

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

**Sofia Catarina Cravo Dias Russo**

**Aplicação de método de elementos finitos para análise mecânica do equipamento máquina de chave utilizada na mudança de rota em sinalização ferroviária e estudo de nacionalização da caixa e tampa deste equipamento.**

São Carlos  
2016



# **Sofia C C D Russo**

**Aplicação de método de elementos finitos para análise mecânica do equipamento máquina de chave utilizada na mudança de rota em sinalização ferroviária e estudo de nacionalização da caixa e tampa deste equipamento.**

Trabalho de conclusão de curso  
Apresentado à Escola de Engenharia de  
São Carlos da Universidade de São Paulo,  
Orientador: Prof. Dr. Rafael Salomão

São Carlos  
2016

**AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.**

Russo, Sofia Catarina Cravo Dias

R970a

Aplicação de método de elementos finitos para análise mecânica do equipamento máquina de chave utilizada na mudança de rota em sinalização ferroviária e estudo de nacionalização da caixa e tampa deste equipamento. / Sofia Catarina Cravo Dias Russo; orientador Rafael Salomão. São Carlos, 2016.

Monografia (Graduação em Engenharia De Materiais e Manufatura) -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2016.

1. Nacionalização. 2. Máquina de chave. 3. Seleção de materiais. 4. Resistência Mecânica. 5. Elementos Finitos. I. Título.

### Formulário para relatório de defesa de TCC

Relatório de defesa pública de Trabalho de Conclusão de Curso da Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo.

Aluno	Sofia Catarina Cravo Dias Russo	No. USP: 7279564
Orientador ou resp. pela disciplina	Rafael Salomão	No. USP: 6265000
Título do TCC	Aplicação de método de elementos finitos para análise mecânica do equipamento máquina de chave utilizada na mudança de rota em sinalização ferroviária e estudo de nacionalização da caixa e tampa deste equipamento.	
Curso ou Êntase	Engenharia de Materiais e Manufatura	
Disciplina	SMM0325 Trabalho de Conclusão de Curso	
Local da defesa:	EESC	Data de defesa: 14/06/2016

Após declarada aberta a sessão, o(a) Sr(a) Presidente passou a palavra aos examinadores para as devidas arguições. Em seguida, a Comissão Julgadora proclamou o resultado:

Membros da Comissão Julgadora	Vínculo	Sigla Unidade	Nota
Rafael Salomão	Prof. Associado	SMM	8,0
Waidek W B Filho	Prof. Titular	SMM	8,0
Carlos Alberto Fortulan	Prof. Associado	SEM	8,0



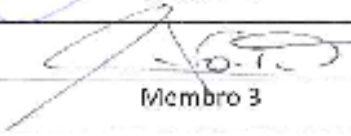
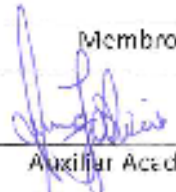
Média = 8,0

Resultado final	<input checked="" type="checkbox"/> Aprovado	<input type="checkbox"/> Necessita de ajustes	<input type="checkbox"/> Reprovado
-----------------	--	---	------------------------------------

#### Observações da Comissão Julgadora

FAZER PEQUENAS ALTERAÇÕES SUGERIDAS PELA BANCA

Eu, Ana Fabricio, Auxiliar Acadêmico, lavrei o presente relatório que assino com os(as) Senhores(as). São Carlos, 14/06/2016

 Membro 1	 Membro 2
 Membro 3	 Membro 4
Orientador(a) ou responsável pela disciplina	Auxiliar Acadêmico



## RESUMO

RUSSO, SOFIA C. C. D. Aplicação de método de elementos finitos para análise mecânica do sistema da máquina de chave utilizada em sinalização ferroviária e estudo de nacionalização da caixa e tampa deste equipamento. Número de folhas do trabalho 61 f. Monografia (Trabalho De Conclusão De Curso) – Departamento de Engenharia de Materiais e Manufatura, Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

Para viabilidade de implantação do sistema de sinalização ferroviário para VLTs (Veículo Leve Sob Trilhos) na América do Sul tem-se dependência do financiamento à baixas de juros. Contudo o equipamento de alteração de rota na via tem apresentado grande impacto no peso total do sistema de sinalização e foi adquirido integralmente de empresas situadas fora do Brasil, descumprindo as regras estabelecidas para liberação do empréstimo. O objetivo deste trabalho foi analisar a possibilidade de nacionalização parcial da máquina de chave preservando-se custo acessível, alta confiabilidade de resistência mecânica e mão de obra local. A máquina de chave tem aplicação no sistema ferroviário como elemento de alta segurança, sendo responsável pelo direcionamento efetivo dos vagões de acordo com a rota traçada pelo programa operacional baseado em lógica computacional. A análise mecânica deste sistema composto por tampa, caixa e conjunto eletromecânico foi realizada pelo software *Ansys 15.0* baseado na análise de elementos finitos, tendo o resultado de tensão de tração normal comparado à resistência à tração uniaxial referenciada em Handbook. A verificação de custo foi feita utilizando diagrama de mérito de referência Michael Ashby. A viabilidade de nacionalização da caixa e tampa foi investigada a partir das matérias-primas disponíveis no Brasil que atendessem às necessidades mecânicas de aplicação associadas à mão de obra especializada do local de instalação, visto que o fornecimento do conjunto interno eletromecânico foi mantido de acordo com a provisão atual (Alemanha).

**Palavras-chave:** Nacionalização. Máquina de Chave. Seleção de Materiais. Resistência mecânica. Elementos Finitos.





## ABSTRACT

RUSSO, SOFIA C.C.D. Application of the Finite element method for the mechanical analysis of the switch machine equipment used in the change of route in railway signaling and study of the partial nationalization of the equipment. 53f. Monograph (Coursework final) - Department of Materials and Manufacture Engineering, School of Engineering of São Carlos, University of São Paulo, São Carlos, 2016.

The feasibility of the implementation of the LRT (Light Rail Transit) rail signaling system, commonly known as tramway, in South America depends on financings at low interest rates. However, the equipment has shown to highly impact on the total weight of the signaling system and has been purchased by foreign companies, which does not comply with the rules established for the release of the loans. This study addresses the possible partial nationalization of the switch machine, so that affordable costs, high mechanical strength reliability and local labor can be preserved. The machine can be applied to the railway system as a high-security element responsible for the effective direction of the train cars according to the route mapped by the operational program based on computational logic. The mechanical analysis of the system composed of a cover, an "Earth Box" and electromechanical assembly was performed by Ansys 15.0 software based on the finite element analysis and the result of the normal stress was compared to the uniaxial tensile strength referenced in Handbook. The costs were analyzed by the Ashby's reference selection graph. The viability of the nationalization of both cover and "Earth Box" was investigated from brazilian raw materials that meet the mechanical application requirements associated with the skilled labor of the installation site. The supply of electromechanical internal assembly was maintained in accordance with the current provision (Germany).

**Key-words:** Nationalization. Switch Machine. Material Selection. Mechanical Resistance. Finite elements.

## LISTA DE TABELA

<i>Tabela 1 Propriedades mecânicas da resina Epóxi e Poliéster.....</i>	<i>22</i>
<i>Tabela 2 Propriedades da resina de poliéster isoftálica e ortoftálica. ....</i>	<i>23</i>
<i>Tabela 3 Propriedades da resina epóxi. ....</i>	<i>24</i>
<i>Tabela 4 Propriedades mecânicas de algumas resinas. ....</i>	<i>24</i>
<i>Tabela 5 Propriedade das fibras de fibra antes do processamento .....</i>	<i>25</i>
<i>Tabela 6 Propriedades da fibra de carbono CF 130.....</i>	<i>26</i>
<i>Tabela 7 Resultados de ensaios realizados com e sem vibração durante a cura do concreto. ....</i>	<i>27</i>
<i>Tabela 8 Custo unitário comparativo entre concreto reforçado com fibra polimérica e concreto Portland. ....</i>	<i>28</i>
<i>Tabela 9 Efeito das ramificações nas propriedades mecânicas do polietileno. ....</i>	<i>29</i>
<i>Tabela 10 Propriedades do alumínio. ....</i>	<i>30</i>
<i>Tabela 11 Propriedades do aço baixo carbono e do aço inoxidável. ....</i>	<i>31</i>
<i>Tabela 12 Propriedades do aço baixo carbono e do aço inoxidável. ....</i>	<i>39</i>
<i>Tabela 12 Deformação total para as espessuras da tampa de 25 mm, 50 mm e 75 mm. ....</i>	<i>41</i>
<i>Tabela 13 Tensão normal (MPa).....</i>	<i>42</i>
<i>Tabela 14 Deformação total para as espessuras da caixa de 25 mm, 50 mm e 75 mm. ....</i>	<i>43</i>
<i>Tabela 15 Tensão Normal (MPa) .....</i>	<i>44</i>
<i>Tabela 16 Dados de referência .....</i>	<i>47</i>
<i>Tabela 17 Coeficiente de segurança dos materiais analisados para a tampa. ....</i>	<i>48</i>
<i>Tabela 18 Coeficiente de segurança dos materiais analisados para a caixa. ....</i>	<i>49</i>
<i>Tabela 19 Índice de nacionalização em peso do sistema da máquina de chave. ....</i>	<i>49</i>

## LISTA DE FIGURA

Figura 1 Número de carros de passageiros no Brasil entre 1971 e 2016. ....	15
Figura 2 Representação da máquina de chave de tramway. ....	17
Figura 3 Máquina de chave “Electro-hydraulic 61”. ....	18
Figura 4 Linha de VLT - Strasbourg France. ....	18
Figura 5 Classificações das resinas mais utilizadas em compósitos. ....	22
Figura 6 Sistema completo utilizado na simulação de elementos finitos. ....	33
Figura 7 Desenho da tampa utilizado na simulação de elementos finitos. ....	35
Figura 8 Desenho da caixa utilizada na simulação de elementos finitos. ....	36
Figura 9 Resistência e custo relativo para metais e suas ligas. ....	38
Figura 10 Resistência e custo relativo para polímeros. ....	38
Figura 11 Resistência e custo relativo para cerâmicas. ....	38
Figura 12 Resistência e custo relativo para compósitos. ....	38
Figura 13 Deformação total na tampa de 25 mm com polietileno, máxima deformação no centro de 2,43 mm. ....	41
Figura 14 Deformação total da caixa de espessura 25 mm em polietileno. ....	43
Figura 15 Tensão normal na caixa de titânio espessura 25 mm. ....	45
Figura 16 Tensão normal na caixa de titânio espessura 50 mm. ....	45
Figura 17 Tensão normal na caixa de concreto armado espessura 25 mm. ....	46
Figura 18 Tensão normal na caixa de concreto armado espessura 50 mm. ....	46
Apêndice 19 Comparação entre as tensões normais obtidas na simulação da caixa em relação ao limite de resistência à tração inferior e superior. ....	58
Apêndice 20 Comparação entre as tensões normais obtidas na simulação da caixa em relação ao limite de resistência à tração inferior e superior. ....	59
Apêndice 21 Comparação entre as tensões normais obtidas na simulação da tampa em relação ao limite de resistência à tração inferior e superior. ....	60
Apêndice 22 Comparação entre as tensões normais obtidas na simulação da tampa em relação ao limite de resistência à tração inferior e superior. ....	61

## SUMÁRIO

1. Introdução .....	14
2. Revisão de literatura .....	20
2.1. Compósitos.....	20
2.1.1. PRFV e PRFC.....	20
2.1.1.1. Resinas .....	21
2.1.1.2. Fibras .....	24
2.1.2 Concreto armado reforçado com fibra polimérica .....	26
2.2. Polímero - Polietileno.....	28
2.3. Metais .....	29
2.3.1. Alumínio .....	29
2.3.2. Aço .....	30
2.3.3. Titânio .....	31
3. Metodologia.....	32
3.1. Considerações pra cálculo de esforços .....	32
3.1.1. Tampa.....	34
3.1.2 Caixa.....	35
3.2. Gráfico de custo relativo versus resistência.....	36
3.3. Materiais analisados .....	38
3.4. Financiamento - BNDES.....	39
4. Resultados e Discussão .....	40
4.1 Simulação do <i>Ansys 15.0</i> .....	40
4.1.1 Tampa .....	40
4.1.2 Caixa .....	42
4.2 Seleção de materiais .....	47
4.2.1 Tampa .....	47
4.2.2 Caixa .....	48
4.3. Análise de financiamento BNDES (Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social) .....	49

5. Conclusões.....	50
Bibliografia.....	52
ANEXO.....	57
APÊNDICE .....	58

# 1. Introdução

Atualmente existem dois projetos de VLT (Veículo Leve sob Trilhos) em andamento no sudeste, o de Santos que ligará no primeiro trecho o Terminal Barreiros em São Vicente ao porto de Santos e no segundo trecho a praia ao centro da cidade. O segundo projeto ocorre no Rio de Janeiro que liga a área central de negócios à zona portuária, com conclusão prevista para antes dos jogos olímpicos que ocorrem em agosto de 2016. (EMTU, 2016) (CONCESSIONÁRIA DO CLT CARIOCA S/A, 2016)

A capacidade operacional do VLT de Santos é de 220 mil passageiros por dia, e o do Rio de Janeiro de 300 mil. As empresas operadoras de transporte ferroviário de passageiros hoje no Brasil são a CBTU, CPTM, Metro DF, MetroRio, MetroSP, SuperVia, Trensurb, Metrofor, CCR Metrô Bahia e Vale. Dentre essas, apenas as seis primeiras divulgam o número de carros de passageiros disponível para uso. (ABIFER, 2016)

Entre 1960 e 1990 o governo militar buscou a consolidação da malha ferroviária através de poucas empresas públicas que buscavam eliminar ramais que não dessem retorno econômico e implantação de projetos estratégicos. As locomotivas a vapor entram em desuso, o que justifica a baixa de carros de passageiro nesse ano de acordo com o gráfico acima. Em 1971 foi criada a FEPASA (unindo as empresas estaduais Paulista, Sorocabana, Mogiana, Araraquarense e São Paulo - Minas), momento no qual passou a ter o registro observado na figura 1. (ANTF, s.d.)

Entre 1979 e 1989 as malhas desativadas abrangeram grande parte do transporte de passageiros, havendo crescimento no transporte ferroviário de cargas com a inauguração de linhas como a E. F. Carajás na região norte e E. F. Trombetas que visavam o escoamento de minério de ferro e bauxita. (ANTF, s.d.)

Entre 1996 e 1998 houve a privatização das concessionárias ferroviárias com a extinção das poucas linhas em operação, restando apenas o Trem de Prata (Rio - São Paulo). Desde então transporte de passageiros veio crescendo, atingindo seu auge em 2016 com 473 carros em operação. (ANTF, s.d.)

A matriz de transporte de cargas brasileira é predominantemente rodoviária, sendo que o transporte ferroviário representa apenas 25% do volume deslocado. No transporte de passageiros por via férrea o volume é ainda menor, representando

apenas 1,4%. A maior concentração da malha ferroviária está nas regiões Sul, Sudeste e Nordeste, atendendo também parte do Centro-Oeste e Norte. (ARAÚJO, 2008) (LIMA, 2013)

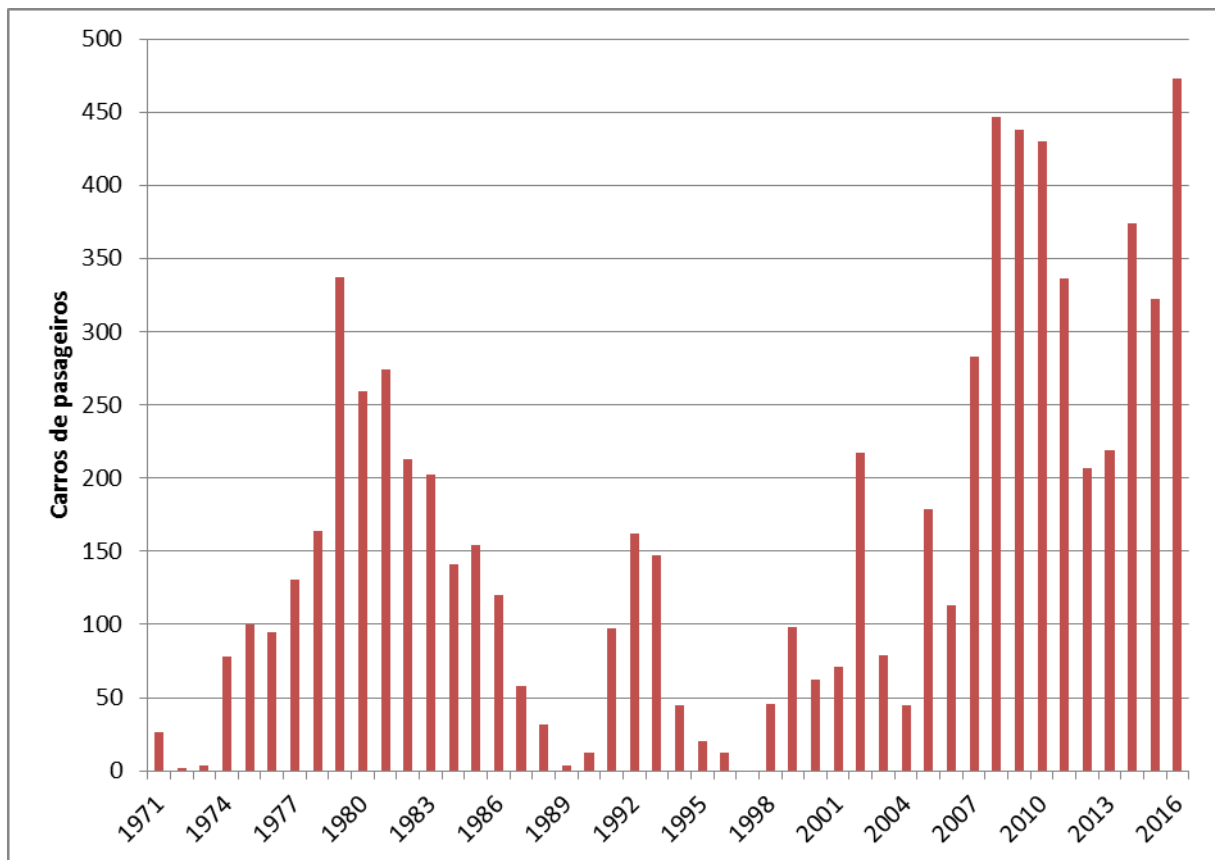


Figura 1 Número de carros de passageiros no Brasil entre 1971 e 2016. (ABIFER, 2016)

O modal ferroviário tem alto investimento inicial e custo fixo elevado de manutenção, porém apresenta grande eficiência energética viabilizando o transporte de itens volumosos e pesados de baixo valor agregado por grandes distâncias. Essa característica se torna notável em países de grande extensão territorial como o Brasil. (LIMA, 2013)

No transporte de passageiros tem-se um investimento inicial ainda mais alto pelo maior nível de segurança exigido, tornando a estrutura da sinalização complexa, impondo previsão de um range maior de acontecimentos possíveis, controle na localização das composições e correta movimentação. Os sistemas de solução para sinalização no transporte ferroviário se subdividem em: design do sistema (lógica computacional do software), centros de controle operacional (CCO), informação ao passageiro, equipamentos de via, segurança nas composições, plataformas e estações.

