Struct. Dyn. Mater. Conf. Special Session: Digital Twin, Honolulu, HI, US**, 2012, p. 1-14.

GRAVES, H.; HORROCKS, I. Application of OWL 1.1 to Systems Engineering. **2008OWL Experiences and Directions April Workshop**.

GRAVES, H. Integrating SysML and OWL. **Proceedings of OWL: Experiences and Directions**, v. 529, n. 5, p. 117-124, 2009.

HACKENBERG, G.; RICHTER, C.; ZÄH, M. F. A multi-disciplinary modeling technique for requirements management in mechatronic systems engineering. **Procedia Technology**, v. 15, p. 5-16, 2014.

HARTMAN, N. W.; ROPP, T. D. Examining the Use of Model-Based Work Instructions in the Aviation Maintenance Environment. **Product Lifecycle Management for Society**, v. 409, n. 5, p. 78-89, 2013.

HENDERSON, K. **On Line and on Paper: Visual Representations, Visual Culture, and Computer Graphics in Design Engineering**. Cambridge, MA: MIT Press, 1998. 256 p.

HERAVI, B. R.; LYCETT, M.; DE CESARE, S. Ontology-based standards development: Application of OntoStanD to ebXML business process specification schema. **International Journal of Accounting Information Systems**, v. 15, n. 3, p. 275-297, 2014.

HINCAPIÉ, M.; DE JESÚS RAMÍREZ, M.; VALENZUELA, A.; VALDEZ, J. A. Mixing real and virtual components in automated manufacturing systems using PLM tools. **International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)**, v. 8, n. 3, p. 209-230, 2014.

HUBKA, V.; EDER, W. E. **Theory of technical systems: a total concept theory for engineering design**. Berlin: Springer Science & Business Media, 2012

HULL, E.; JACKSON, K.; DICK, J. **Requirements engineering**. London: Springer Science & Business Media, 2010

HYBERTSON, D.; SHEARD, S. Integrating and unifying old and new se elements. **INSIGHT**, v. 11, n. 1, p. 13-16, 2008.

INGLE, C. **Agricultural tractor test standards in America**. Washington - DC:CMGT 564 Strategic Standards, 2011.

IRAQI-HOUSSAINI, M.; KLEINER, M.; ROUCOULES, L. Model-based (mechanical) product design. In: (Ed.). **Model Driven Engineering Languages and Systems**: Springer, 2011, p.548-562.

IVEZIC, N.; KULVATUNYOU, B.; SRINIVASAN, V. On Architecting and Composing Through-life Engineering Information Services to Enable Smart Manufacturing. **Procedia CIRP**, v. 22, n., p. 45-52, 2014.

JIANG, J.-J.; SYSTÄ, T. **Report: UML model exchange using XMI**:Tampere University of Technology (TUT), Department of Information Technology, Tampere, Finland. Available online: www.cs.tut.fi/~xmlohj/linkit/XMIReport.pdf,(last visited November 2004), 2002.

KAPUR, K. C.; PECHT, M. **Reliability engineering**. Hoboken - New Jersey: John Wiley & Sons, 2014.

KASLOW, D.; SOREMEKUN, G.; KIM, H.; SPANGELO, S. Integrated model-based systems engineering (MBSE) applied to the Simulation of a CubeSat mission. In: **Aerospace Conference**, 2014IEEE, p. 1-14.

KOEN, P.; AJAMIAN, G.; BURKART, R.; CLAMEN, A.; DAVIDSON, J.; D'AMORE, R.; ELKINS, C.; HERALD, K.; INCORVIA, M.; JOHNSON, A. Providing clarity and a common language to the "fuzzy front end". **Research-Technology Management**, v. 44, n. 2, p. 46-55, 2001.

KOTNOUR, T.; ORR, C.; SPAULDING, J.; GUIDI, J. Determining the benefit of knowledge management activities. In: **International Conference On Systems, Man, And Cybernetics**, 1997IEEE, p. 94-99.

KRAFT, E. M. HPCMP CREATE - AV and the air force digital thread. In: **Proceedings of the 53rd AIAA Aerospace Sciences Meeting, AIAA 2015**, 2015, p. 110-123.

KROLL, P.; KRUCHTEN, P. **The rational unified process made easy: a practitioner's guide to the RUP**. Boston, MA: Addison-Wesley Professional, 2003.

KRUCHTEN, P. **The rational unified process: an introduction**. Hoboken - New Jersey: Addison-Wesley Professional, 2004.

KUSHWAHA, S. K.; TIWARI, A. Evaporative cooling comfort in agricultural tractor cabin. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 38, n. 3, p. 965-976, 2016.

LASALLE, J.; PEUREUX, F.; FONDEMENT, F. Development of an automated MBT toolchain from UML/SysML models. **Innovations in Systems and Software Engineering**, v. 7, n. 4, p. 247-256, 2011.

LIN, C. S.; HSIUNG, P. A.; LIN, S. W.; CHEN, Y. R.; LU, C. H.; TONG, S. Y.; SU, W. T.; SHIH, C.; HSUEH, N. L.; CHANG, C. H. VERTAF/Multi- Core: A SysML- based application framework for multi- core embedded software development. **Journal of the Chinese Institute of Engineers**, v. 32, n. 7, p. 985-991, 2009.

LIN, H.-Y.; SIERLA, S.; PAPAKONSTANTINO, N.; VYATKIN, V. A SysML profile supporting change orders in model driven engineering. In: **2015 IEEE International**

Conference on Automation Science and Engineering (CASE), 2015 IEEE, p. 1054-1059.