Pelo alto investimento inicial da matriz de transporte ferroviário, o financiamento à baixa taxa de juros é essencial para viabilizar a venda. Hoje no Brasil o principal instrumento de desenvolvimento do governo é o BNDES (Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social), que busca promover o desenvolvimento sustentável e competitivo no país. (Anon., 2015)

O BNDES foi fundado em 1952, sendo hoje em dia o principal instrumento do governo federal para financiamento em longo prazo e investimento nos segmentos da economia brasileira. Em situações de crise, como a que estamos vivendo, o BNDES também tem fundamental atuação anticíclica, auxiliando na retomada do crescimento da economia e buscando corrigir a lógica de mercado, agindo de forma a realocar recursos para setores prioritários que podem não ser tão lucrativos para a iniciativa privada. O financiamento realizado com baixas taxas de juros diferencia seu financiamento em comparação aos oferecidos por bancos privados. (Anon., 2015) (FILHO & COSTA, 2012)

Um dos mais importantes critérios do BNDES para conceder empréstimo para sistemas e equipamentos (descrição compatível com a sinalização ferroviária) é a comprovação de que o sistema completo atende ao índice de nacionalização acima de 60% em valor e peso. No atual sistema de sinalização do VLT, este índice está abaixo dos 60% para o critério de peso, sendo necessário encontrar alternativas de nacionalização de seus componentes. (Anon., 2015)

O sistema completo é constituído pelos módulos centrais de processamento, telas LCD, alto-falantes, máquina de chave e sinaleiro. Dentre esses itens apenas o sinaleiro e a estrutura do módulo central são nacionais, atingindo 35% do índice de nacionalização, sendo inferior à porcentagem exigida pelo financiador. A máquina de chave é elemento abundante na via que aparece em todas as bifurcações, além de ser elemento representativo em peso compondo 40% de peso do total do sistema. Cada máquina de chave pesa em torno de 500 Kg, divididos em aproximadamente 150 Kg no conjunto interno eletromecânico e 350 Kg da tampa de aço inox somada à caixa (representada na figura 3). O mecanismo interno é complexo por envolver cálculos elétricos, mecânicos e homologação de segurança internacional, o que tornaria seu processo de nacionalização mais complicado. A tampa e a caixa são elementos mecânicos, o que proporciona alternativas de nacionalização de maior viabilidade e menor custo.



A bifurcação em uma via férrea deve ser composta pela máquina de chave para que o sistema possa controlar a direção que o trem irá tomar, coordenando e regulando o andamento das composições. Com a aproximação do comboio frente à bifurcação o software programa a rota e envia o sinal para o atuador da máquina de chave, que movimenta a posição da agulha e orientando o trem para a rota planejada. (VOSSLOH COGIFER, s.d.) (VOSSLOH COGIFER, 2014)

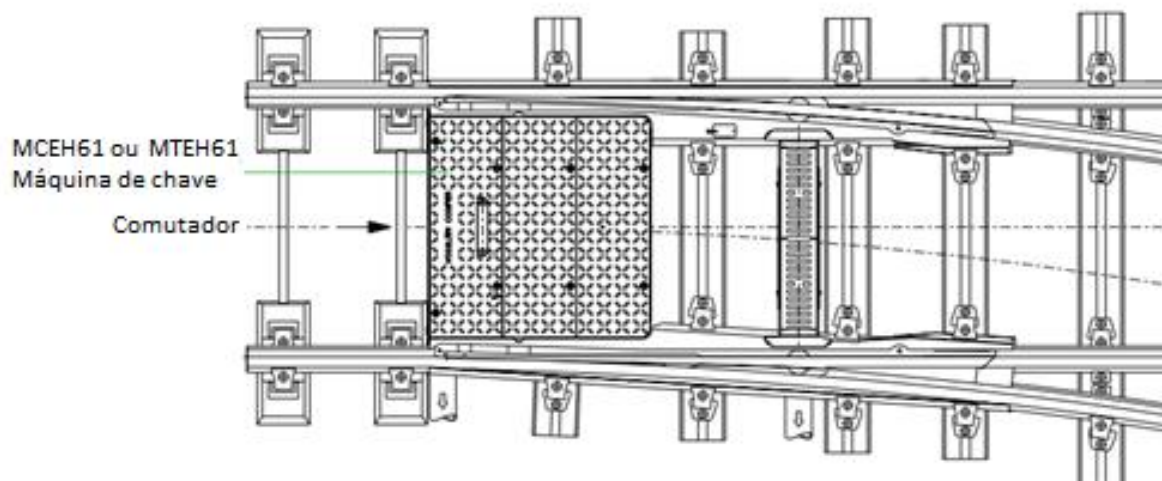


Figura 2 Representação da máquina de chave de tramway. (VOSSLOH COGIFER, s.d.)

Na figura 4 da máquina de chave “*Electro-hydraulic 61*” fabricada pela empresa *Vossloh*, pode-se observar a caixa, a tampa em aço inoxidável e o conjunto interno eletromecânico, formando a unidade do equipamento. A montagem é feita entre os trilhos (Figura 4) e o acionamento do interruptor é através de peças de interface que são acoplados aos trilhos de comutação.

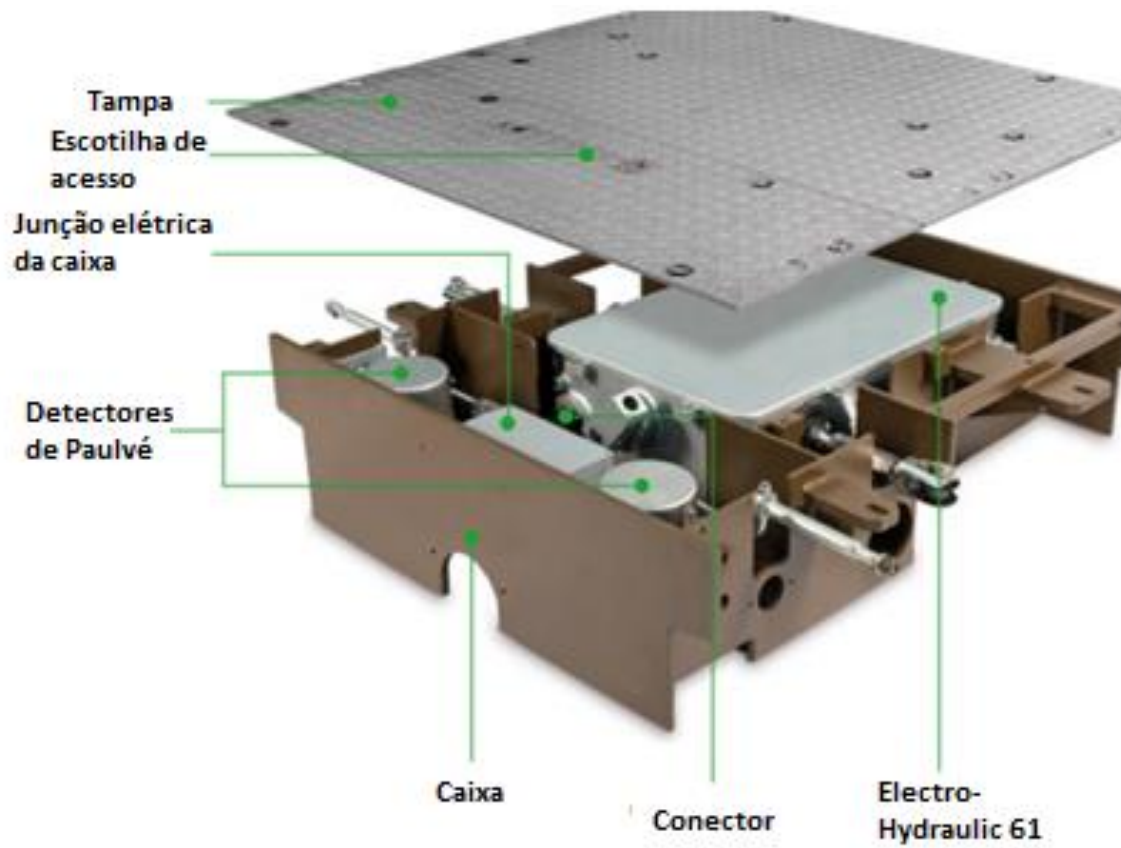


Figura 3 Máquina de chave “*Electro-hydraulic 61*”. (VOSSLOH COGIFER, s.d.)



Figura 4 Linha de VLT - Strasbourg France. (VOSSLOH COGIFER, s.d.)

O fornecimento do conjunto interno eletromecânico nesse trabalho foi mantido de acordo com a provisão vigente (Alemanha). A análise da viabilidade de nacionalização da tampa e da caixa foi feita a partir da investigação de matérias-primas nacionais disponíveis que atendam às necessidades mecânicas de aplicação associada à mão de obra especializada do local de instalação.

## 2. Revisão de literatura

Nos itens que seguem serão apresentadas as características de possíveis materiais para aplicação no sistema como propriedades mecânicas, temperatura de trabalho, resistência à corrosão entre outros. Foram escolhidos materiais entre metais, polímeros, cerâmicas e compósitos buscando dentre esses aqueles que poderiam apresentar melhor relação custo benefício.

A utilização de materiais para elemento estrutural requer prévia pesquisa com base em referências bibliográficas para análise de comportamento mecânico, restrições de uso e manufatura. Os dados levantados serão utilizados posteriormente para comparação com os valores obtidos no modelo numérico tridimensional.

A modelagem numérica utilizada foi o *Ansys 15.0*, elaborado com base no Método De Elementos Finitos (MEF). Este método de análise multiaxial de tensão e deformação oferece a utilização de modelos matemáticos analíticos complexos, que associado a alta capacidade computacional hoje disponível se torna um recurso acessível. (KIRCHOF & NETO, 2005)

### 2.1. Compósitos

#### 2.1.1. PRFV e PRFC

PRFV (Polímero Reforçado com Fibra de Vidro) e PRFC (Polímero Reforçado com Fibra de Carbono) são os compósitos tratados como alternativas de materiais analisados no sistema tampa-caixa. Neles as matrizes escolhidas para possível aplicação são resina epóxi e poliéster.

A produção do compósito pode ser por laminação manual quando se tem baixa exigência de volume de produção, laminação por projeção (*spray up*) no caso de reforço do tipo *roving*, pultrusão (se assemelha ao processo de extrusão), dentre outros processos não convencionais. (JÚNIOR, 2007)

A forma do reforço utilizado no compósito deve considerar o esforço no qual o produto estará sujeito, podendo assim dimensionar o material de acordo com a direção de maior resistência coincidindo com a direção do esforço a ser suportado. No caso de elementos lineares como vigas é ideal o reforço do tipo *roving* e para bidimensionais como coberturas, reforços como mantas e tecido. No caso de

elementos de reforço bidirecionais ou unidirecionais o material será essencialmente anisotrópico. (JÚNIOR, 2007) (OTA, 2004)

As ações térmicas e de fluência têm grande importância no compósito, devendo ser analisados. Pelo comportamento visco-elástico da matriz polimérica conforme a temperatura de trabalho se aproxima da  $T_g$ , o comportamento estará na "Zona de Transição entre Regimes", passando do comportamento elasto-plástico para o visco-plástico. O comportamento tem dependência da temperatura, tempo e das propriedades dos materiais constituintes do compósito. (JÚNIOR, 2007)

As matrizes tratadas nesse trabalho são a epóxi e poliéster. Comparativamente a resina epóxi é mais cara, porém apresenta melhor resistência à umidade, menor encolhimento durante a cura (cerca de 3%), temperatura máxima de utilização superior e boa aderência às fibras. (OTA, 2004) (CHAWLA, 2012)

### **2.1.1.1. Resinas**

As resinas mais utilizadas em compósitos se classificam entre termofixo, modificada com pixe e resinas do monômero metilmetacrilato (Figura 5). Para a escolha da resina deve-se levar em conta a aplicação, temperatura de serviço e ambiente, método de fabricação, condição de cura e propriedades requeridas. O uso de resinas de baixa viscosidade é requerido para maior aderência na superfície da fibra à resina e completa impregnação, que acarreta em melhor transferência de cargas. (CLARKE, 1996)

O controle do processo de cura é essencial para que se tenham propriedades mecânicas esperadas. A reação de cura é exotérmica causando aumento de temperatura, que se em excesso pode gerar trincas internas e danificar o compósito. Prevenção de amolecimento de calor, o que limita a deformação, reduzindo a difusão de umidade e minimizando efeitos plastificação. (CLARKE, 1996)

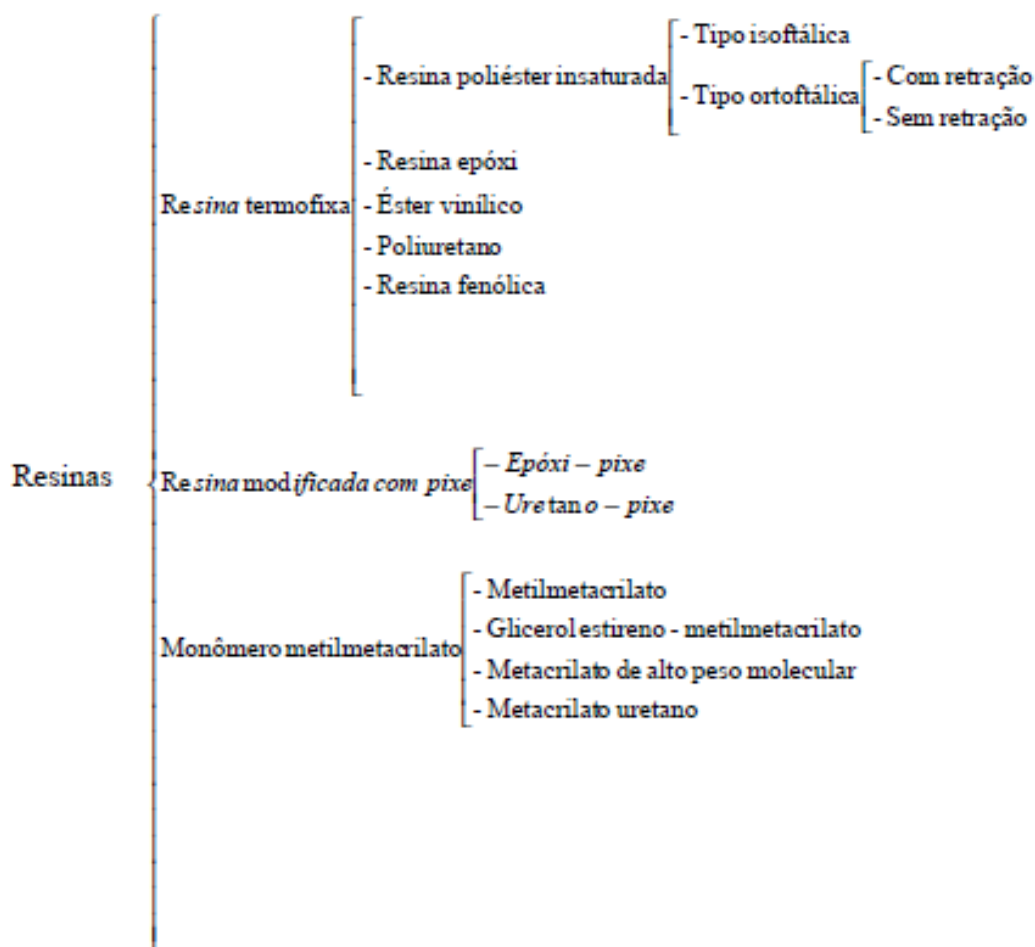


Figura 5 Classificações das resinas mais utilizadas em compósitos. (BEBER, 2003)

Tabela 1 Propriedades mecânicas da resina Epóxi e Poliéster. (CHAWLA, 2012)  
(BEBER, 2003) (FIBERTEK, s.d.)

	Poliéster	Epóxi
Resistência à tração (MPa)	20 - 100	55 - 130
Módulo de elasticidade (GPa)	2,1 - 4,1	2,5 - 4,1
Deformação na ruptura (%)	1 - 6	1 - 9
Resistência à flexão (MPa)	125	131
Peso específico (kN/m <sup>3</sup> )	9,8 - 14,2	10,8 - 12,7
Custo da fibra (US\$/Kg)	16	20
Temperatura de uso (°C)	80	150

As resinas analisadas são a epóxi e a poliéster. Comparando as temperaturas de trabalho das resinas, a epóxi resiste até 150°C enquanto a de poliéster resiste até 80°C, como pode ser observado na Tabela 1.

#### 2.1.1.1.1. Resina de Poliéster

A resina ortoftálica comparada à resina epóxi pode apresentar custo 20% mais baixo, tendo como inconveniente certa retração que impõe limitações de uso. Para áreas de menor demanda em aplicações de uso geral, a resina de poliéster ortoftálica deve ser considerada pelas boas propriedades mecânicas, moderada capacidade de temperatura de serviço e resistência química. (CLARKE, 1996) (GORNINSKI, 2002)

A resina de poliéster isoftálica tem resistência superior à água, química e ao calor. As propriedades mecânicas são superiores quando comparada a ortoftálica, apresentando maior alongação em ruptura apesar de sua estrutura mais rígida, porém tem um custo mais elevado em aproximadamente 30% (trinta por cento). (CLARKE, 1996) (FIBERTEK, s.d.)

Uma alternativa frente ao custo é combinar a resina ortoftálica com aditivos termoplásticos de baixa viscosidade, eliminando a retração e baixando em 25% (vinte e cinco por cento) o valor agregado. A diferença de comportamento pode ser observada na tabela 3. (GORNINSKI, 2002)

Tabela 2 Propriedades da resina de poliéster isoftálica e ortoftálica. (GORNINSKI, 2002)

	Resina poliéster Isoftálica	Resina poliéster Ortoftálica
Resistência à tração (MPa)	24,95+-1,28	17,23+- 0,63
Viscosidade Brookfield a 25°C, 60 RPM (cp).	400-650	250-350
Módulo de elasticidade em tração (MPa)	3200	2400

A partir dos dados obtidos no estudo citado, é possível perceber uma tendência de crescimento da resistência na flexão quando o percentual de resina de poliéster é elevado e o resultado superior da resina isoftálica comparada à ortoftálica. (GORNINSKI & KAZMIERCZAK, 2008)

### 2.1.1.1.2 Resina Epóxi

A resina epóxi é um polímero termofixo de alta durabilidade que apresenta bom comportamento às solicitações de cisalhamento em altas temperaturas de trabalho. (GORNINSKI, 2002) (CLARKE, 1996)

Dentre os tipos de resina epóxi disponíveis no mercado a mais comum é a Diglicidil éter de Bisfenol A (DGEBA). Mesmo com o custo elevado, a resina à base de epóxi é muito utilizada por apresentar baixa viscosidade e grupos polares que permite adequada impregnação das fibras do compósito, a baixa volatilidade durante a cura, retração reduzida (aproximadamente 3%) que evita concentração de tensões na interface com as fibras. (SARAIVA, et al., 2013) (SANTOS, 2013)

Tabela 3 Propriedades da resina epóxi. (MENEGETTI, et al., 2008)

Formulação Epóxi (Araldite LY 1564 e Aradur 955)	
Resistência à tração (MPa)	106
Deformação última (%)	6,5 - 7,5
Módulo de elasticidade (MPa)	2600 - 2800

### 2.1.1.2. Fibras

A eficiência do compósito está diretamente relacionada à capacidade de transmissão de esforços da matriz para as fibras. Para melhores resultados se deve ter cuidado com a preparação da superfície do substrato, na aplicação do compósito, da escolha do compósito, nas características do material adesivo aplicado entre a matriz a o reforço e da direção do reforço em relação à carga que o material será aplicado. (SANTOS, 2003) (CLARKE, 1996)

Tabela 4 Propriedades mecânicas de algumas resinas. (BEBER, 2003) (FIBERTEK, s.d.) (CHAWLA, 2012)

	Vidro-E	Carbono elevado módulo	Carbono elevada resistência
Tensão de ruptura (MPa)	2400-3500	2740-5490	4300-4900
Módulo de elasticidade (GPa)	70-85	294-329	230-240
Custo da fibra (US\$/Kg)	2	15-22	90



### 2.1.1.2.1. Fibras de vidro

As fibras de vidro se dividem em duas categorias, quem apresentam os seguintes comportamentos: módulo de elasticidade próximo a 70 GPa e resistência à tração na faixa de 1000-2000 MPa; módulo em torno de 85 GPa e resistência à tração entre 2000-3000 MPa. (OTA, 2004) (SANTOS, 2003) (FROLOV, et al., 1971) Os reforços podem ser classificados em: *E-glass*, *C-glass* e *ECR-glass*. A fibra *E-glass* devem ser utilizadas quando a maior resistência à tensão e a eletricidade forem requeridas, sendo que não oferece resistência a álcalis, sofre ruptura por fluência quando submetida a altos níveis de tensão; *C-glass* apresentam melhor resistência química; *ECR-glass* não contém boro, é resistente ao ataque químico e tem propriedades similares ao é *E-glass* podendo ser usado como alternativa. (CLARKE, 1996) (MENEGETTI, et al., 2007)

Tabela 5 Propriedade das fibras de fibra antes do processamento (CLARKE, 1996)

	E-glass	C-glass	ECR-glass
Resistência à tração N/mm <sup>2</sup> (22°C)	3400	3000	3300
Módulo de elasticidade kN/mm <sup>2</sup> (22°C)	72	69	72
Elongação %	4.8	4.8	4.8
Coef. de expansão térmica (10 <sup>-6</sup> /°C)	5.0	7.2	5.9

Quando comparada à fibra de carbono tem propriedades inferiores, porém esta se torna interessante pelo baixo custo. A fibra de vidro é caracterizada pela alta resistência, módulo de elasticidade e peso específico moderado e baixa condutividade térmica. (2003) (MENEGETTI, et al., 2007)

### 2.1.1.2.2. Fibras de carbono

O uso de fibras de carbono se consolidou no mercado em estruturas civis através da comercialização de barras, cordoalhas e cabos de PRFC, existindo também a utilização através de reforços colados externamente à estrutura de concreto. Seu uso é interessante por apresentar alta resistência e baixo peso prevenir além de resistir à ambientes corrosivos. (MENEGETTI, et al., 2007) (GARCEZ, et al., 2012)

Fibras de carbono têm suas propriedades controladas pela estrutura molecular e pelos defeitos, podendo ter alto módulo de elasticidade ou grande

resistência à tração. Apresenta baixo coeficiente de expansão térmica, resistência ao ataque químico e maior vida à fadiga. Entre todos os compósitos de polímero reforçado com fibra, os de fibra de carbono são os menos susceptíveis à falha por fadiga. (MENEGETTI, et al., 2008) (SANTOS, 2003)

As fibras de carbono são fabricadas através da pirólise de fibras orgânicas em atmosfera inerte. Dentre as matérias-primas utilizadas, as que obtiveram melhor resultado foram *rayon*, poliacrilonitrila e piche. Com o *rayon* a produção se dá acima de 2800°C esticando as fibras muito além do original. Com a poliacrilonitrila a produção teve redução de custo e melhoria nas propriedades físicas. Na terceira geração de fibras de carbono o piche foi utilizado como matéria prima pelo baixo custo quando comparado ao *rayon* e à poliacrilonitrila. (BEBER, 2003)

Tabela 6 Propriedades da fibra de carbono CF 130. (MENEGETTI, et al., 2007)

Carbono (CF 130)	
Resistência à tração (MPa)	3400
Módulo de elasticidade (MPa)	227
Deformação última (%)	15

### 2.1.2 Concreto armado reforçado com fibra polimérica

O concreto armado é largamente aplicado na construção civil em lajes, pilares e vigas. O sistema apresenta bom comportamento pela estrutura de aço ter uma boa resposta aos esforços de tração enquanto o concreto responde bem à compressão. O coeficiente de dilatação térmica dos dois materiais é próximo, mantendo-os unidos mesmo com mudanças bruscas de temperatura. (KIRCHOF & NETO, 2005) (JÚNIOR, s.d.)

A durabilidade da estrutura está ligada à qualidade do material utilizado no concreto, correta dosagem, procedimento de produção, adequada estimativa de agressividade ambiental e especificação. O método de recobrimento das armaduras deve utilizar corretamente os espaçadores e realizar avaliação prévia de vibração do local. (ANDRADE, 1997) (MENEGETTI, et al., 2008)

A matriz de concreto realiza a proteção do reforço de aço contra a oxidação por recobrir a superfície da armadura, proporcionando um ambiente na a formação da camada inibidora em torno da armadura. Problemas estruturais que causem

fissuramento do concreto são críticos pela entrada de água e agentes agressivos para o interior da massa de concreto, ocorrendo o aumento significativo da corrosão da armadura de aço. (ANDRADE, 1997) (JÚNIOR, s.d.)

Durante a cura do cimento deve-se promover a hidratação adequada, procurando máxima saturação e controle de temperatura. A vibração no ambiente onde irá ocorrer a cura deve ser analisada, podendo influenciar nas propriedades mecânicas do material final como se pode observar no resultado de ensaios da tabela abaixo. (CCR, 2010)

Tabela 7 Resultados de ensaios realizados com e sem vibração durante a cura do concreto. (CCR, 2010)

	Cura em Repouso (R)	Cura em ambiente com vibração (V)
Resistência à tração (MPa)	35,3	31,85
Módulo de elasticidade (GPa)	2,8	2,3

O concreto pode ter adição de fibras poliméricas visando a melhora de suas propriedades mecânicas e minimizando a propagação de fissuras. As primeiras investigações do concreto com fibra de vidro propuseram substituir as armações de aço, porém devido ao menor módulo de elasticidade três vezes menor da fibra de vidro implicou na deformação demasiada da estrutura, devendo ser utilizado em complemento ao reforço de aço. (HIGUERO, 2010)

Matrizes de cimento com o reforço de fibras poliméricas descontínuas e aleatoriamente distribuídas não sobrepõe esforços de tração como armaduras contínuas de aço, porém controlam a propagação de fissuras pelo aumento de absorção de energia (tenacidade), melhorando o comportamento do compósito após a ruptura da matriz. (TANESI & AGOPYAN, 1997) (OTA, 2004)

A resistência química do concreto reforçado com fibra polimérica ou cerâmica em ambientes agressivos é muito superior quando comparada ao concreto reforçado com aço. A durabilidade dessas estruturas é aumentada consideravelmente com menor conteúdo alcalino. (FROLOV, et al., 1971) (OTA, 2004)

O processo de produção do concreto reforçado com fibra polimérica se assemelha ao do cimento Portland. O custo unitário com mesma resistência mecânica do compósito de concreto reforçado com fibra polimérica é 15% (quinze

por cento) superior quando comparado ao concreto Portland. (GORNINSKI, 2002) (GORNINSKI & KAZMIERCZAK, 2008) (CLARKE, 1996) (JÚNIOR, 2007)

Tabela 8 Custo unitário comparativo entre concreto reforçado com fibra polimérica e concreto Portland. (GORNINSKI & KAZMIERCZAK, 2008)

	Concreto reforçado com fibra polimérica	Concreto Portland
Custo (R\$)	2094	1100
Processamento (R\$)	100	100
Gastos indiretos (R\$)	35	35
Mão de obra (R\$)	32,7	707
Total (R\$)	2261	1942

Fibras de reforço, tal como fibra de vidro ou poliéster, podem ser usadas na formulação do concreto polímero. São usadas nos Estados Unidos em compostos pré-moldados com aplicação em estruturas hidráulicas. A otimização do concreto polímero consiste em bom empacotamento de agregados, adição de sílica microcristalina e estudo do teor de aglomerante polimérico adequado. Quando utilizado na substituição de metais fundidos apresenta melhores características como não sofrer corrosão, resistência, não condutor e bom amortecimento. (GORNINSKI, 2002) (SARAIVA, et al., 2013)

## 2.2. Polímero - Polietileno

O PE é inerte à maioria dos produtos químicos comuns e resistente à água mesmo em altas temperaturas devido à natureza olefínica, tem alto peso molecular e estrutura parcialmente cristalina. (COUTINHO, et al., 2003) (WIEBECK & HARADA, 2005)

O polietileno é dividido entre PEBD (polietileno de baixa densidade) que tem ramificações em sua cadeia que aumentam a distância entre as cadeias, diminuindo a densidade e o PEAD (polietileno de alta densidade) que é linear. O PEAD tem massa molar de 200000 a 500000 g/mol; acima de três milhões o polímero é denominado de PEUAPM (polietileno de ultra-alto peso molecular). (WIEBECK & HARADA, 2005)

As poliolefinas representam aproximadamente 60% demanda mundial de termoplásticos, sendo que 40% são representados pelo polietileno. No Brasil as poliolefinas estão em 65%, dos quais 43% são respectivos ao PE. (WIEBECK & HARADA, 2005)

Tabela 9 Efeito das ramificações nas propriedades mecânicas do polietileno. (WIEBECK & HARADA, 2005) (FREITAS, 2014)

Propriedade	PEAD Linear	PEBD, altamente ramificado
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	0,968-0,966	0,918
Resistência à tração (MPa)	20-30	8,5-10,5
Módulo elástico (MPa)	1400-1550	400-500
Temperatura de fusão (°C)	125-132	98-115
Tensão limite de escoamento (MPa)	17,9-31	9-19,3

O polietileno pode ser processado por moldagem por injeção, extrusão e sopro. Com o aumento de peso molecular se tem melhoria nas propriedades físicas e mecânicas tais como resistência à corrosão, fratura por impacto, fadiga cíclica, fratura por impacto, alta dureza e baixo coeficiente de atrito. Tem aplicação industrial quando a temperatura não excede 80°C. (COUTINHO, et al., 2003)

Quando exposto à radiação não ionizante o polímero pode sofrer fotodegradação nas camadas superficiais. A radiação UV possui diferentes níveis de energia que podem causar ruptura de ligações primária com consequente dissociação do polímero, perda de transparência, trincamento superficial entre outros. (VIVAS, 2013)

## 2.3. Metais

### 2.3.1. Alumínio

As características de destaque do alumínio são o baixo peso específico, reciclabilidade, resistência à corrosão, alta condutividade térmica e elétrica. Ligas de alumínio e cobre são muito utilizadas na indústria aeronáutica pela baixa densidade e elevada resistência mecânica devido ao processo de endurecimento por precipitação das fases  $CuAl_2$  e  $CuMgAl_2$ . (COUTO, et al., 2012)

Ligas de alumínio apresentam boa usinabilidade, tendo como aplicação máquinas e equipamentos. As ligas de alumínio utilizadas no setor ferroviário são: AlMgSi (quando temperada atinge excelente resistência mecânica); AlMg (conformabilidade e resistência à corrosão próximas ao alumínio puro, porém com propriedades mecânicas superiores quando trabalhada a frio); AlMn (boa conformabilidade e moderada resistência mecânica). (ABAL- Associação Brasileira do Alumínio, 2012)

Tabela 10 Propriedades do alumínio. (ABAL- Associação Brasileira do Alumínio, 2012)

	Alumínio
Peso específico (g/cm <sup>3</sup> )	2,7
Resistência à tração (MPa)	90-700
Módulo de elasticidade (MPa)	70000

### 2.3.2. Aço

O aço-carbono é uma liga de ferro e carbono numa relação entre 0,008% a 2,11% de carbono. Abaixo de 0,03% os aços tem baixa ductilidade e não temperáveis; entre 0,3% e 0,7% podem ser tratados termicamente, atingindo boa tenacidade e resistência; acima de 0,7% a dureza é elevada. A resistência do aço estrutural se dá pelos mecanismos de resistência dos átomos de ferro, endurecimento por solução sólida (elementos de liga solubilizados), refino de grão, precipitação de compostos intermetálicos, segunda fase e discordâncias. (PANNONI, 2002) (GORN, 2008)

Os aços liga têm elementos químicos em porcentagem acima do aceitável, tendo alteração das suas propriedades. Dentre os aços ligados dispõem-se dos aços inoxidáveis, caracterizado por conter níquel e no mínimo 11% de cromo que possibilita a sua elevada resistência à corrosão. O cromo em contato com o oxigênio reage quimicamente, formando uma camada passiva que protege o metal da corrosão. (PANNONI, 2002) (OLIVEIRA, 2009)

A produção brasileira de aço inoxidável em 2014 foi de 325k toneladas para um consumo de 350k toneladas no mesmo ano. Sendo assim parte do aço inoxidável consumido no Brasil é importado. (ABINOX, 2015)

Tabela 11 Propriedades do aço baixo carbono e do aço inoxidável. (PANNONI, 2002)

	Densidade (Kg/m <sup>3</sup> )	Tensão de escoamento (MPa)	Limite de resistência à tração (MPa)
Aço estrutural (baixo carbono)	7500-8000	250-395	345-580
Aço inoxidável	7500-8000	170-1000	480-2240

### 2.3.3. Titânio

O interesse no titânio se dá por suas propriedades e abundância (é o quarto elemento metálico mais farto, vindo atrás do alumínio, ferro e magnésio). Comercialmente a composição considerada pura varia entre 98% e 99,5%, tendo como impurezas elementos como o oxigênio, ferro, nitrogênio, carbono e hidrogênio. A baixa densidade, alta temperatura de fundição, alta reatividade química (com elementos do revestimento e gases) torna onerosa sua produção, o que eleva o custo do metal. (BAUER, 2007)

O titânio e suas ligas têm dois tipos de arranjos cristalinos, hexagonal compacta denominada de fase *alfa* ( $\alpha$ ) e cúbica de corpo centrado denominada fase *beta* ( $\beta$ ). O titânio comercialmente puro se apresenta na fase alfa; sua liga mais comum é a Ti-6AL-4V (6% de alumínio e 4% de vanádio se apresenta nas duas fases, alfa e beta). Esta liga apresenta excelente desempenho mecânico, exibindo o dobro de resistência à tração e dureza quando comparada ao titânio comercialmente puro. (BAUER, 2007)

O titânio e suas ligas tem resistência à corrosão em todos os ambientes naturais por formar na superfície um óxido estável. É susceptível à corrosão sob tensão em meios aquosos de cloretos e à fragilização por hidrogênio acima de 80°C. No caso de ar este suporta à oxidação até 650°C. (SCHWANKE, 2000)

As solicitações que alteram a microestrutura do titânio e suas ligas são fadiga de alto ciclo, condição ambiental e fluência. O dano pode ser observado pela nucleação e crescimento de micro cavidades e micro trincas. (BARBOZA, et al., s.d.)