LIN, J.; QIAN, Y.; CUI, W. Managing the concurrent execution of dependent product development stages. **Engineering Management, IEEE Transactions on**, v. 59, n. 1, p. 104-114, 2012.

LIPMAN, R.; LUBELL, J. Conformance checking of PMI representation in CAD model STEP data exchange files. **Computer-Aided Design**, v. 66, n., p. 14-23, 2015.

LOUHICHI, B.; ABENHAIM, G. N.; TAHAN, A. S. CAD/CAE integration: updating the CAD model after a FEM analysis. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 76, n. 1-4, p. 391-400, 2015.

LUTHER, S. **SysML based cubesat model design and integration with the horizon simulation framework**. 2016. 95f. Thesis (Master of Science in Aerospace Engineering) - Aerospace Engineering, Faculty of California Polytechnic State University, San Luis Obispo, 2016.

MAHMOUD, H.; DHOKIA, V.; NASSEHI, A. STEP-based conceptual framework for measurement planning integration. **Procedia CIRP**, v. 43, n., p. 315-320, 2016.

MARCH, S. T.; SMITH, G. F. Design and natural science research on information technology. **Decision support systems**, v. 15, n. 4, p. 251-266, 1995.

MEHTA, C.; GITE, L.; PHARADE, S.; MAJUMDER, J.; PANDEY, M. Review of anthropometric considerations for tractor seat design. **International Journal of Industrial Ergonomics**, v. 38, n. 5, p. 546-554, 2008.

MHENNI, F.; CHOLEY, J.-Y.; PENAS, O.; PLATEAUX, R.; HAMMADI, M. A SysML-based methodology for mechatronic systems architectural design. **Advanced Engineering Informatics**, v. 28, n. 3, p. 218-231, 2014.

MING, X. G.; YAN, J. Q.; LU, W. F.; MA, D. Technology solutions for collaborative product lifecycle management—status review and future trend. **Concurrent Engineering**, v. 13, n. 4, p. 311-319, 2005.

MOESER, G.; ALBERS, A.; KUMPEL, S. Usage of free sketches in MBSE raising the applicability of Model-Based Systems Engineering for mechanical engineers. In: **Systems Engineering (ISSE), 2015 IEEE International Symposium on, 2015IEEE**, p. 50-55.

MOHAGHEGHI, P.; DEHLEN, V.; NEPLE, T. Definitions and approaches to model quality in model-based software development—A review of literature. **Information and Software Technology**, v. 51, n. 12, p. 1646-1669, 2009.

MOHAMMED, S.; DUMVILLE, B. C. Team mental models in a team knowledge framework: Expanding theory and measurement across disciplinary boundaries. **Journal of organizational Behavior**, v. 22, n. 2, p. 89-106, 2001.

MORGAN, J. M.; LIKER, J. K. **The Toyota product development system**: New York: Productivity Press, 2006.

NATTERMANN, R.; ANDERL, R. Approach for a Data-Management-System and a Proceeding-Model for the Development of Adaptive Systems. In: **ASME 2010 International Mechanical Engineering Congress and Exposition**, 2010 American Society of Mechanical Engineers, p. 379-387.

NOYER, A.; IYENGHAR, P.; PULVERMUELLER, E.; PRAMME, F.; BIKKER, G. Traceability and interfacing between requirements engineering and UML domains using the standardized ReqIF format. In: **Model-Driven Engineering and Software Development (MODELSWARD), 2015 3rd International Conference on**, 2015a IEEE, p. 1-6.

NOYER, A.; IYENGHAR, P.; PULVERMUELLER, E.; ENGELHARDT, J.; PRAMME, F.; BIKKER, G. A model-based workflow from specification until validation of timing requirements in embedded software systems. In: **10th IEEE International Symposium on Industrial Embedded Systems (SIES)**, 2015b IEEE, p. 1-4.

OMG. **Requirements interchange format specification 1.1.**, 2013.

OMG. **Unified modeling language 2.2.1.**, 2007

OMG. **XML Metadata interchange (XMI) specification 2.4.2.**, 2014.

OMG. **Reference metamodel for the EXPRESS information modeling language 1.1.**, 2015a

OMG. **System modeling language 1.4.**, 2015b

OMG. **Business process model and notation (BPMN)**, 2009

OWEN, R.; HORVÁTH, I. Towards product-related knowledge asset warehousing in enterprises. In: **Proceedings of the 4th international symposium on tools and methods of competitive engineering (TMCE 2002)**, Hubei, China, 2002 Citeseer, p. 155-170.

PAHL, G.; BEITZ, W.; FELDHUSEN, J.; GROTE, K. H. **Engineering design: a systematic approach**. London: Springer Science & Business Media, 2013.

PEAK, R. S.; LUBELL, J.; SRINIVASAN, V.; WATERBURY, S. C. STEP, XML, and UML: complementary technologies. **Journal of Computing and Information Science in Engineering**, v. 4, n. 4, p. 379-390, 2004.

PEFFERS, K.; TUUNANEN, T.; ROTHENBERGER, M. A.; CHATTERJEE, S. A design science research methodology for information systems research. **Journal of management information systems**, v. 24, n. 3, p. 45-77, 2007.

PRASAD, B. Converting computer-integrated manufacturing into an intelligent information system by combining CIM with concurrent engineering and knowledge management. **Industrial Management & Data Systems**, v. 100, n. 7, p. 301-316, 2000.

QAMAR, A.; WIKANDER, J.; DURING, C. Managing dependencies in mechatronic design: a case study on dependency management between mechanical design and system design. **Engineering with Computers**, v. 31, n. 3, p. 631-646, 2014.