## 3. Metodologia

Atualmente a análise computacional é um recurso de fácil acesso, que quando associada a um software com códigos de cálculo de análise multiaxial de tensão e deformação é uma ferramenta eficiente. A modelagem numérica foi implementada através do *Ansys 15.0* embasado no Método de Elementos Finitos (MEF). O fundamento do método consiste em algoritmos de otimização a partir de parâmetros modais (medidas dinâmicas) e assentes (apoios da estrutura). O presente estudo apresentou o comportamento mecânico de um mesmo sistema tridimensional para diversos materiais, prevendo seu comportamento quando submetido a um estado plano de tensões. (MACHADO, 2002) (BARBOSA & CREMONA, 2002)

Os itens a serem analisados foram a máxima tensão normal, deformação e custo. As variáveis foram a espessura de parede e o material. As tensões impostas no sistema foram o peso da própria máquina de chave e o peso externo de uma pessoa sob a tampa.

### 3.1. Considerações pra cálculo de esforços

Os materiais analisados foram cadastrados no na biblioteca ("Engineering Data") com dados de densidade, módulo de Young, coeficiente de Poisson, módulo volumétrico, módulo de cisalhamento. No caso de o material ser anisotrópico os dados foram fornecidos de acordo com a direção.

A definição geométrica do modelo caso foi definida na plataforma de desenho do Ansys "Geometry". No ambiente "Mechanical Model" o sistema é discretizado pelo software, formando a rede de elementos finitos. Nessa etapa as forças foram impostas (peso do conjunto interno, peso da tampa e força externa simulando uma pessoa em cima da caixa) e os apoios fixados.



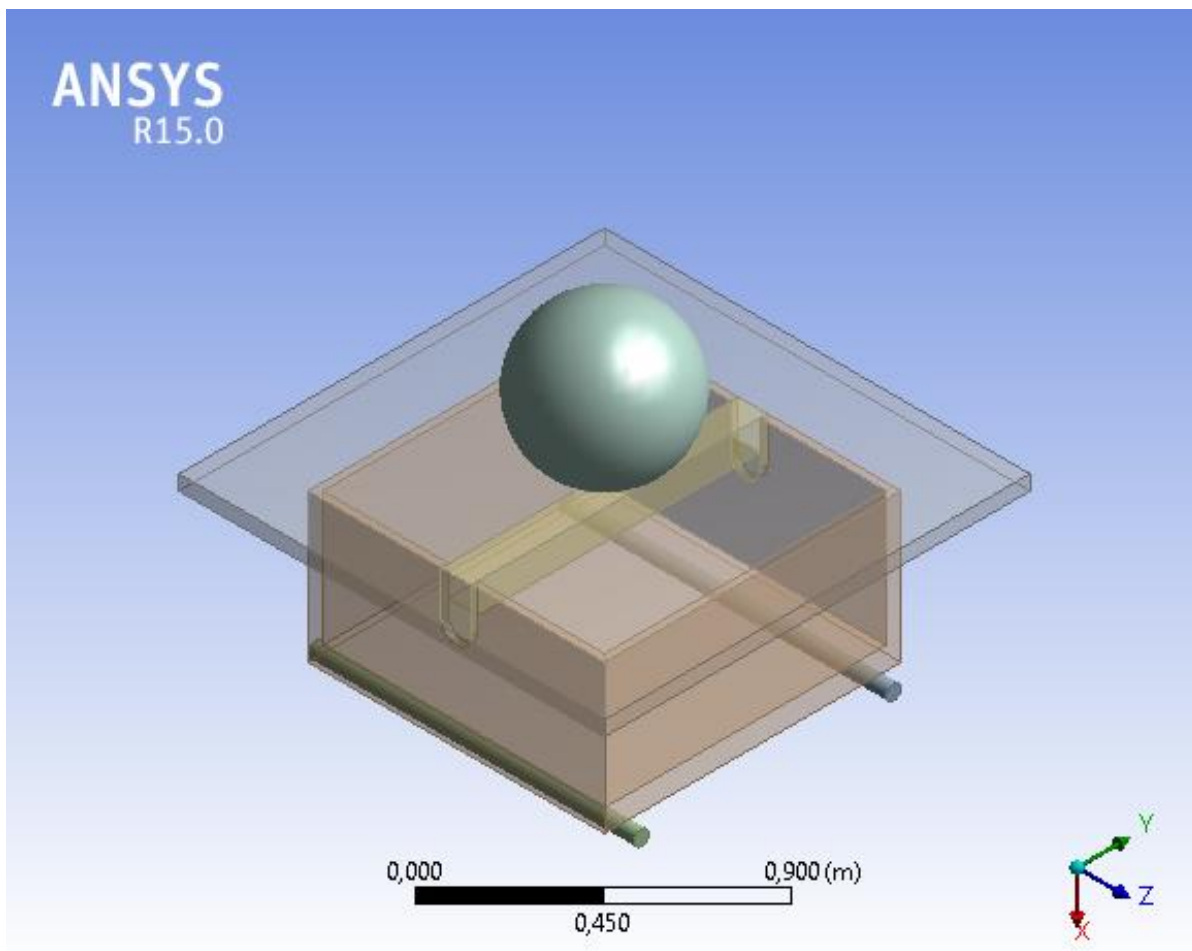


Figura 6 Sistema completo utilizado na simulação de elementos finitos.

A solução escolhida para cálculo foi "Total Deformation" e "Normal Stress" que utilizam um número finito de equações diferenciais de movimento de cada nó da malha. A análise em materiais lineares elásticos com pequenas deformações a relação entre tensão e extensão é descrita pela lei de Hook. (MEIRELES, 2007)

$$\sigma(t) = E \varepsilon(t) \quad (1)$$

E = matriz de elasticidade

$\varepsilon(t)$  = vetor das deformações no interior do elemento

Que associada à definição do campo de deformações conduz a equação abaixo, onde E B relaciona as tensões em um ponto genérico com os deslocamentos nodais. (MEIRELES, 2007)

$$\sigma(t) = E B q(t) \quad (2)$$

B= matriz que relaciona deformações no interior do elemento

q(t) =matriz de deslocamentos nodais variáveis no tempo

As condições de equilíbrio do sistema são estabelecidas pelo Princípio dos Trabalhos Virtuais. Este princípio estabelece que a energia da deformação virtual das tensões internas é o trabalho virtual das ações externas no elemento. O trabalho virtual é expresso em função das deformações virtuais realizando a soma das contribuições no volume do elemento (produto interno de forças pelo deslocamento). (MEIRELES, 2007)

$$\delta U_e = \delta W_e \quad (3)$$

$\delta U_e$  = energia da deformação virtual das tensões internas

$\delta W_e$  = trabalho virtual das ações externas no elemento

### 3.1.1. Tampa

Na simulação da tampa considerou-se um possível peso externo concentrado (que simula uma pessoa em cima da tampa) de 1000 N mais sua massa própria, estipulada fixa em 140 Kg. O apoio fixo da tampa é no contato com a caixa. As dimensões da tampa são 1,435 m x 1,435 m e espessura variável de acordo com a análise (25 mm, 50 mm ou 75 mm).

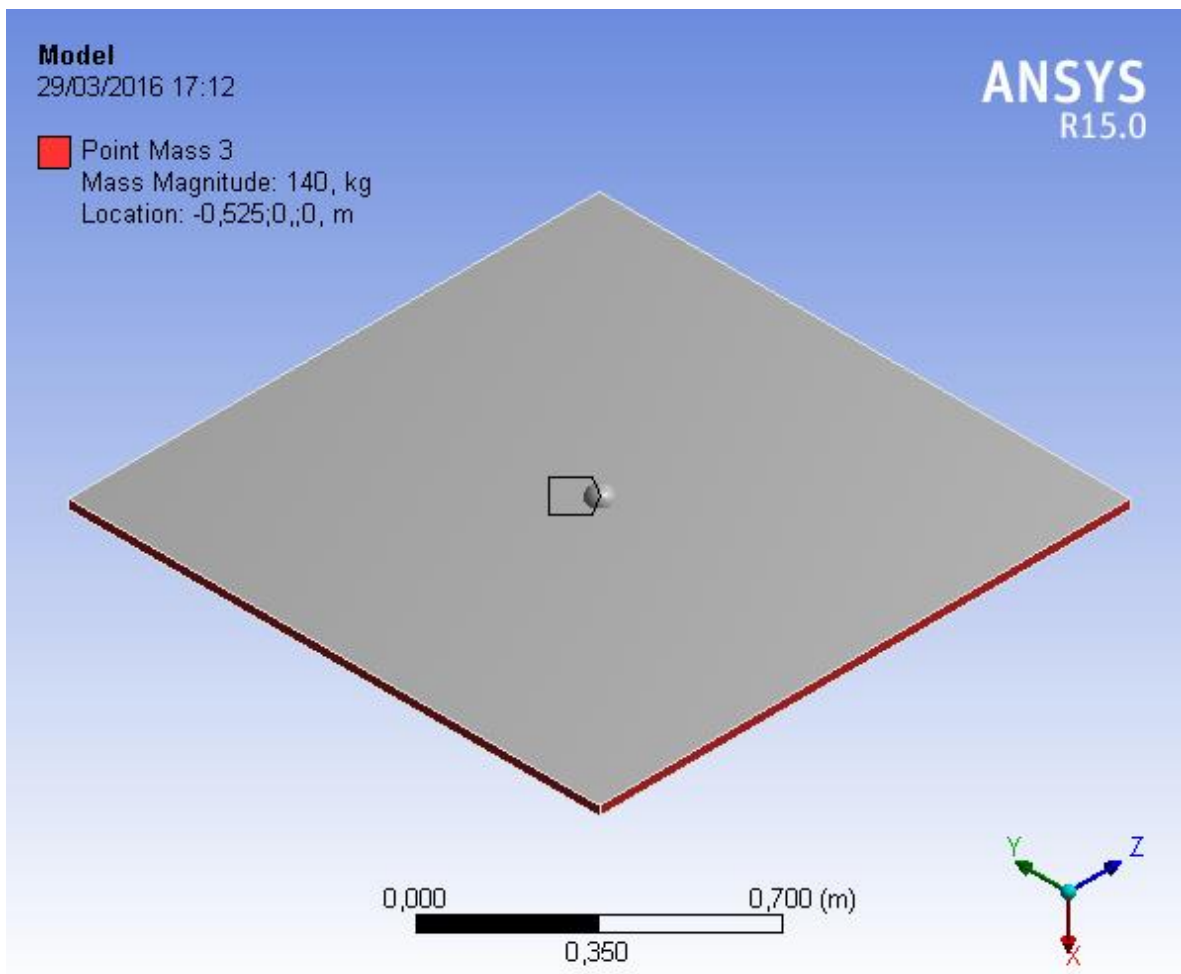


Figura 7 Desenho da tampa utilizado na simulação de elementos finitos.

### 3.1.2 Caixa

A caixa está submetida à flexão em dois apoios. A massa da caixa foi estipulada constante (200 Kg), sobre ela se tem a massa fixa de 140 Kg da tampa, o peso concentrado externo de 1000 N e a massa dos componentes internos estipulados fixos em 160 Kg. As dimensões externas da caixa são 1 m x 1 m x 0,5 m e espessura de parede variável (25 mm, 50 mm ou 75 mm).

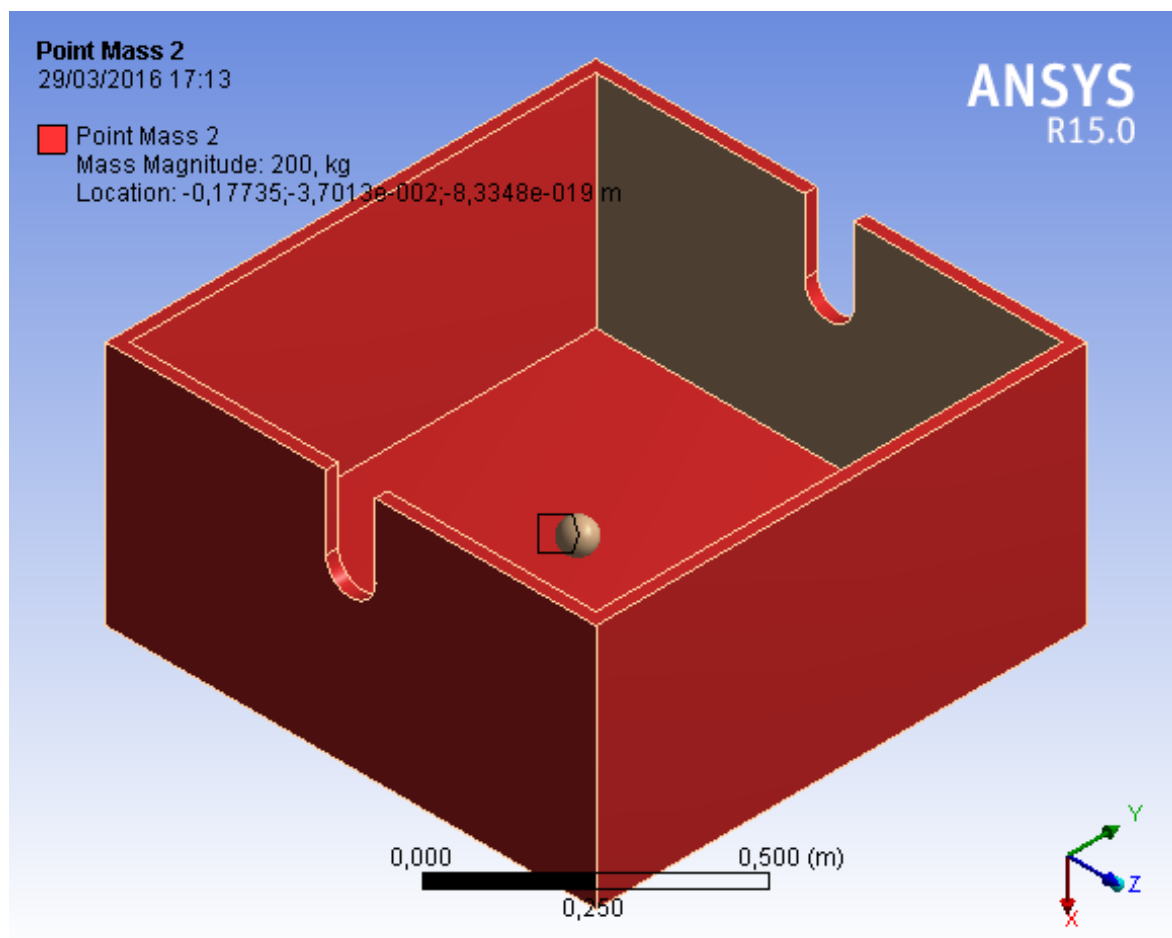


Figura 8 Desenho da caixa utilizada na simulação de elementos finitos.

### 3.2. Gráfico de custo relativo versus resistência

O gráfico de Ashby utilizado para análise relaciona resistência e custo específico por unidade de volume. Essa verificação visa associar um design de estrutura que além de suportar aos esforços seja vantajoso financeiramente.

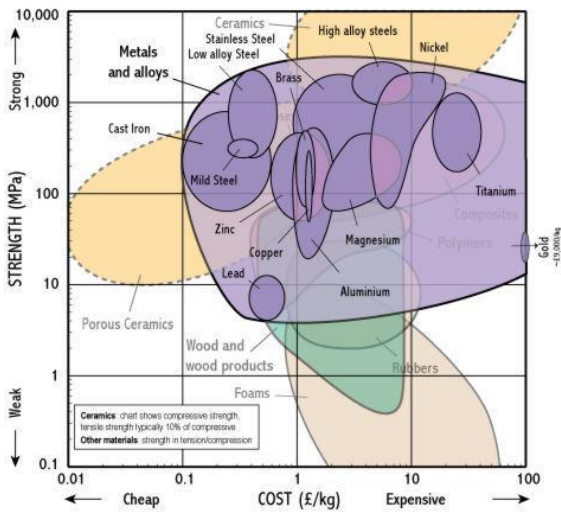


Figura 9 Resistência e custo relativo para metais e suas ligas. (ASHBY & JOHNSON, 2010)

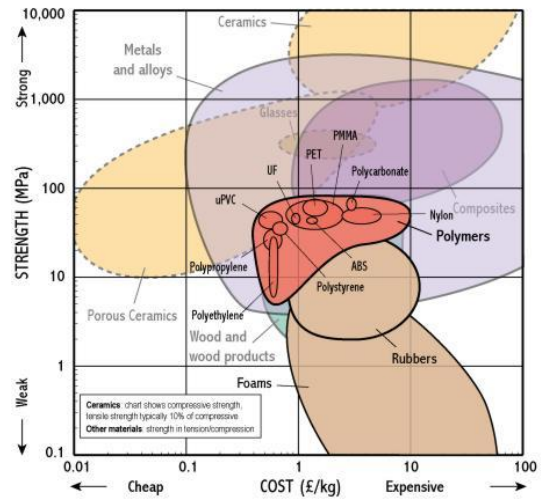


Figura 10 Resistência e custo relativo para polímeros. (ASHBY & JOHNSON, 2010)

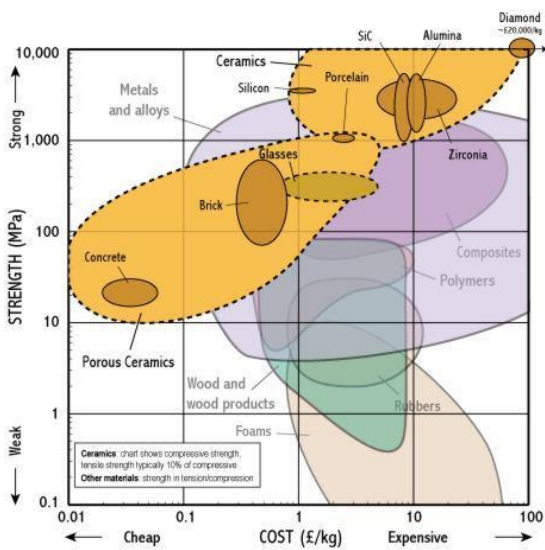


Figura 11 Resistência e custo relativo para cerâmicas. (ASHBY & JOHNSON, 2010)

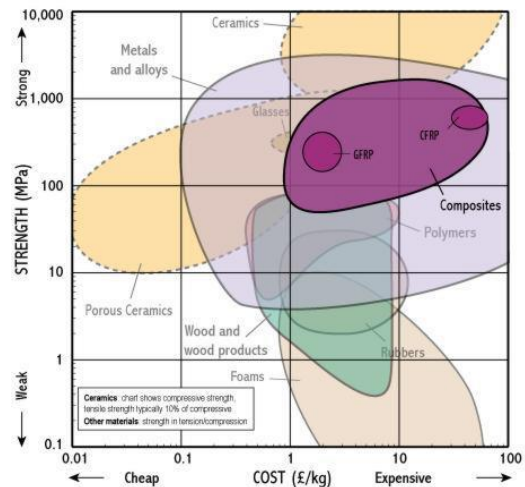


Figura 12 Resistência e custo relativo para compósitos. (ASHBY & JOHNSON, 2010)

### 3.3. Materiais analisados

Dentre os materiais analisados, pode-se ver a tabela 12 que compara as propriedades dos materiais analisados. O custo do titânio e do PRFC tem destaque

por estarem acima dos demais. Nos dados de densidade o item de menor massa por metro quadrado é o polietileno. Dentre os dados de limite de resistência à tração uniaxial o concreto, concreto armado e o polietileno apresentam as faixas de resistência mais baixas.

Tabela 12 Propriedades do aço baixo carbono e do aço inoxidável. (CHAWLA, 2012) (ASHBY & JOHNSON, 2010) (SHACKELFORD & ALEXANDER, 2001) (JENSEN, 1943)

	Custo (£/Kg)		Densidade (Kg/m <sup>3</sup> )		Limite de resistência à tração (MPa)	
PRFC	30	60	7500	8000	480	2240
Titânio	15	40	7500	8000	300	1625
Aço inoxidável	1	7	4500	5000	550	1050
PRFV	1,5	3	2500	3000	345	580
Liga de Alumínio	0,9	2,5	2100	3000	58	550
Aço baixo carbono	0,3	0,7	2000	2500	138	241
Polietileno	0,6	0,7	1500	2000	20,7	44,8
Concreto armado	0,06	0,1	1500	1750	10	40
Concreto	0,02	0,06	900	1000	2	6

### 3.4. Financiamento - BNDES

O índice de nacionalização é o critério utilizado pelo BNDES para autorizar o financiamento solicitado. A planilha que realiza o cálculo é baixada a partir do site oficial do BNDES e deve ser preenchida com dados como: NCM (Nomenclatura Comum do MERCOSUL), descrição do produto, quantidade, origem, peso, mão de obra e serviços terceirizados. (MORAES, 2013) (BNDES, 2016)

A fórmula de calculo é:

$$Iv = \left(1 - \frac{x}{y}\right) 100 \quad (4)$$

Iv: Índice de nacionalização em valor (%)

$x$ = Valor de parcela importada (R\$)

$Y$ =Preço de venda praticado pelo fornecedor, excluídos IPI e ICMS.

$$I_p = \left( 1 - \frac{x_p}{y_p} \right) 100$$

$I_p$ = Índice de nacionalização em peso (%)

$x_p$ = Peso da parcela importada (kg)

$y_p$ = Peso do equipamento completo (Kg)

O critério estabelecido é de que para um produto ser credenciado deve atingir simultaneamente os percentuais mínimos exigidos em valor de 60% (sessenta por cento) e em peso de 60% (sessenta por cento). (BNDES, 2016)

## 4. Resultados e Discussão

### 4.1 Simulação do *Ansys 15.0*

#### 4.1.1 Tampa

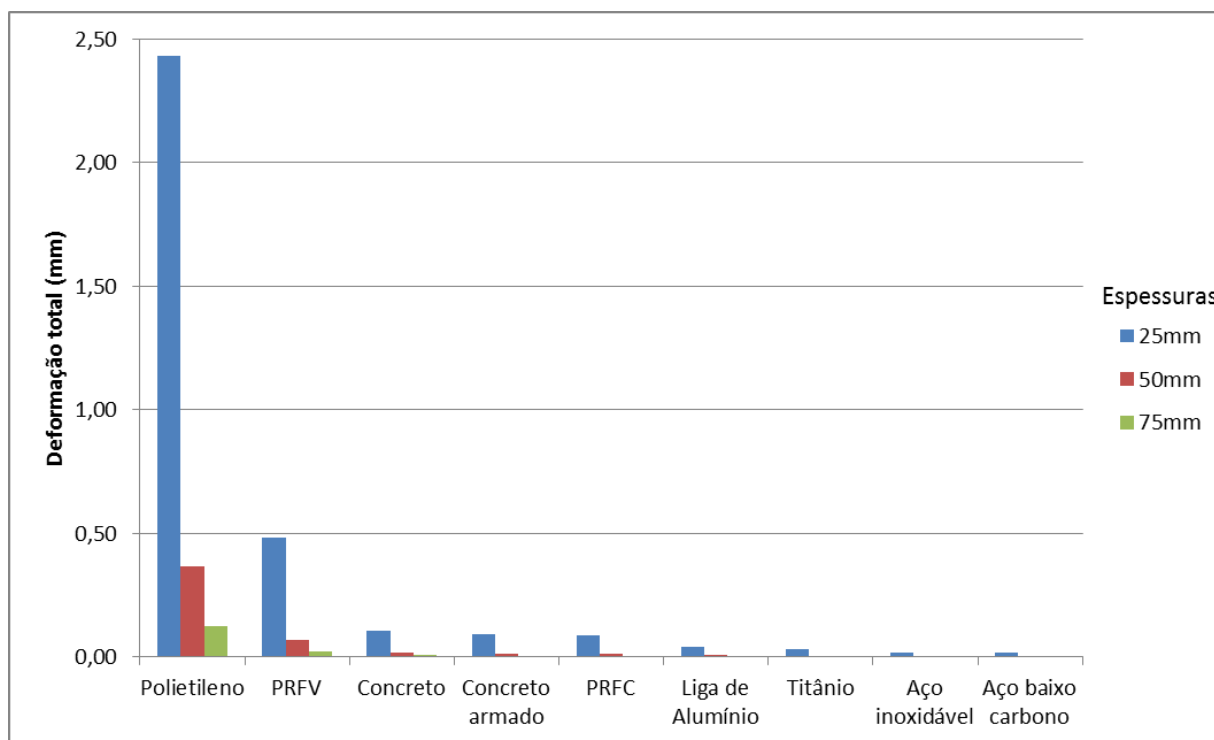
Na simulação de elementos finitos a tampa de espessura 75 mm foi a que apresentou menor deformação, como esperado. Dentre os que apresentaram deformação próxima à zero, destacam-se o aço estrutural, aço inoxidável e o titânio. O material que apresentou o pior resultado foi o polietileno com deformação de 0,13 mm, seguido pelo PRFV com deformação de 0,02 mm. A deformação deve ser avaliada para garantir que a tampa não terá contato com o conjunto interno eletromecânico, podendo causar mal funcionamento.

A tampa de espessura 50 mm apresentou resultados semelhantes, com a deformação do polietileno em 0,6 mm e do PRFV 0,07 mm. Para a tampa de espessura 25 mm o material com maior deformação também foi o polietileno que obteve de 2,43 mm, bem acima dos outros materiais, seguido dos compósitos PRFV com 0,48 mm.

O polietileno apresentou um aumento relativo de 240 vezes para a espessura de 25mm em comparação com o material de menor deformação (aço baixo carbono). Esse comportamento se deve ao baixo módulo de Young observado na curva tensão – deformação deste material, que com menor ângulo da curva no

regime elástico caracteriza que para mesma tensão ocorre maior deformação (quando comparada a outras classes de materiais).

Tabela 13 Deformação total para as espessuras da tampa de 25 mm, 50 mm e 75 mm.



A flecha de deformação é o máximo deslocamento vertical, que na tampa é observado no centro (região em vermelho da Figura 13) na espessura de 25 mm em polietileno na direção do conjunto interno eletromecânico.

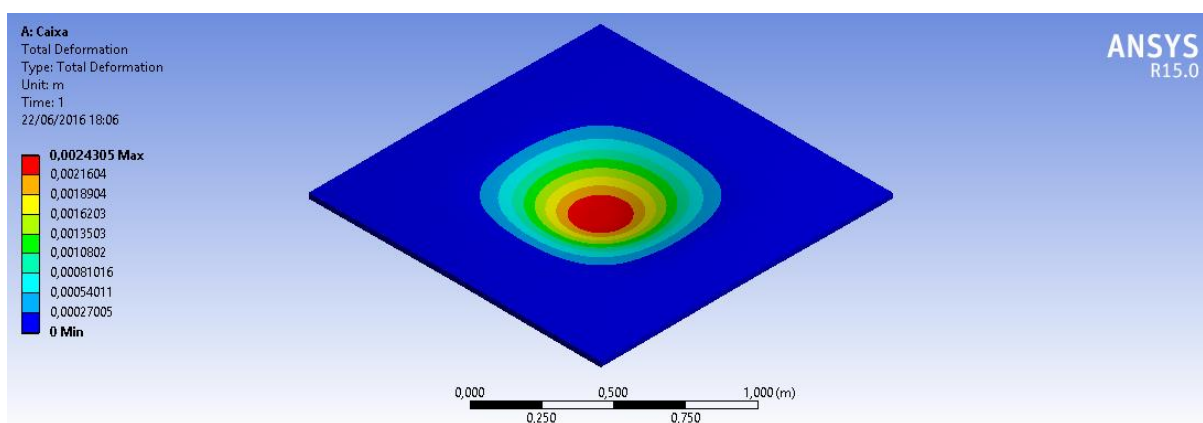
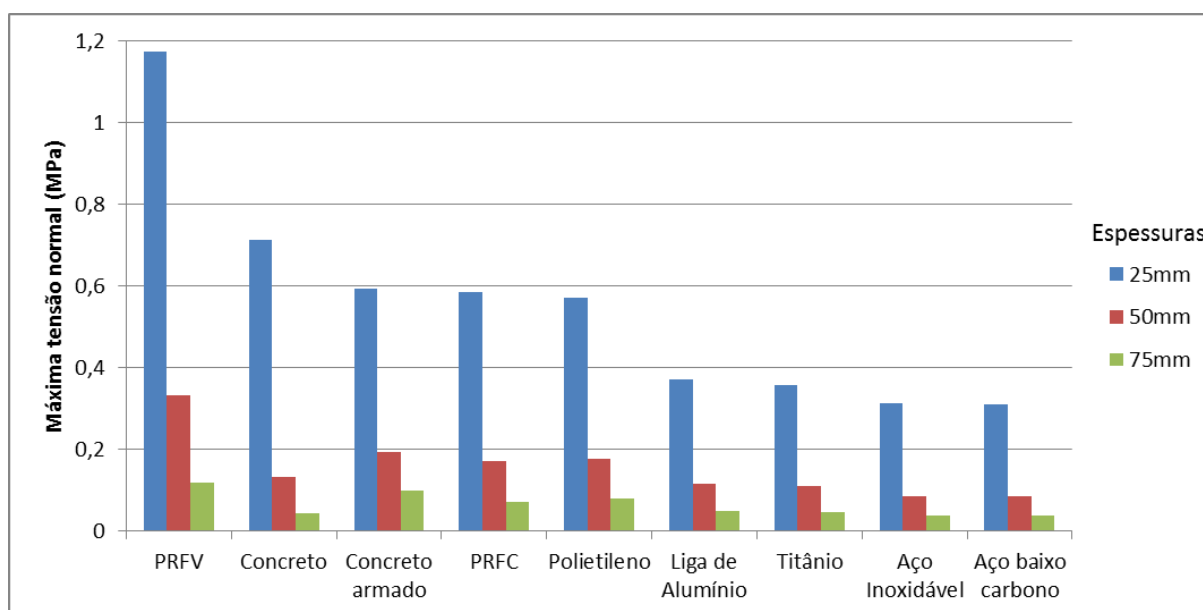


Figura 13 Deformação total na tampa de 25 mm com polietileno, máxima deformação no centro de 2,43 mm.



A máxima tensão normal para todas as espessuras foi observada para o PRFV com 1,17 MPa para a espessura de 25 mm, 0,33 MPa para 50 mm e 0,12 para 75 mm. As máxima tensões normais foram observadas para a espessura de 25mm, seguido pelos resultados da espessura de 50 mm e com as tensões máximas inferiores na Tabela 13 a espessura de 75 mm.

Tabela 14 Tensão normal (MPa)

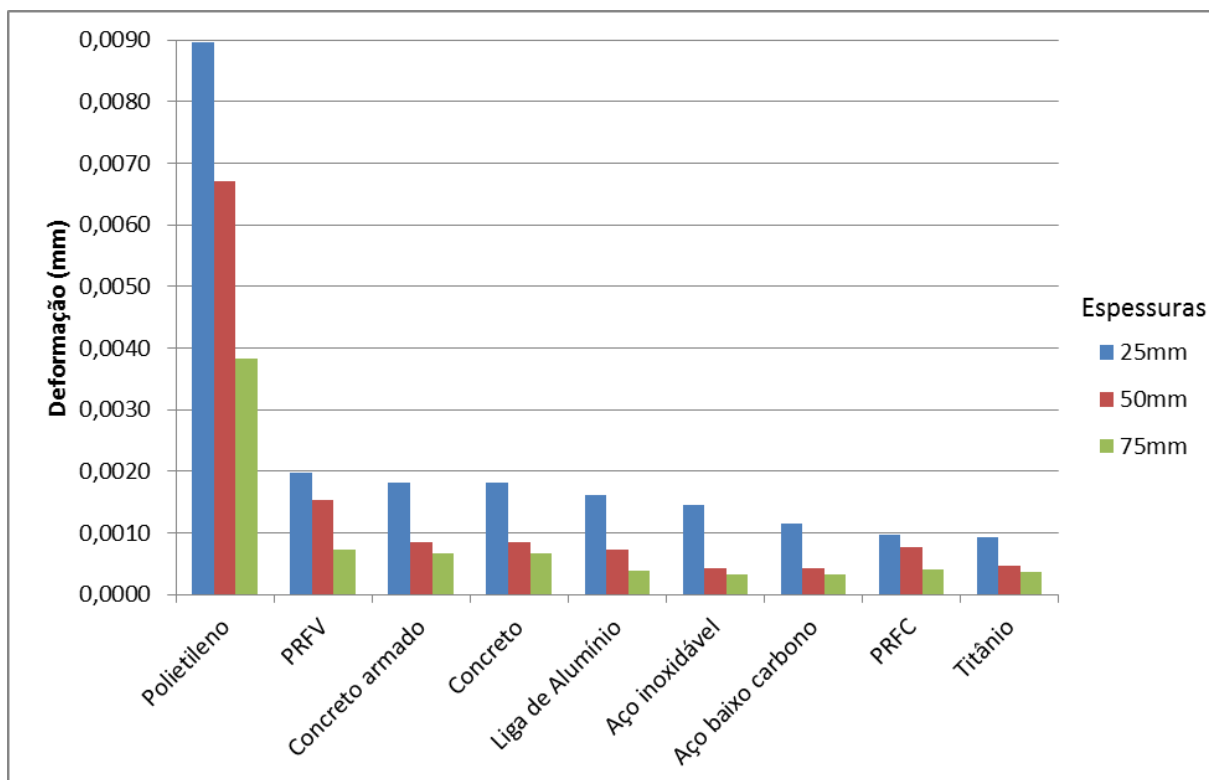


#### 4.1.2 Caixa

Na simulação de elementos finitos da caixa de espessura 75 mm foi a que apresentou menor deformação, como esperado. Dentre os que apresentaram menor deformação, destacam-se o aço estrutural e aço inoxidável com  $0,33 \times 10^{-3}$  mm. O material que apresentou o pior resultado foi o polietileno com deformação de 0,038 mm.

Para a caixa de espessura 50 mm o polietileno apresentou maior deformação com 0,007 mm, e para a espessura 25 mm este mesmo material também apresentou a maior deformação com 0,009 mm.

Tabela 15 Deformação total para as espessuras da caixa de 25 mm, 50 mm e 75 mm.



Na figura 14 é possível observar a distribuição de tensão na caixa em polietileno, que atinge seu máximo em 0,0089 mm, representado pela cor amarela.