QIAN, Y.-J.; GOH, T. N.; LIN, J. Recent Advances in Concurrent Engineering Modeling. In: Proceedings of the **5th International Asia Conference on Industrial Engineering and Management Innovation (IEMI2014)**, 2015 Springer, p. 9-12.

QUINTANA, V.; RIVEST, L.; PELLERIN, R.; VENNE, F.; KHEDDOUCI, F. Will Model-based definition replace engineering drawings throughout the product lifecycle? A global perspective from aerospace industry. **Computers in Industry**, v. 61, n. 5, p. 497-508, 2010.

RACHURI, S.; SUBRAHMANIAN, E.; BOURAS, A.; FENVES, S. J.; FOUFOU, S.; SRIRAM, R. D. Information sharing and exchange in the context of product lifecycle management: Role of standards. **Computer-Aided Design**, v. 40, n. 7, p. 789-800, 2008.

RAMOS, A. L.; FERREIRA, J. V.; BARCELÓ, J. Model-based systems engineering: An emerging approach for modern systems. **Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, IEEE Transactions on**, v. 42, n. 1, p. 101-111, 2012.

REID, J. B.; RHODES, D. H. Digital system models: an investigation of the non-technical challenges and research needs. In: **2016 Conference on Systems Engineering Research**, 2016, p. 1-10.

RIBEIRO, F. G. C.; PEREIRA, C. E.; RETTBERG, A.; SOARES, M. S. Model-based requirements specification of real-time systems with UML, SysML and MARTE. **Software & Systems Modeling**, v. 16, n. 1, p. 1-19, 2016.

ROTA SENA MARQUES, M.; SIEGERT, E.; BRISOLARA, L. Integrating UML, MARTE and sysml to improve requirements specification and traceability in the embedded domain. In: **2014 12th IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN)**, 2014 IEEE, p. 176-181.

RUŽIÜ, M. D. Agricultural tractor cab characteristics relevant for microclimatic conditions. **Journal of Applied Engineering Science**, v. 9, n. 2, p. 324, 2011.

SADRAEY, M. H. **Aircraft design: A systems engineering approach**. London: John Wiley & Sons, 2012

SAHA, G. K. Web ontology language (OWL) and semantic web. **Ubiquity**, v. 2007, n. September, p. 1-1, 2007.

SAKAIRI, T.; PALACHI, E.; COHEN, C.; HATSUTORI, Y.; SHIMIZU, J.; MIYASHITA, H. Model based control system design using sysML, simulink, and computer algebra system. **Journal of Control Science and Engineering**, v. 1, n., p. 9, 2013.

SCHNEIDER, F.; BERENBACH, B. A literature survey on international standards for systems requirements engineering. **Procedia Computer Science**, v. 16, n., p. 796-805, 2013.

SHAHID, H. **Integration of system-level design and mechanical design models in the development of mechanical systems**. 2011. 49f. Thesis (Masters in Interactive Systems Engineering) - Department of Computer and System Sciences, Royal Institute of Technology, 2011.

SHARMA, J.; RAWANI, A. Customer driven product development through quality function development (QFD). **Asia Pacific Business Review**, v. 2, n. 1, p. 45-54, 2006.

SHARMA, K.; BOWONDER, B. The making of Boeing 777: a case study in concurrent engineering. **International journal of manufacturing technology and management**, v. 6, n. 3-4, p. 254-264, 2004.

SHINA, S. G. **Concurrent engineering and design for manufacture of electronics products**. New York: Springer Science & Business Media, 2012

SMITH, P. G.; REINERTSEN, D. G. **Developing products in half the time: new rules, new tools**. New York: John Wiley & Sons, 1998, v.298.

SPANGELO, S. C.; KASLOW, D.; DELP, C.; COLE, B.; ANDERSON, L.; FOSSE, E.; GILBERT, B. S.; HARTMAN, L.; KAHN, T.; CUTLER, J. Applying model based systems engineering (MBSE) to a standard CubeSat. In: **Aerospace Conference, 2012 IEEE**, 2012IEEE, p. 1-20.

STARK, J. **Product lifecycle management**. London: Springer, 2011.

SYAN, C.; MENON, U. **Concurrent engineering: concepts, implementation and practice**. Dordrecht: Springer Science & Business Media, 2012.

TICHKIEWITCH, S. Method and Tools for the Effective Knowledge Management in Product Life Cycle. **Global Product Development**, v. 3, n. 1, p. 19-25, 2011.

TOMIYAMA, T.; D'AMELIO, V.; URBANIC, J.; ELMARAGHY, W. Complexity of multi-disciplinary design. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 56, n. 1, p. 185-188, 2007.

TÖRNGREN, M.; QAMAR, A.; BIEHL, M.; LOIRET, F.; EL-KHOURY, J. Integrating viewpoints in the development of mechatronic products. **Mechatronics**, v. 24, n. 7, p. 745-762, 2014.

TOULORGE, T.; LAMBRECHTS, J.; REMACLE, J.-F. Optimizing the geometrical accuracy of curvilinear meshes. **Journal of Computational Physics**, v. 310, n., p. 361-380, 2016.

TUEGEL, E. J.; INGRAFFEA, A. R.; EASON, T. G.; SPOTTSWOOD, S. M. Reengineering aircraft structural life prediction using a digital twin. **International Journal of Aerospace Engineering**, v. 11, n. 1, p. 1-14, 2011.

VAISHNAVI, V.; KUECHLER, W. **Design research in information systems - theory and Practice**. New York: Springer US, 2004.