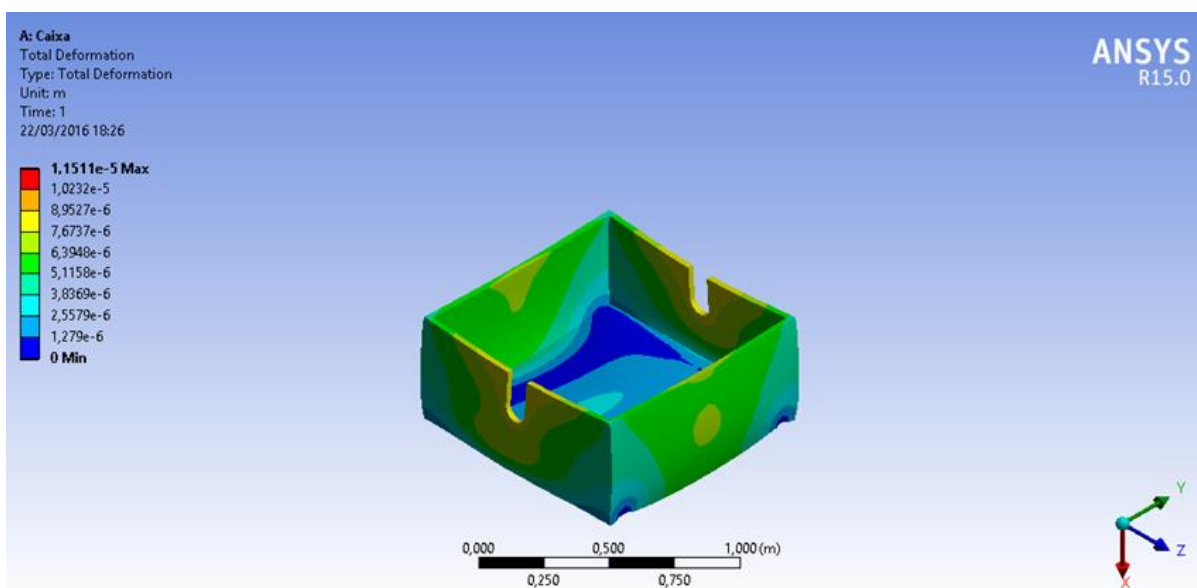
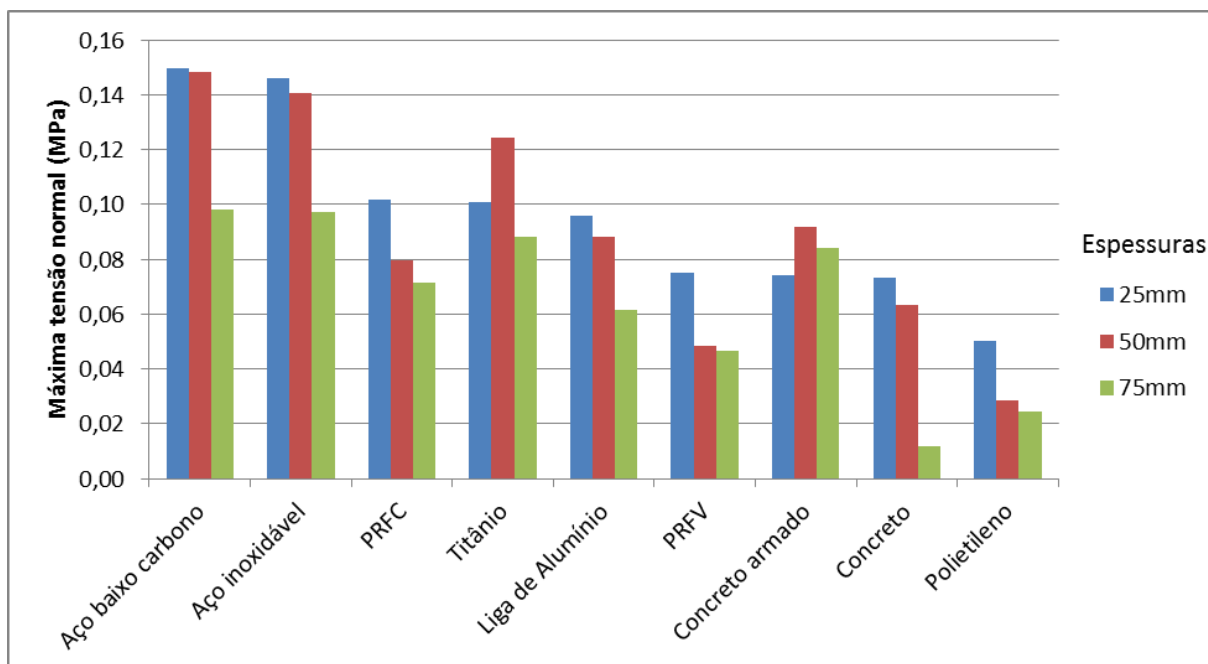


Figura 14 Deformação total da caixa de espessura 25 mm em polietileno.

As simulações que apresentaram maior tensão normal foram com o aço estrutural e com o aço inoxidável. Na espessura de 25 mm o aço baixo carbono apresentou 0,15 MPa e o aço inoxidável 0,146 MPa. Na espessura de 50mm o resultado foi próximo, com o aço baixo carbono 0,148 MPa e o aço inoxidável 0,140 MPa.

Tabela 16 Tensão Normal (MPa)



A tensão normal máxima para a espessura de 50 mm no titânio foi acima da tensão observada na espessura de 25 mm. Com o espessamento da parede da caixa, a máxima tensão normal encontrada foi no conjunto interno representado na figura 16.

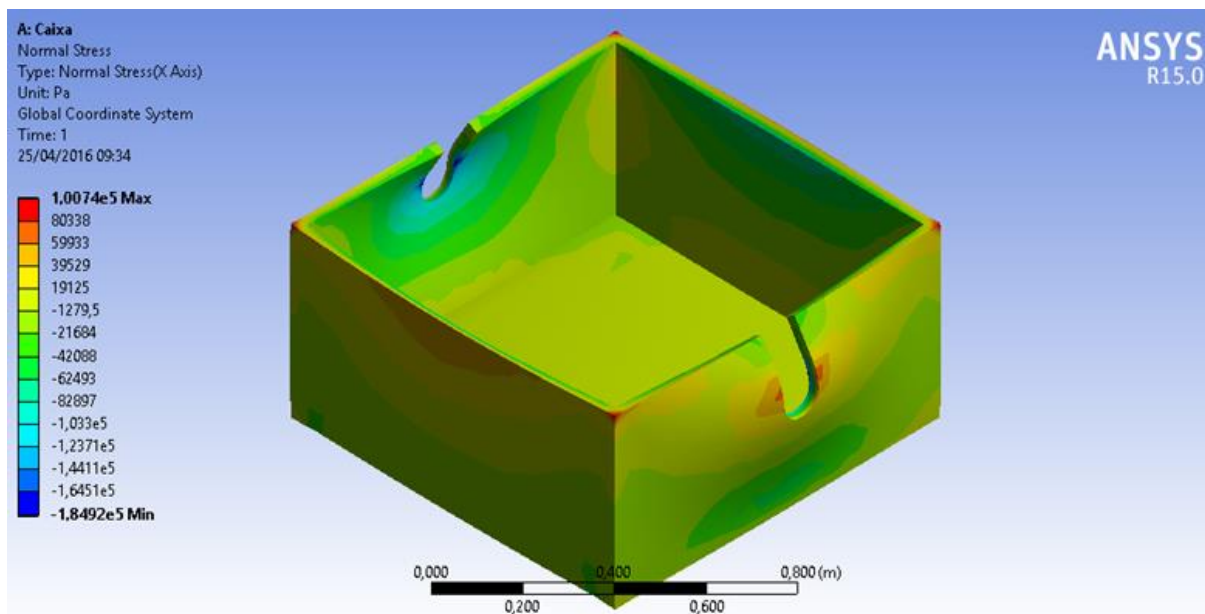


Figura 15 Tensão normal na caixa de titânio espessura 25 mm.

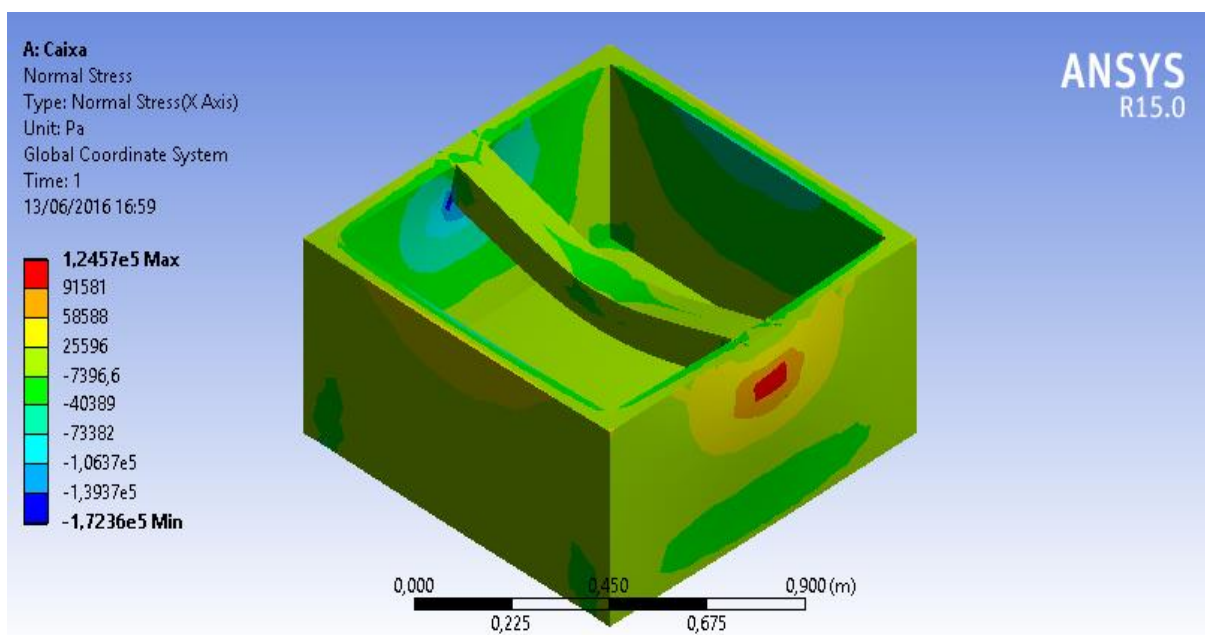


Figura 16 Tensão normal na caixa de titânio espessura 50 mm.

A tensão normal máxima para a espessura de 50 mm no concreto armado foi acima da tensão observada na espessura de 25 mm. Com o espessamento da parede da caixa, a máxima tensão normal encontrada foi no apoio do conjunto interno representado na figura 18.

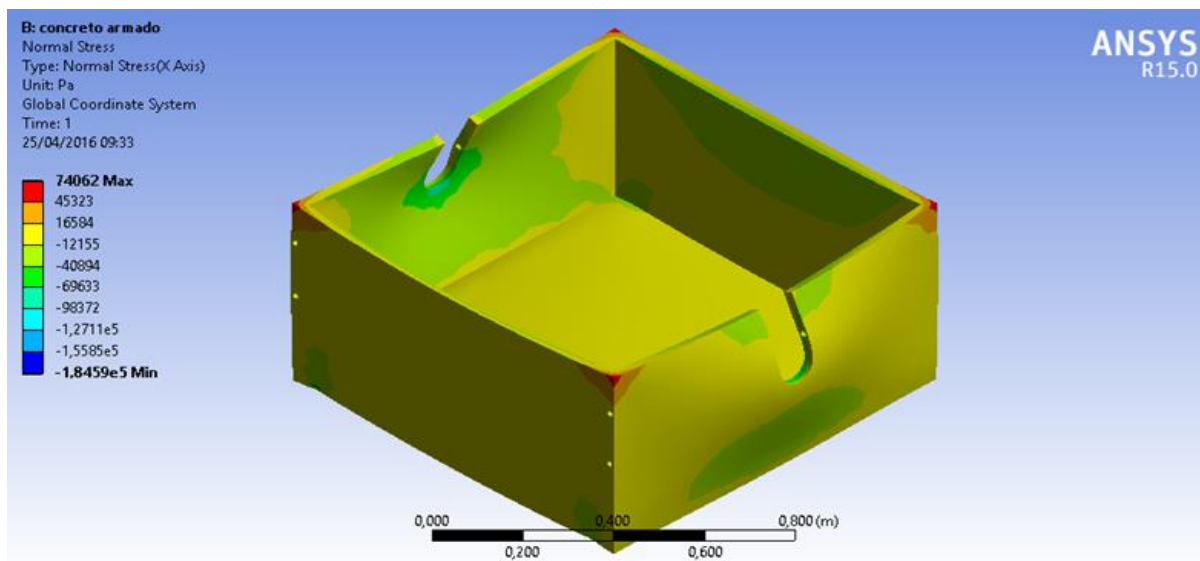


Figura 17 Tensão normal na *caixa* de concreto armado espessura 25 mm.

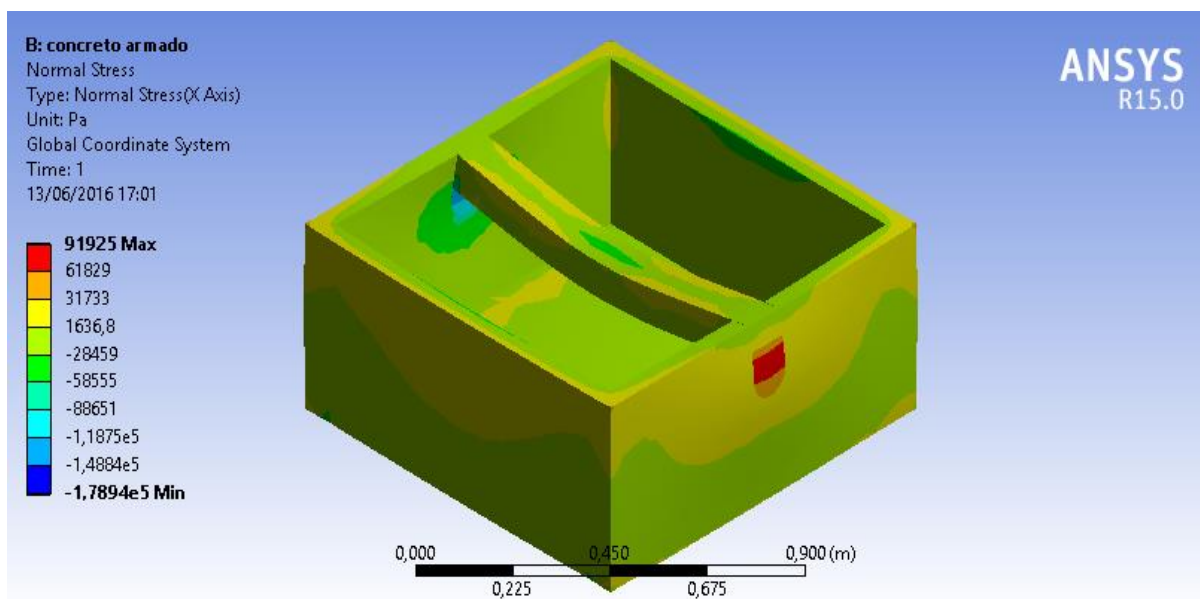


Figura 18 Tensão normal na *caixa* de concreto armado espessura 50 mm.

Comparativamente na caixa de titânio (figura 15) e na de concreto armado (figura 17), o primeiro apresentou máxima tensão normal da caixa no apoio do conjunto interno enquanto no segundo essa tensão não foi observada no mesmo local pela presença da viga de aço.

## 4.2 Seleção de materiais

De acordo com os gráficos de Ashby já apresentados, os materiais analisados que tem alto custo relativo são o titânio (entre 15 e 40 £/Kg) e o PRFC (entre 550 e 1050 £/Kg). Analisando o limite de resistência à tração versus custo relativo por unidade de volume, a melhor relação é encontrada no aço estrutural (baixo carbono) seguido do aço inoxidável, liga de alumínio, concreto e o compósito PRFV.

Tabela 17 Dados de referência (CHAWLA, 2012) (ASHBY & JOHNSON, 2010) (SHACKELFORD & ALEXANDER, 2001) (JENSEN, 1943)

	Custo (£/Kg)	Densidade (Kg/m <sup>3</sup> )	Tensão de escoamento (MPa)	Limite de tração (MPa)
Liga de Alumínio	0,9-2,5	2500-3000	30-500	58-550
PRFV	1,5-3	1500-2000	110-192	138-241
Aço baixo carbono	0,3-0,7	7500-8000	250-395	345-580
Polietileno	0,6-0,7	900-1000	17,9-29	20,7-44,8
Aço inoxidável	1,0-7,0	7500-8000	170-1000	480-2240
PRFC	30-60	1500-1750	550-1050	550-1050
Titânio	15-40	4500-5000	250-1245	300-1625
Concreto armado	0,06-0,1	2100-3000	10-40	10-40
Concreto	0,02-0,06	2000-2500	2-6	2-6

Comparando o resultado obtido na simulação de elementos finitos ao limite inferior de resistência à tração se obtêm o coeficiente de segurança para a *caixa* e tampa (gráficos no apêndice). Dentre os coeficientes de segurança obtidos para a tampa os resultados inferiores foram apresentados pelo concreto armado, polietileno e concreto (C.S para tensão abaixo de 40). Para os coeficientes de segurança obtidos para a *caixa* o concreto foi o único a apresentar coeficiente abaixo de 40.

### 4.2.1 Tampa

Em todas as situações os materiais apresentaram uma tensão normal abaixo do limite inferior de resistência à tração apresentado na tabela acima. O que

apresentou menor margem de segurança foi o concreto (C.S.T. 2,8) seguido do polietileno (C.S.T. 36).

Tabela 18 Coeficiente de segurança dos materiais analisados para a tampa.

	C.S. para Tensão	C.S. para Deformação
Concreto Armado	17	111
Liga de Alumínio	156	246
PRFV	118	21
Aço baixo carbono	1.110	655
Polietileno	36	4
Aço inoxidável	1.533	637
PRFC	942	113
PRFV	297	39
Titânio	841	337
Concreto	2,8	93

Na análise de deformação a flecha máxima foi de 2,24 mm. A partir desse dado foi imposto que a distância mínima estabelecida em projeto do sistema deve distanciar a tampa e o conjunto interno eletromecânico em 10 mm. Sendo assim, o pior coeficiente de segurança (C.S.D. 4) seria encontrado no polietileno e o maior no aço baixo carbono (C.S.D. 655).

#### 4.2.2 Caixa

Assim como na tampa, na *caixa* em todas as situações os materiais apresentaram uma tensão normal abaixo do limite inferior de resistência à tração apresentado na tabela acima. O que apresentou menor margem de segurança foi novamente o concreto (C.S.T. 27) seguido do polietileno (C.S.T. 412).

A flecha máxima de deformação da caixa na espessura de 25 mm em polietileno na parede lateral que apoia o conjunto interno eletromecânico, apresentando deformação de 0,001 mm. Sendo assim, os coeficientes de segurança são muito altos.

Tabela 19 Coeficiente de segurança dos materiais analisados para a caixa.

	C.S. para Tensão	C.S. para Deformação
Concreto Armado	135	5535
Liga de Alumínio	606	6215
PRFV	1835	5065
Aço baixo carbono	2302	8641
Polietileno	413	1117
Aço inoxidável	3284	6890
PRFC	5404	10233
PRFV	1654	5268
Titânio	2978	10716
Concreto	27	5539

### 4.3. Análise de financiamento BNDES (Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social)

Os materiais que até então apresentaram condições de aplicação no sistema foram o concreto armado, PRFV com epóxi, aço baixo carbono e aço inoxidável. A partir das suas dimensões e faixa de densidades foi feito o levantamento dos índices de nacionalização.

Tabela 20 Índice de nacionalização em peso do sistema da máquina de chave.

	Ip para espessura		Ip para espessura		Ip para espessura	
	25mm (%)		50mm (%)		75mm (%)	
PRFV	57%	64%	72%	77%	79%	83%
Aço baixo carbono	87%	88%	93%	93%	95%	95%
Aço inoxidável	87%	88%	93%	93%	95%	95%
Concreto armado	65%	72%	78%	84%	84%	88%
Liga de Alumínio	69%	72%	81%	84%	86%	88%
Polietileno	44%	47%	61%	63%	69%	71%
CFRP	57%	61%	72%	75%	79%	81%
Titânio	80%	81%	88%	89%	92%	93%
Concreto	64%	69%	77%	81%	83%	86%



De acordo com os índices obtidos, o sistema de máquina de chave não conseguiria o financiamento no caso de a caixa e a tampa serem manufaturadas com espessura de 25mm em concreto armado, concreto, polietileno, CFRP ou PRFV. Na mesma espessura com o aço baixo carbono ou inoxidável é possível atingir o mínimo estabelecido. Nas espessuras de 50 mm e 75 mm todos os materiais atendem aos 60% em peso nacional.

## 5. Conclusões

Levando em consideração o custo relativo, o PRFC e o titânio apresentam um alto custo que torna sua aplicação inviável. Na margem de segurança na análise de tensão normal o concreto foi considerado pouco confiável. O polietileno quando na espessura de 25 mm apresenta grande deformação.

O compósito PRFV apresenta um custo mais baixo quando comparado ao PRFC, boa margem de segurança na resistência à tensão de tração. Porém no quesito temperatura de trabalho a resina de poliéster apresenta 80°C e a epóxi 150°C. Sendo assim, dentre as matrizes, a melhor escolha seria a matriz de epóxi associada à fibra de vidro.

Comportamento do polietileno em ambiente externo é satisfatório, tendo como limitação a temperatura de 80°C. Em dias quentes o asfalto chega a 70°C, o que faz concluir que a margem de segurança é baixa podendo acarretar falha prematura.

Para o concreto armado o desempenho na *caixa* foi bom, com coeficiente de segurança de 135 vezes o valor obtido na simulação. Já na tampa o coeficiente foi de 16 vezes, não sendo confiável. O custo do material é baixo e a manufatura barata, sendo um bom alternativo para a confecção da *caixa*. Para minimizar propagação a de fissuras, aumentando a durabilidade, é possível adicionar fibras poliméricas ao concreto.

Dentre os metais analisados, todos apresentam alto coeficiente de segurança (entre 155 e 3284) que relaciona a tensão normal à tensão de tração uniaxial de referência *Handbook*. A melhor alternativa do ponto de vista de custo é o aço estrutural (baixo carbono) e a pior é o titânio, que chega a 40 libras o quilo. No caso de a estrutura estar submetida a um ambiente corrosivo, é interessante optar pelo

aço inoxidável que apesar de não ser a opção de menor custo, irá oferecer maior durabilidade.

No caso da tampa e *caixa* serem aplicadas no Brasil ou no Mercosul, as possibilidades plausíveis são o PRFV com epóxi, aço baixo carbono, aço inoxidável e concreto armado. Em todos os casos existe indústria de base nacional e mão de obra especializada, tornando possível o financiamento à baixa taxa de juros para os sistemas que atendem ao critério do BNDES. No caso de o concreto armado ou PRFV com resina epóxi serem escolhidos, deve-se atentar à espessura superior à 50mm, atendendo assim o critério mínimo de porcentagem nacional em peso.

No caso o sistema ser aplicado em outros países em desenvolvimento que tenham como objetivo realizar a nacionalização, as alternativas seriam do concreto armado aplicado na caixa e do PRFV com resina epóxi aplicado na tampa. Essas são as melhores opções pelo baixo investimento necessário na especialização de mão de obra e maquinário.

Como proposta para pesquisas futuras se faz necessário a análise da interação entre materiais (concreto armado e PRFV com resina epóxi), análise de vibração do conjunto em concreto armado, relação entre materiais diferentes na caixa e tampa (que neste estudo foi considerado o mesmo material nas aplicações) e o estudo de nacionalização do conjunto interno eletromecânico.

## Bibliografia

- ABAL- Associação Brasileira do Alumínio. “Fundamentos e aplicações do alumínio.” n. 2ª edição. São Paulo: ABAL, 2012.
- ABIFER. *ABIFER*. 12 de Maio de 2016. <http://www.abifer.org.br/estatisticas.aspx>.
- ABINOX. Abinox. 30 de dezembro de 2015. <http://www.abinox.org.br/acoinoxestatisticasanuais>.
- ANDRADE, Jairo José de Oliveira. “Durabilidade das estruturas de concreto armado: análise das manifestações patológicas nas estruturas no estado de Pernambuco.” Porto Alegre, 1997.
- ANTF. *Associação Nacional de Transportadores Ferroviários*. <http://www.antf.org.br/index.php/informacoes-do-setor/cronologia-historica-ferroviaria> (acesso em 28 de 05 de 2016).
- ARAÚJO, Carlos Henrique Silva de. “Setor ferroviário - Brasil.” Belo Horizonte: PUC-MINAS, 2008.
- ASHBY, Michael F., e K. JOHNSON. “Materials e design - Arte e ciência da seleção de materiais no design do produto.” Rio de Janeiro: Campus, 2010.
- BARBOSA, Flávio de Souza, e Christian CREMONA. “Determinação dos Parâmetros Modais de Estruturas Submetidas a Excitações.” *SIMEC*, 2002: 12.
- BARBOZA, Miguel Justino Ribeiro, Carlos Antonio Reis Pereira BAPTISTA, Sergio SCHNEIDER, e Olivério Silva. “Estudo de degradação microestrutural de uma liga de titânio em função da taxa de deformação e da temperatura.”
- BAUER, José Roberto de Oliveira. “Propriedades mecânicas do titânio comercialmente puro e da liga Ti-6Al-4V fundidos em diferentes ambientes.” São Paulo, 2007.
- BEBER, Andriei José. “Comportamento estrutural de vigas de concreto armado reforçadas com compósitos de fibra de carbono.” Porto Alegre, 2003.
- BENTUR, A., e S. Mindess. “Fibre reinforced cementitious composites.” London: Elsevier Science Publishers Ltda, 1990.
- BNDES. 2015. [http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/bndes/bndes\\_pt/Institucional/O\\_BNDES/A\\_Empresa/](http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/bndes/bndes_pt/Institucional/O_BNDES/A_Empresa/) (acesso em 02 de março de 2015).

BNDES. “Regulamento para o credenciamento de máquinas, equipamentos, sistemas industriais e componentes no credenciamento de fornecedores informatizado (CFI) do BNDES.” 2016.

CAMARGO, Ana Maria. “Perspectivas do mercado de alumínio.” *Revista Alumínio (IVC)*, n. 11 (2013).

CCR. “CONCESSIONÁRIA DE RODOVIA PRESIDENTE DUTRA.” *Avaliação da resistência dos concretos com cura em ambientes com vibrações mecânicas induzidas por tráfego de veículos LSE-DEE105-R20101231*. Osasco-SP: LSE, 2010.

CEBRIÁN, Fernando Muñoz. “Comportamiento Mecánico del Hormigón Reforzado con Fibra de Polipropileno Multifilamento: Influencia del Porcentaje de Fibra Adicionado.” Valencia, 2010/2011. p. 80.

CHAWLA, Krishan K. “Composite Materials - Science and Engineering.” n. 3th edition. Birmingham: Springer, 2012.

CLARKE, John L. “Structural Design of Polymer Composites.” *EUROCOMP Design Code and Handbook*. n. First edition. Edição: John L. Clarke. London: E & FN SPON, 1996.

CONCESSIONÁRIA DO CLT CARIOCA S/A. *VLT CARIOCA*. 2016. <http://www.vltcarioca.com.br/> (acesso em 28 de 05 de 2016).

COUTINHO, Fernanda M. B., Ivana L. MELLO, e Luiz C. de Santa MARIA. “Polietileno: Principais Tipos, Propriedades e Aplicações.” *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, 2003: p. 1-13.

COUTO, Antonio Augusto, Danieli Aparecida Pereira Reis REIS, Nilton Inácio Domingues JUNIOR, Ana Cláudia Oliveira HIRSCHMANN, Susana ZEPKA, e Carlos Moura NETO. *Estudo das propriedades mecânicas em fadiga da liga de alumínio 2024 envelhecida artificialmente para aplicações aeronáuticas*, 2012.

DÁVILA, Carlos Aire y Paula, e Carlos Javier MENDOZA. “Influencia de las fibras de polipropileno en las propiedades del concreto en estado plástico y endurecido.” Vol. v. 2. n. n. 2. 2011. p. 35-47.

*EMTU*. 2016.

<http://www.emtu.sp.gov.br/emtu/emprendimentos/emprendimentos/vlt-da-baixada-santista-veiculo-leve-sobre-trilhos.fss> (acesso em 28 de 05 de 2016).

FIBERTEK. *Fibertek*. <http://www.fibertek.ca/resin.htm> (acesso em 10 de 03 de 2016).

FIERRO, Verónica Paulina Barros, e Hugo César Ramírez CUEVA. “Diseño de hormigones con fibras de polipropileno para resistencias a la compresión de 21 y 28 MPa con agregados de la cantera de pifo.” Quito, 2012.

FILHO, Ernani Teixeira Torres, e Fernando Nogueira da COSTA. “BNDES e o financiamento do desenvolvimento.” *Economia e Sociedade*. Vol. v. 21. n. Número especial. Campinas, 2012. p. 975-1009.

FREITAS, Rafael Luis Menezes. “Efeito da temperatura de refriamento sobre as propriedades de polímeros amorfos e semicristalinos.” Rio de Janeiro, 2014.

FROLOV, N. P., I. N. AKHVERDOV, e S. S. ZHAVRID. “Les résines de synthèse dans la construction.” *Investigations into means of improvement of physical and mechanical properties and durability of glass-plastic reinforcement*. n. 2ª edição. Paris: Eyrolles, 1971.

GARCEZ, M. R., G.L.C.P.S. FILHO, e Urs MEIER. “Reforço de vigas de concreto armado com laminados de PRFC protendidos. Parte 1: análise sob ação de carregamento estático.” *IBRACON*, Junho de 2012: 10.

GORNI, Antônio Augusto. “Corte & conformação de metais.” *Estudo traça relações entre microestrutura e propriedades mecânicas em aços estruturais*. Março de 2008.

GORNINSKI, Jane Proszek. “*Estudo da influência das resinas poliéster isoftálica e oftotálica e do teor de cinza volante nas propriedades mecânicas e durabilidade do concreto polímero*”. Porto Alegre, 2002.

GORNINSKI, Jane Proszek, e Claudio de Souza KAZMIERCZAK. “.” *Avaliação da resistência química de concretos poliméricos em ambientes agressivos*, 2008: p. 105-113.

HIGUERO, Victoria Águila. “Características físicas y mecánicas de hormigones reforzados con fibras de: vidrio, carbono y aramida.” Madrid, 2010.

JAIGOBIND, Allan George A., Lucia do AMARAL, e Sammay JAISINGH. “Dorriê técnico: fabricação de peças em fibra de vidro (compósitos).” Paraná: Instituto de Tecnologia do Paraná, Maio de 2007.

JENSEN, Vernon P. “Ultimate strength of reinforced concrete beams as related to the plasticity ratio of concrete.” Vol. 40. n. 44. Illinois: University of Illinois Urbana, 1943.

JÚNIOR, Altibano Ortenzi. “A fibra de vidro em Matrizes Poliméricas e Cimentícias e seu uso estrutural em construção civil - A Estado da arte.” São Carlos: UFSCar, 2007.

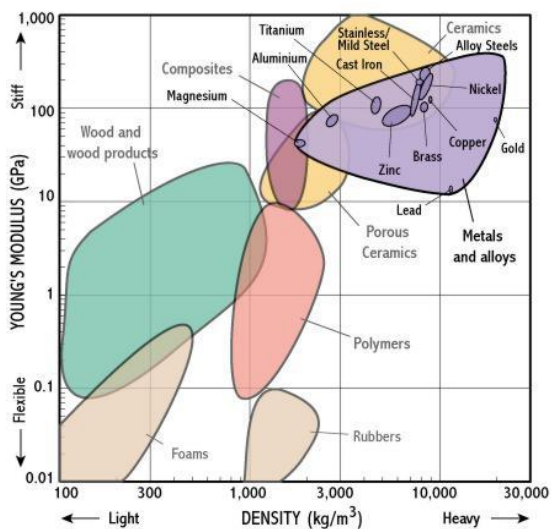
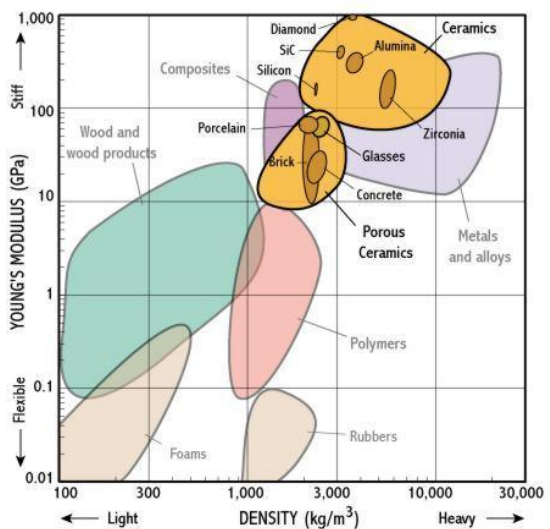
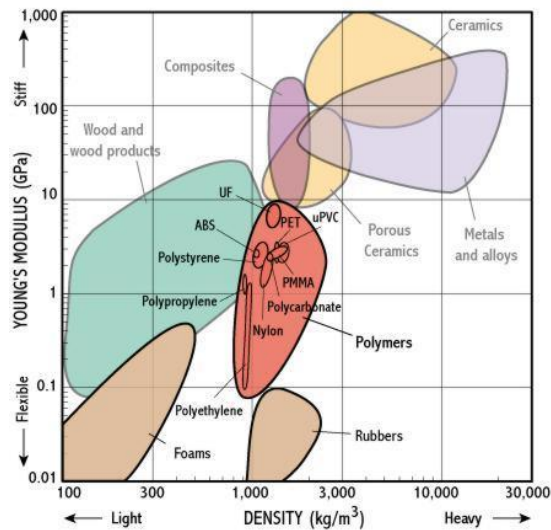
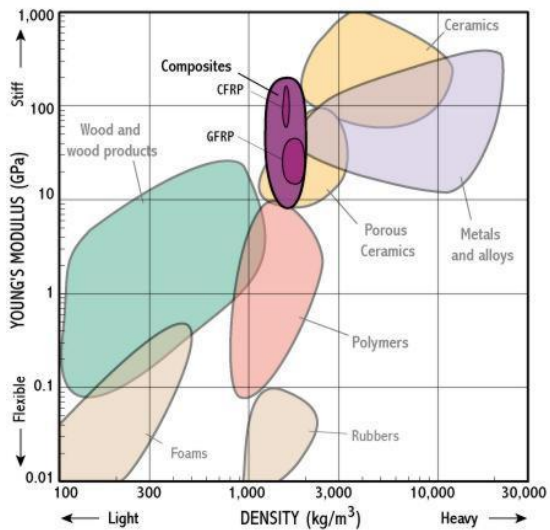
JÚNIOR, Tarley Ferreira de Souza. “Estruturas de concreto armado - notas de aula.”