VOGEL-HEUSER, B.; SCHÜTZ, D.; FRANK, T.; LEGAT, C. Model-driven engineering of manufacturing automation software projects – a SysML-based approach. **Mechatronics**, v. 24, n. 7, p. 883-897, 2014.

VON ROSING, M.; WHITE, S.; CUMMINS, F.; DE MAN, H. Business Process Model and Notation—BPMN. In: (Ed.). **The Complete Business Process Handbook**. Boston: Morgan Kaufmann, 2015, p.429-453.

WEI, R.; KOLOVOS, D. S.; GARCIA-DOMINGUEZ, A.; BARMPIIS, K.; PAIGE, R. F. Partial loading of XMI models. In: **Proceedings of the ACM/IEEE 19th International Conference on Model Driven Engineering Languages and Systems**, 2016ACM, p. 329-339.

WEICK, K. E.; ROBERTS, K. H. Collective mind in organizations: Heedful interrelating on flight decks. **Administrative science quarterly**, v. 38, n. 3, p. 357-381, 1993.

WEILKIENS, T. **Systems engineering with SysML/UML: modeling, analysis, design**. Burlington: Morgan Kaufmann, 2011.

WILEY. **INCOSE Systems Engineering Handbook: A Guide for System Life Cycle Processes and Activities**. San Diego: John Wiley & Sons, 2015.

WU, D.; ZHANG, L. L.; JIAO, R. J.; LU, R. F. SysML-based design chain information modeling for variety management in production reconfiguration. **Journal of Intelligent Manufacturing**, v. 24, n. 3, p. 575-596, 2011.

WU, I. C.; HSIEH, S.-H. A framework for facilitating multi-dimensional information integration, management and visualization in engineering projects. **Automation in Construction**, v. 23, n., p. 71-86, 2012.

YASSINE, A. A.; SREENIVAS, R. S.; ZHU, J. Managing the exchange of information in product development. **European Journal of Operational Research**, v. 184, n. 1, p. 311-326, 2008.

ZHANG, H.; WANG, H.; CHEN, D.; ZACHAREWICZ, G. A model-driven approach to multidisciplinary collaborative simulation for virtual product development. **Advanced Engineering Informatics**, v. 24, n. 2, p. 167-179, 2010.

ZHOU, M.; CAO, J. H.; JIANG, G. Z. Design and implementation of data transformation scheme between STEP and XML in CIMS environment. In: **Information Technology and Computer Application Engineering: Proceedings of the International Conference on Information Technology and Computer Application Engineering (ITCAE 2013)**, 2013CRC Press, p. 277-280.

APÊNDICE A

Este apêndice contém o roteiro utilizado para as entrevistas com os *stakeholders* do PDP do TE. As entrevistas foram realizadas com cerca de 15 especialistas, incluindo engenheiros de produto, responsáveis por simulações, profissionais do departamento de Marketing, pós-vendas e manufatura.

Subárea:	Função:
----------	---------

Roteiro para entrevistas com Engenheiros responsáveis pelo atendimento de solicitações de alterações em produtos

1. Quais foram às informações recebidas na abertura da solicitação?
2. Quais documentos foram necessários acessar ou procurar?
3. Qual o motivo da abertura da solicitação?
4. Os requisitos para execução da tarefa foram satisfatórios? Se não, quais as dificuldades encontradas na busca de informações?
5. Como são definidos os prazos e a urgência para a execução da solicitação?
6. Quais áreas/pessoas foram envolvidas entre a abertura da solicitação até sua execução?
7. Como o problema que motivou a solicitação poderia ter sido evitado?
8. Quais critérios são considerados para a aprovação de uma alteração ou desenvolvimento realizado?
9. Quais os procedimentos e normas são utilizados na execução das tarefas?

Figura 100 - Roteiro para entrevistas com *stakeholders*

APÊNDICE B

		Requisitos Cabine																										
		Acessibilidade e folga com componentes de interface	Altura do banco	Largura do banco	Altura do encosto	Inclinação do encosto	Altura do encosto lombar	Força atuação manivelas	Força atuação roda de ajuste	Força atuação alavanca	Ajuste da altura do banco	Ajuste dianteiro	Ajuste Traseiro	Resistencia a esforços mecanico e vibração	Infamabilidade dos materiais	Alcance do pé do operador	Alcance da mão do operador	Resistencia ao atrito pedal	Altura painel de controle	esforço pedais freio	segurança mangueiras e tubos	área livre inspeção	Esforço acionamento alavancas	Ruído interior cabine	Facilidade Ajuste do banco	Temperatura interna	Vibração aplicada ao operador	
Direção de melhoria		▲	X	X	X	X	X	▼	▼	▼	X	X	X	▲	X	▲	▲	▲	X	▼	▲	▲	▼	▼	▲	X	▼	
Pesos Características	106	MTBF												3	3													
	106	Durabilidade												9	3													
	195	Capacidade torque																										
	191	Acomodação dos bancos	5	5	5	5	9	9	9	9	9	3	3	3		5	5		3									
	193	Alcance operador	9	3	5	3	5	3				9	5	5		9	9		9			3						
	281	Visibilidade Operador		9		3	5					9																
	141	Acesso a controles		9								3				9	9		9									
	141	Exposição a vibração													9													9
	166	Exposição a ruído																								9		
	110	Segurança do operador	5				3		3	3	3	5	3	3		3	3	5	3	3	5	5	3	5	9	3	3	9
	175	Esforços do operador							9	9									3		9			9				
	102	Conforto térmico																									9	
	Pesos dos requisitos		3242	2756	1060	1166	2332	1272	2226	2226	1272	3710	1166	1166	2544	636	2756	2756	848	2544	1484	530	636	1484	954	1272	1272	1908

Figura 101 - HoQ2 com requisitos da cabine

ANEXOS

Encontram-se, neste capítulo, anexos referentes, respectivamente, a um exemplo das informações contidas em um arquivo no padrão STEPAP242 (Figura 102) e listas de requisitos relacionadas à pesquisa, contidas na normas NR12 e ISO 26322-1 (Figuras 103 e 104). Além disso, a figura 106 apresenta um recorte do desenho 2D consultado na empresa, com especificações do CBO.

ID	Entity	PMI Representation
5380	datum_system	A
5448	datum_system	A
5495	datum_system	A B C
5542	datum_system	A B C
5589	datum_system	A B C
5625	dimensional_characteristic_representation	Ø35 0 -0.2
5660	dimensional_characteristic_representation	Ø35 +0.2 0
5705	dimensional_characteristic_representation	Ø20 +0.05 -0.10
5750	dimensional_characteristic_representation	Ø20 +0.10 -0.05
5794	dimensional_characteristic_representation	60° ± 0.5°
5852	dimensional_characteristic_representation	Ø34.8-35.2
5894	dimensional_characteristic_representation	Ø34.8-35.2
5935	dimensional_characteristic_representation	Ø25 ± 0.15
5340	flatness_tolerance	Ⓜ 0.2 ▽ [A]
5496	(geometric_tolerance_with_datum_reference)_ (position_tolerance)	⊕ 0.75 A B C
5543	(geometric_tolerance_with_datum_reference)_ (position_tolerance)	⊕ 0.75 A B C
5449	(geometric_tolerance_with_datum_reference)_ (surface_profile_tolerance)	Ⓢ Ⓜ 0.5 A
5590	(geometric_tolerance_with_datum_reference)_ (surface_profile_tolerance)	Ⓢ 1.25 A B C
5381	perpendicularity_tolerance	⊥ 1.5 A
		Expected PMI
		See Help > NIST CAD Models
		Exact match
		Partial match
		Possible match

Figura 103 - Informações do STEPAP242 exportadas pelo SFA

NORMAS	ITEM	DESCRIÇÃO
NR12		Aspectos ergonômicos.
NR12	12.94	As máquinas e equipamentos devem ser projetados, construídos e mantidos com observância aos os seguintes aspectos: a) atendimento da variabilidade das características antropométricas dos operadores; b) respeito às exigências posturais, cognitivas, movimentos e esforços físicos demandados pelos operadores; c) os componentes como monitores de vídeo, sinais e comandos, devem possibilitar a interação clara e precisa com o operador de forma a reduzir possibilidades de erros de interpretação ou retorno de informação; d) os comandos e indicadores devem representar, sempre que possível, a direção do movimento e demais efeitos correspondentes; e) os sistemas interativos, como ícones, símbolos e instruções devem ser coerentes em sua aparência e função; f) favorecimento do desempenho e a confiabilidade das operações, com redução da probabilidade de falhas na operação; g) redução da exigência de força, pressão, prensão, flexão, extensão ou torção dos segmentos corporais; h) a iluminação deve ser adequada e ficar disponível em situações de emergência, quando exigido o ingresso em seu interior.
NR12	12.95	Os comandos das máquinas e equipamentos devem ser projetados, construídos e mantidos com observância aos seguintes aspectos: a) localização e distância de forma a permitir manejo fácil e seguro; b) instalação dos comandos mais utilizados em posições mais acessíveis ao operador; c) visibilidade, identificação e sinalização que permita serem distinguíveis entre si; d) instalação dos elementos de acionamento manual ou a pedal de forma a facilitar a execução da manobra levando em consideração as características biomecânicas e antropométricas dos operadores; e e) garantia de manobras seguras e rápidas e proteção de forma a evitar movimentos involuntários.
NR12	12.96	As Máquinas e equipamentos devem ser projetados, construídos e operados levando em consideração a necessidade de adaptação das condições de trabalho às características psicofisiológicas dos trabalhadores e à natureza dos trabalhos a executar, oferecendo condições de conforto e segurança no trabalho, observado o disposto na NR-17.
NR12	12.97	Os assentos utilizados na operação de máquinas devem possuir estofamento e ser ajustáveis à natureza do trabalho executado, além do previsto no subitem 17.3.3 da NR-17.
NR12	12.98	Os postos de trabalho devem ser projetados para permitir a alternância de postura e a movimentação adequada dos segmentos corporais, garantindo espaço suficiente para operação dos controles nele instalados.
NR12	12.99	As superfícies dos postos de trabalho não devem possuir cantos vivos, superfícies ásperas, cortantes e quinas em ângulos agudos ou rebarbas nos pontos de contato com segmentos do corpo do operador, e os elementos de fixação, como pregos, rebites e parafusos, devem ser mantidos de forma a não acrescentar riscos à operação.
NR12	12.100	Os postos de trabalho das máquinas e equipamentos devem permitir o apoio integral das plantas dos pés no piso.
NR12	12.100.1	Deve ser fornecido apoio para os pés quando os pés do operador não alcançarem o piso, mesmo após a regulação do assento.
NR12	12.101	As dimensões dos postos de trabalho das máquinas e equipamentos devem: a) atender às características antropométricas e biomecânicas do operador, com respeito aos alcances dos segmentos corporais e da visão; b) assegurar a postura adequada, de forma a garantir posições confortáveis dos segmentos corporais na posição de trabalho; e c) evitar a flexão e a torção do tronco de forma a respeitar os ângulos e trajetórias naturais dos movimentos corpóreos, durante a execução das tarefas.
NR12		Riscos adicionais.
NR12	12.106	Para fins de aplicação desta Norma, devem ser considerados os seguintes riscos adicionais: a) substâncias perigosas quaisquer, sejam agentes biológicos ou agentes químicos em estado sólido, líquido ou gasoso, que apresentem riscos à saúde ou integridade física dos trabalhadores por meio de inalação, ingestão ou contato com a pele, olhos ou mucosas; b) radiações ionizantes geradas pelas máquinas e equipamentos ou provenientes de substâncias radiativas por eles utilizadas, processadas ou produzidas; c) radiações não ionizantes com potencial de causar danos à saúde ou integridade física dos trabalhadores; d) vibrações; e) ruído; f) calor; g) combustíveis, inflamáveis, explosivos e substâncias que reagem perigosamente; e h) superfícies aquecidas acessíveis que apresentem risco de queimaduras causadas pelo contato com a pele.
NR12	12.107	Devem ser adotadas medidas de controle dos riscos adicionais provenientes da emissão ou liberação de agentes químicos, físicos e biológicos pelas máquinas e equipamentos, com prioridade à sua eliminação, redução de sua emissão ou liberação e redução da exposição dos trabalhadores, nessa ordem.