- KIRCHOF, Larissa Degliuomini, e Jorge Munaiar NETO. "Cadernos de Engenharia de Estruturas." *Uma contribuição ao estudo de vigas mistas aço-concreto simplesmente apoiadas em temperatura ambiente e em situação de incêndio*. Vol. 7. n. 25. São Carlos, 2005. 1-31.
- LIMA, Bento José de. "Novo Marco regulatório do setor ferroviário - audiência pública." VALEC- Engenharia, construções e Ferrovias S.A., 2013.
- MACHADO, Marcelo Augusto da Silva. "Aplicação do método dos elementos finitos para a análise elasto-viscoplástica de peças de concreto armado e protendido, submetidas a estados planos de tensão." Porto Alegre, 2002.
- MASSARENTE, Marcelo, Antonio SERRANO, Leticia MACHADO, Luciana HARA, e Victor FRAZÃO. *Alumínio no Brasil: transformações nos últimos 15 anos*. São Paulo: Bain & Company, 2013.
- MEIRELES, José Filipe Bizarro de. "ANÁLISE DINÂMICA DE ESTRUTURAS POR MODELOS DE ELEMENTOS FINITOS IDENTIFICADOS EXPERIMENTALMENTE ." Guimarães, 2007.
- MENEGHETTI, Leila Cristina, Luiz Carlos Pinto da Silva FILHO, e Mônica Regina GARCEZ. "Verificação da possibilidade de variação das fibras formadoras do compósito nos sistemas PRF aplicados no reforço à flexão de vigas de concreto armado". Vol. v. 16. n. n° 1/2. Porto Alegre, Rio Grande do Sul, jan-dez de 2007. p. 107.
- MENEGHETTI, Leila Cristina, Mônica Regina GARCAZ, Luiz Roberto MENEGHETTI, Luiz Carlos Pinto da Silva FILHO, e Francisco de Paula Simões Lopes GASTAL. "Comportamento à fadiga de vigas de concreto armado reforçadas com fibras de aramida." Porto Alegre, 2008. 16.
- MORAES, Claudio Bernardo Guimarães de. "Circular nº 16/2013 BNDES." Rio de Janeiro, 2013.
- OLIVEIRA, Raphael Guimarães. "Produção e reciclagem de aços inoxidáveis." Rio de Janeiro, Agosto de 2009. 51.
- OTA, Waldyr Naoki. "Análise de compósitos de polipropileno e fibras de vidro utilizados pela indústria automotiva nacional." Curitiba, 2004.
- PANNONI, Fábio Domingos. "Aços estruturais." Gerdau Açominas S.A., 2002.
- RAMIREZ, Amando Padilla, Gilberto Galindo CASTRO, Luis Miguel MORELOS, e Gilberto CONTRERAS. "Materiales compuestos en la construcción." 2º congresso internacional Poliformas plásticas, 2010.

- SANTOS, Antônio Carlos. “Ensaio para análise da interface entre o concreto e polímero reforçado com fibra.” Edição revisada 155f. São Paulo, 2003.
- SANTOS, Júlio Cesar dos. “Compósitos laminados têxteis de vidro e carbono em matriz epóxi reforçada com micro e nano sílica.” Vol. S237c. São João Del-Rei: Universidade Federal de São João Del-Rei, 2013. 75-82.
- SARAIVA, Rebeca Montenegro Dias de Carvalho, Ana Maria Abreu TEIXEIRA, e Luiz Antonio Vieira CARNEIRO. “Estudos sobre reforço de pilares de concreto armado com materiais compósitos de resina e fibras.” Rio de Janeiro, 2013. 1-20.
- SCHWANKE, Cristiane Machado. “Obtenção de titânio particulado pelo processo hidratação-dehidratação.” Porto Alegre, 2000.
- SHACKELFORD, James F., e Willian ALEXANDER. “Materials Science and Engineering Handbook.” n. 3th edition. Florida: CRC, 2001.
- STORTE, Marcos. “Látex estireno-butadieno aplicação em concretos de cimento e polímero.” São Paulo, 1991.
- TANESI, Jussara, e Vahan AGOPYAN. “Anais - II Encontro tecnologia de sistemas plásticos na construção civil.” *Compósitos reforçados com fibras plásticas para construção civil*. São Paulo: EPUSP, 1997. p. 220-252.
- VIVAS, Viviane. “Influência da degradação ambiental no comportamento mecânico e balístico de compósitos produzidos com fibra de polietileno de ultra alto peso molecular.” Rio de Janeiro, 2013.
- VODRAN, G. L., M. NAGABHUSHANAM, e V. RAMAKRISHMAN. “Fatigue strength of polypropylene fiber reinforced concretes.” *Fibre reinforced cements and concretes*. Swamy, 1999. p. 533-543.
- VOSSLOH COGIFER. “Aparelhos de mudança de via.” Vossloh Cogifer. Paris, 2014.
- VOSSLOH COGIFER. *V-TRAM A complete range of points & crossings for modern tramway*. Vossloh Cogifer. Paris, 2014.
- WIEBECK, Hélio, e Júlio HARADA. *Plásticos de engenharia: tecnologia e aplicações*. São Paulo: Artliber, 2005.

# ANEXO

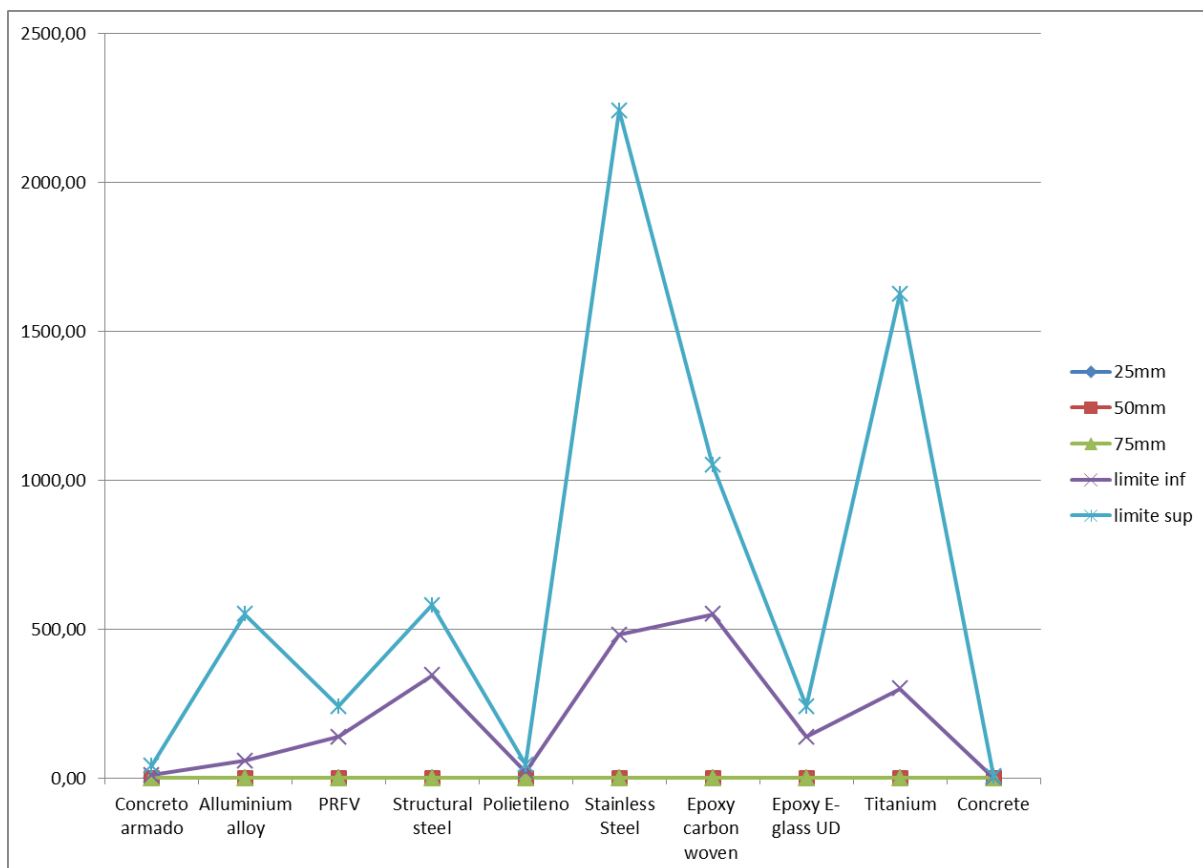
Gráficos citados - módulo de Young versus Densidade (ASHBY & JOHNSON, 2010)



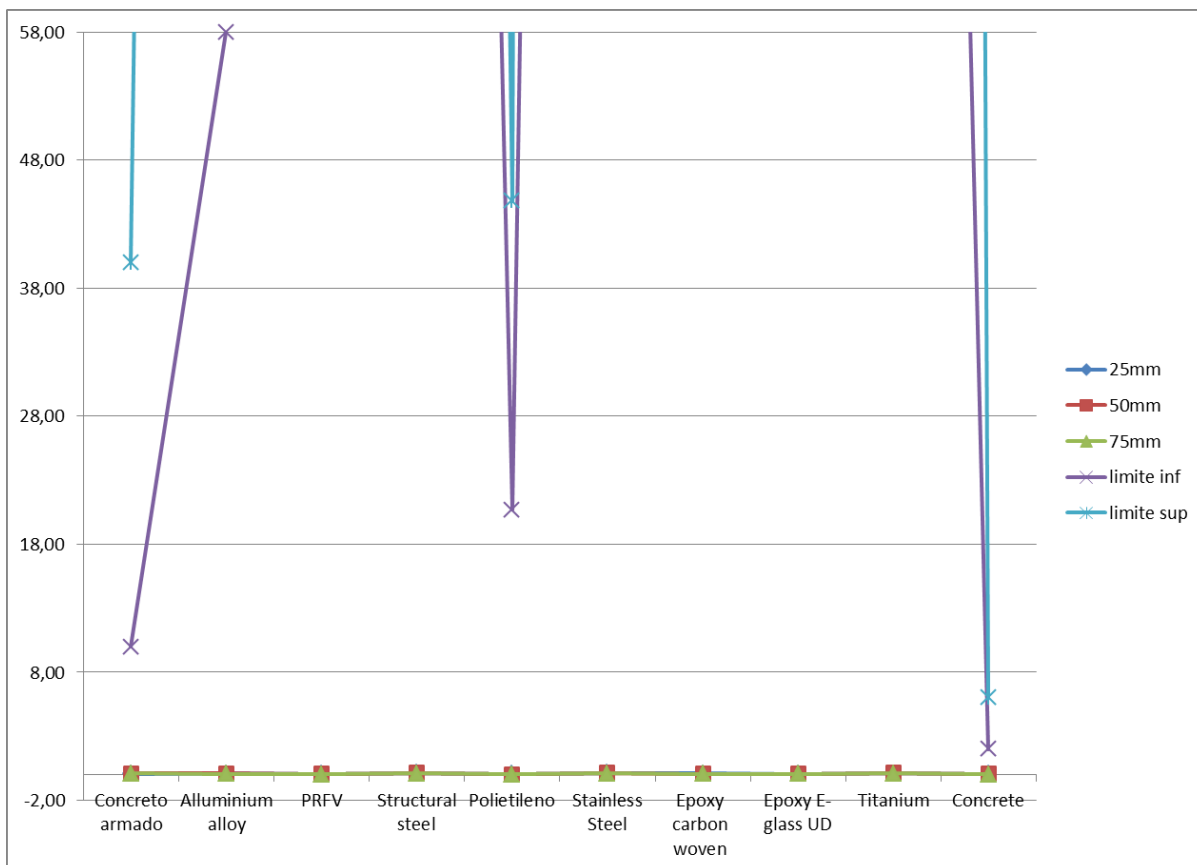


# APÊNDICE

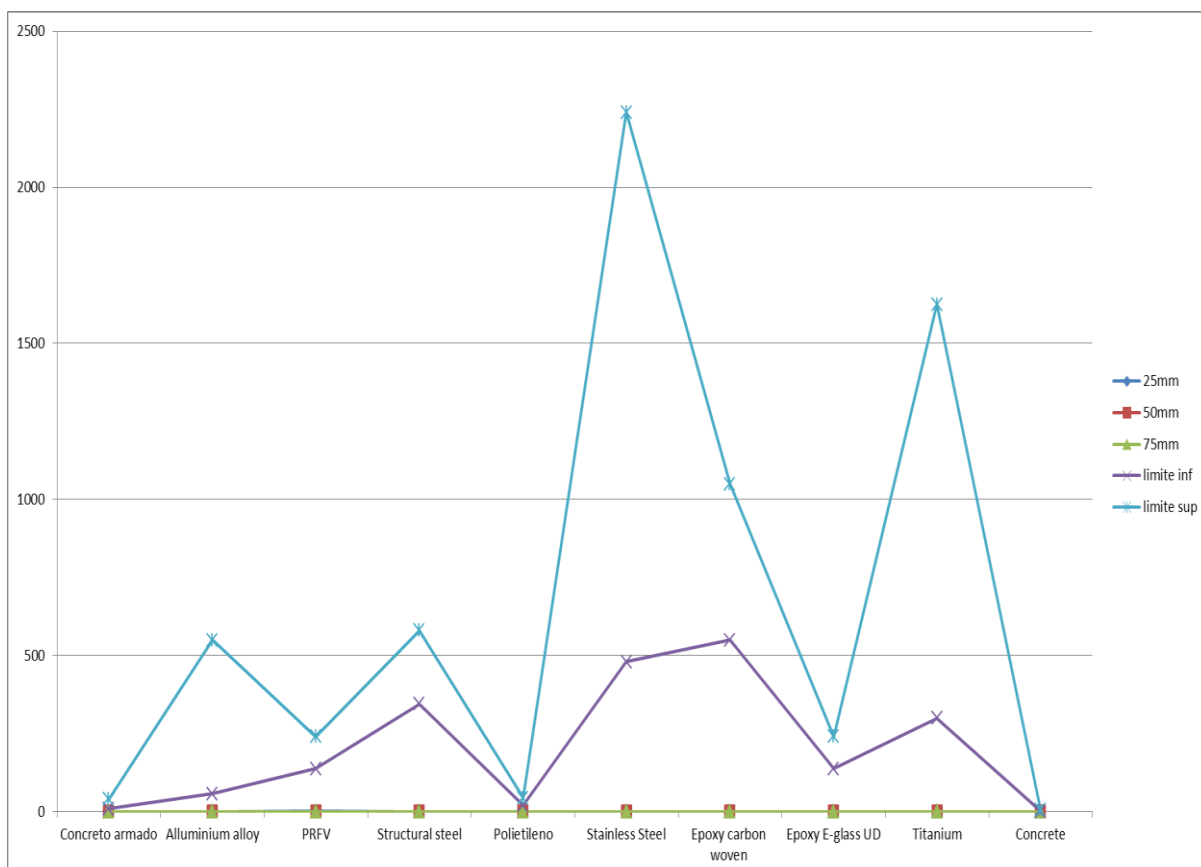
Gráficos citados - comparação entre tensão normal da simulação no *Ansys 15.0* e limite de resistência à tração inferior e superior.



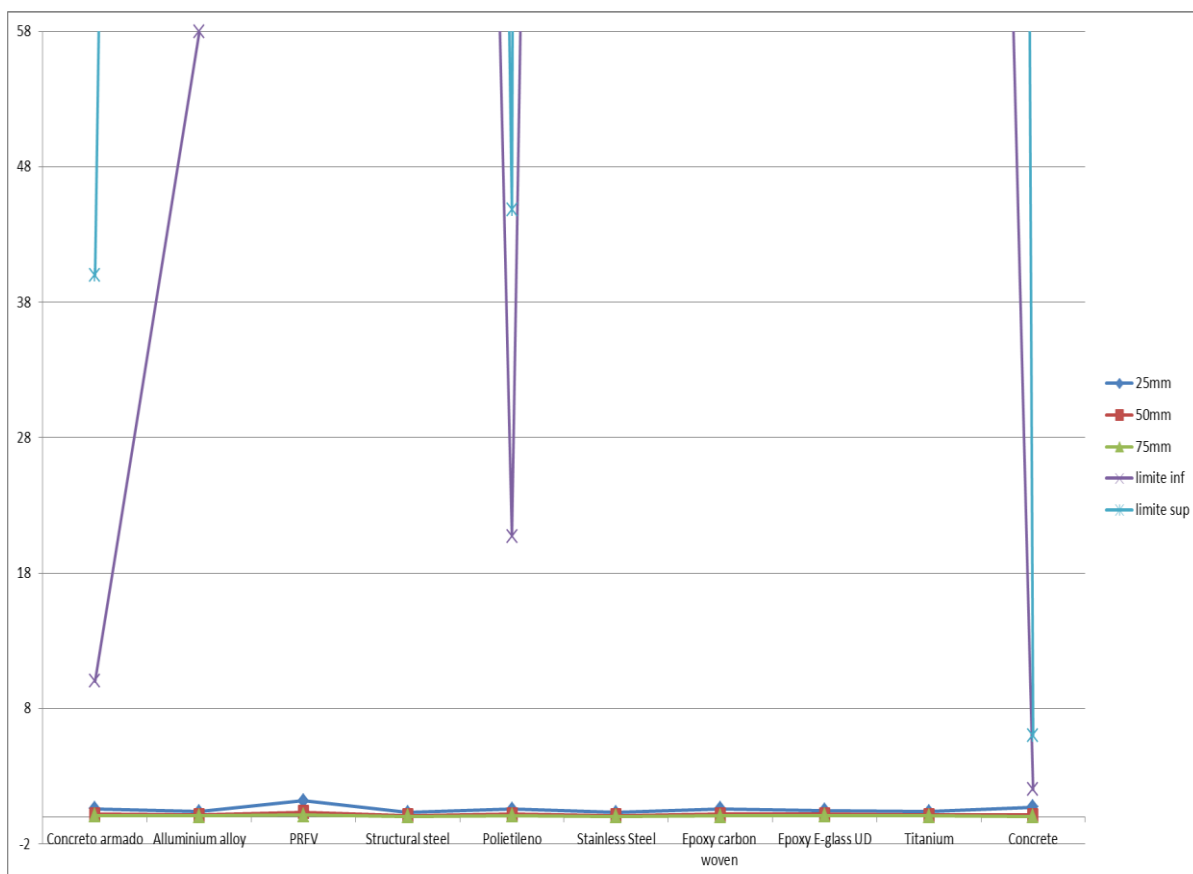
Apêndice 19 Comparação entre as tensões normais obtidas na simulação da caixa em relação ao limite de resistência à tração inferior e superior.



Apêndice 20 Comparação entre as tensões normais obtidas na simulação da caixa em relação ao limite de resistência à tração inferior e superior.



Apêndice 21 Comparação entre as tensões normais obtidas na simulação da tampa em relação ao limite de resistência à tração inferior e superior.



Apêndice 22 Comparação entre as tensões normais obtidas na simulação da tampa em relação ao limite de resistência à tração inferior e superior.