Figura 104 - Requisitos norma N12

NORMAS	ITEM	DESCRIÇÃO
NR12	12.108	As máquinas e equipamentos que utilizem, processem ou produzam combustíveis, inflamáveis, explosivos ou substâncias que reagem perigosamente devem oferecer medidas de proteção contra sua emissão, liberação, combustão, explosão e reação acidentais, bem como a ocorrência de incêndio.
NR12	12.109	Devem ser adotadas medidas de proteção contra queimaduras causadas pelo contato da pele com superfícies aquecidas de máquinas e equipamentos, tais como a redução da temperatura superficial, isolamento com materiais apropriados e barreiras, sempre que a temperatura da superfície for maior do que o limiar de queimaduras do material do qual é constituída, para um determinado período de contato.
NR12		Sinalização.
NR12	12.116	As máquinas e equipamentos, bem como as instalações em que se encontram, devem possuir sinalização de segurança para advertir os trabalhadores e terceiros sobre os riscos a que estão expostos, as instruções de operação e manutenção e outras informações necessárias para garantir a integridade física e a saúde dos trabalhadores.
NR12	12.116.1	A sinalização de segurança compreende a utilização de cores, símbolos, inscrições, sinais luminosos ou sonoros, entre outras formas de comunicação de mesma eficácia.
NR12	12.116.2	A sinalização, inclusive cores, das máquinas e equipamentos utilizadas nos setores alimentícios, médico e farmacêutico deve respeitar a legislação sanitária vigente, sem prejuízo da segurança e saúde dos trabalhadores ou terceiros.
NR12	12.116.3	A sinalização de segurança deve ser adotada em todas as fases de utilização e vida útil das máquinas e equipamentos.
NR12	12.117	A sinalização de segurança deve: a) ficar destacada na máquina ou equipamento; b) ficar em localização claramente visível; e c) ser de fácil compreensão.
NR12	12.118	Os símbolos, inscrições e sinais luminosos e sonoros devem seguir os padrões estabelecidos pelas normas técnicas nacionais vigentes e, na falta dessas, pelas normas técnicas internacionais.
NR12	12.119	As inscrições das máquinas e equipamentos devem: a) ser escritas na língua portuguesa - Brasil; e b) ser legíveis.
NR12	12.120	As inscrições e símbolos devem ser utilizados nas máquinas e equipamentos para indicar as suas especificações e limitações técnicas.
NR12	12.121	Devem ser adotados, sempre que necessário, sinais ativos de aviso ou de alerta, tais como sinais luminosos e sonoros intermitentes, que indiquem a iminência de um acontecimento perigoso, como a partida ou a velocidade excessiva de uma máquina, de modo que: a) sejam emitidos antes que ocorra o acontecimento perigoso; b) não sejam ambíguos; c) sejam claramente compreendidos e distintos de todos os outros sinais utilizados; e d) possam ser inequivocamente reconhecidos pelos trabalhadores.

Figura 104 (Cont.) - Requisitos norma NR12

NORMAS	ITEM	DESCRIÇÃO
ISO 26322-1	4.3.1.2	Hand-operated controls shall have minimum clearances in accordance with ISO 4252. This requirement does not apply to fingertip operation controls, such as push-buttons, electric switches.
ISO 26322-1	4.3.1.2	ISO 4252 Table 2: Controls that require an operating force of >150N and engine controls: 50 mm
ISO 26322-1	4.3.1.2	ISO 4252 Table 2: Controls that require an operating force of 80 N to 150 N (other than engine controls): 25 mm
ISO 26322-1	4.3.1.2	For controls that require an operating force of less than 80 N, maintain adequate clearance for operation.
ISO 26322-1	4.3.2.2	Tractors equipped with starter interlocks as per ISO 15077 on only the traction control clutch or combination traction clutch and brake control shall include means to prevent the operator from starting the tractor from the ground while, for example, holding the control(s) disengaged by hand.
ISO 26322-1	4.3.2.3	It shall not be possible to start the engine with the PTO (power take-off) activated. A means shall be provided which prevents the PTO shaft from transmitting torque at engine start-up.
ISO 26322-1	4.3.2.4	Starting the engine shall not move the three-point linkage.
ISO 26322-1	4.3.3.1	External controls for either the front or rear three-point linkage shall operate under either one or the other of the following limitations: – movement of the linkage, as measured at the lower hitch points, shall be limited to a maximum of 100 mm for each activation of the control; – movement of the linkage shall occur only while the control is held in the activation position.
ISO 26322-1	4.3.3.2	External controls shall be located such that the operator can activate them while standing on the ground outside of the hazard zone between the tractor and the implement. This does not apply to external control system measures that eliminate or minimize the risks. For example, a control may be achieved by limiting the maximum rate of travel of the three-point hitch linkage.
ISO 26322-1	4.3.3.3	Provision shall be made to prevent unintentional actuation of control(s).
ISO 26322-1	4.3.3.4	Other arrangements are permitted provided they have an effect at least equivalent to the requirements set out in 4.3.3.1, 4.3.3.2 and 4.3.3.3.
ISO 26322-1	4.3.4.1	The driver shall be able to operate the control(s) from a location which allows the operator to avoid contact with the PTO shaft or the IID (implement input device) and which also allows the operator to verify that no person is in a hazardous location between the tractor and attached implement. The height of control(s) above the ground shall not exceed 2 000 mm.
ISO 26322-1	4.3.4.2	Provision shall be made to prevent unintentional engagement of the PTO clutch. The control or controls shall be clearly identified and shall not be subject to confusion with other external control(s), if provided (e.g. three-point linkage control or controls).
ISO 26322-1	4.3.4.3	The start control shall work according to the “hold-to-run principle” for at least the first 3 s of actuation.
ISO 26322-1	4.3.4.4	Engagement of the PTO using the external control(s) shall occur with no delay greater than that experienced when using the main PTO control.
ISO 26322-1	4.3.4.5	It shall always be possible to shut off the PTO(s) from the operator's seat position as well as from the associated external control(s).
ISO 26322-1	4.10	Adequate hand clearance of 25 mm minimum shall be provided for any manually operated levelling adjustment mechanism(s) on the lift rod(s), throughout the total range of travel of the linkage.
ISO 26322-1	4.7.1	Electrical cables shall be protected if located in potentially abrasive contact with surfaces and shall be resistant to, or protected against, contact with lubricant or fuel. Electrical cables shall be located so that no portion is in contact with the exhaust system, moving parts or sharp edges.
ISO 26322-1	4.7.2	Fuses or other overload protection devices shall be installed in all electrical circuits except for high amperage circuits such as the starter-motor circuit and high-tension spark ignition system. Electrical distribution of these devices between circuits shall prevent the possibility of cutting off all operator alert systems simultaneously.
ISO 26322-1	4.12.2	Batteries, oil reservoirs and coolant systems shall be located, constructed, coated and/or sealed to minimize the risk of spillage that might be injurious to the operator in the event of an overturn.
ISO 26322-1	4.3.5	Pedals shall have an appropriate size, space and be adequately spaced. Pedals shall have a slip-resistant surface and shall be easy to clean. In order to avoid confusing the driver, the pedals (clutch, brake and accelerator) shall have the same function and arrangement as those of a motor vehicle.
ISO 26322-1	4.4.2.3	The foot reach of the operator is defined by a hemisphere of 800 mm radius centred on the seat centreline at the front edge of the cushion and extending downwards, with the seat in its central position. The hand reach of the operator is divided into the spherical volumes A and B, as shown in Figure 3. The spherical centre-point of these volumes is located 60 mm in front and 580 mm above the seat index point (SIP) (see Figure 3). Volume A is formed by a spherical radius of 550 mm, while volume B is the volume between this radius and a spherical radius of 1 000 mm. Within volume A, a minimum clearance of 120 mm between power and inertia-operated and other adjacent parts shall be maintained. Within volume B, a minimum clearance of 25 mm shall be maintained. Within both volumes, a minimum angle of 30° shall be maintained where parts shear against each other. The hand and foot reach for tractors equipped with a cab is limited to those portions of the volumes specified that lie within the cab.
ISO 26322-1	4.4.4	An instructional seat, if provided, shall meet the requirements of ISO 23205.
ISO 26322-1	4.4.4	ISO 23205: 4.1 The instructional seat shall only be fitted on agricultural tractors equipped with an enclosed cab.
ISO 26322-1	4.4.4	Dimensions shall be according Figure 1 from ISO 23205.

Figura 105 - Requisitos Norma ISO 26322-1

NORMAS	ITEM	DESCRIÇÃO
ISO 26322-1	4.4.4	ISO 23205: 4.4 The instructional seat may or may not be padded or cushioned. Its backrest shall also have minimum dimensions according to Figure 1. A non-glazed component at the rear or side of the enclosed cab, or a cab wall, may be used as the backrest, provided the dimensional requirements are met. The backrest may or may not be padded or cushioned.
ISO 26322-1	4.4.4	ISO 23205: 4.5 At least one handgrip of a minimum length of 150 mm, or a handrail, shall be provided in a conveniently located position for use by the trainer, trainee or service person while seated in the instructional seat.
ISO 26322-1	4.4.4	ISO 23205: 4.6 A suitable area shall be provided for the lower extremities of the trainer, trainee or service person seated in the instructional seat such that there is no interference with the operator.
ISO 26322-1	4.4.4	ISO 23205: 4.7 A restraint system shall be provided. The restraint system shall be in accordance with ISO 3776 or other applicable standards.
ISO 26322-1	4.4.4	ISO 23205: 4.8 The instructional seat, with the trainer, trainee or service person seated in it, shall be inside the enclosed cab structure.
ISO 26322-1	4.4.4	ISO 23205: 4.9 A safety sign indicating the hazard of falling from the tractor as well as the required use of the seat belt shall be provided, positioned so as to be in view of the person seated in the instructional seat.
ISO 26322-1	4.4.1.2.4	If parts of the boarding means are moveable, the manual operating force shall not exceed 200 N as the average value when moving from the start to the stop position. The peak(s) shall not exceed 400 N.
ISO 26322-1	4.4.1.2.6	Where, on tracked machines, the track shoes and track pad surfaces are intended to be used as access steps, the design of the track shoes and track pads shall take into account the need for a slip-resistant surface.
ISO 26322-1	4.4.2.1	The operator's workplace, access and exit dimensions shall comply with requirements of ISO 4252. (See Figures 1, 2 and 3)
ISO 26322-1	4.4.2.2	There shall be no shearing or crushing points within hand or foot reach of the operator when seated in the seat provided.
ISO 26322-1	4.14	Hot surfaces which can be reached unintentionally by the operator during normal operation of the tractor shall be covered or insulated. This applies to hot surfaces which are near steps, to handrails, handholds and integral machine parts used as boarding means and which may be inadvertently touched.
ISO 26322-1	4.15	The engine exhaust system shall release the exhaust gas away from the operator and the air inlet of the cabin.
ISO 26322-1	4.17	An easily accessible dry storage place for the operator's manual shall be provided on the tractor.
ISO 26322-1	5.2.1	Safety signs shall be appropriately displayed whenever necessary to alert the operator and others of the risk of personal injury during normal operation and servicing.
ISO 26322-1	5.2.2	Safety signs shall conform to the requirements of ISO 11684.
ISO 26322-1	5.2.3	Instructional signs relating to equipment operation, servicing and care shall have an appearance, especially colour, different from safety signs on the equipment.

Figura 105 (Cont.) - Requisitos Norma ISO 26322-1

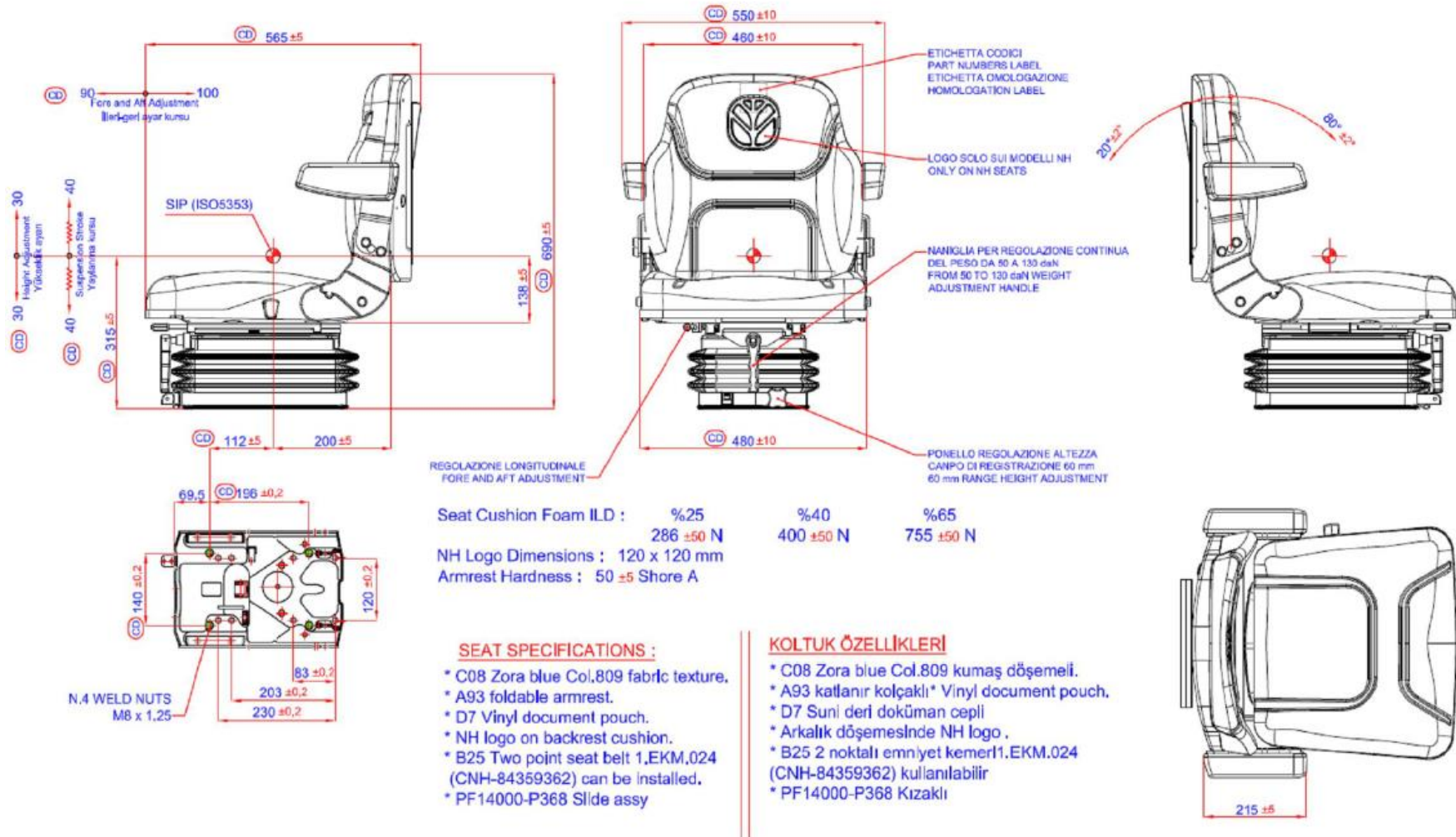


Figura 106 - Desenho CBO