

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

GABRIEL LARIDONDU DOMINGUES

**DESENVOLVIMENTO DE UMA CANECA EM POLÍMERO PARA
MOVIMENTAÇÃO DE GRANÉIS**

LONDRINA

2023

GABRIEL LARIDONDU DOMINGUES

**DESENVOLVIMENTO DE UMA CANECA EM POLÍMERO PARA
MOVIMENTAÇÃO DE GRANÉIS**

Development of a polymer mug for handling bulks

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título
de Bacharel/Licenciado em Engenharia de Produção
da Universidade Tecnológica Federal do Paraná
(UTFPR).

Orientador: Dr. Érico Daniel Ricardi Guerreiro

LONDRINA

2023



Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

GABRIEL LARIDONDU DOMINGUES

**DESENVOLVIMENTO DE UMA CANECA EM POLÍMERO PARA
MOVIMENTAÇÃO DE GRANÉIS**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título
de Bacharel/Licenciado em Engenharia de Produção
da Universidade Tecnológica Federal do Paraná
(UTFPR).

24/novembro/2023

Érico Daniel Ricardi Guerreiro
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Marcio Florian
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Marco Antônio Ferreira
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

LONDRINA

2023

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Elevador de caneca carregando silo metálico e secador	8
Figura 2 – Funcionamento de um elevador de caneca	9
Figura 3 – Caneca de elevador vertical	10
Figura 4 – Modelos de canecas de transporte de graneis	11
Figura 5 – Grau de resistência a impacto	14
Figura 6 – Grau de resistência a abrasão	14
Figura 7 – Propriedades físicas dos polímeros	15
Figura 8 – Abrasímetro	19
Figura 9 – Máquina Universal de Ensaio.....	21
Figura 10 – Ensaio FEA no Solidworks de uma cantoneira.....	24
Figura 11 – Canecas do tipo CF-SF com deformação plástica.....	31
Figura 12 – Croqui da caneca 12X8 M3.....	33
Figura 13 – Elementos de fixação.....	35
Figura 14 – Análise do ensaio de tensão.....	35
Figura 15 – Análise do ensaio de deformação.....	36
Figura 16 – Propriedades volumétricas e mecânicas da caneca metálica sem fundo.....	36
Figura 17 – Ensaio de tensão da caneca metálica sem fundo.....	37
Figura 18 – Ensaio de deformação da caneca metálica sem fundo.....	37
Figura 19 – Propriedades volumétricas e mecânicas da caneca metálica com fundo.....	38
Figura 20 – Ensaio de tensão da caneca metálica com fundo.....	39
Figura 21 – Ensaio de deformação da caneca metálica com fundo.....	39
Figura 22 – Propriedades volumétricas e mecânicas da caneca 12X8 M3 em Nylon 6.....	42
Figura 23 – Ensaio de tensão da caneca 12X8 M3 em Nylon 6.....	43
Figura 24 – Ensaio de deformação da caneca 12X8 M3 em Nylon 6.....	43
Figura 25 – Propriedades volumétricas e mecânicas da caneca 12X8 M3 em PU.....	44
Figura 26 – Ensaio de tensão da caneca 12X8 M3 em PU.....	45

Figura 27 – Ensaio de deformação da caneca 12X8 M3 em PU.....	45
Figura 28 – Comparativo das análises das canecas.....	46
Figura 29 – Modelo de implantação CAD para acoplamento DEM sem detalhes estruturais.....	48
Figura 30 – Vista lateral do carregamento.....	49
Figura 31 – Vista isométrica do carregamento.....	50
Figura 32 – Elevação baixa.....	50
Figura 33 – Elevação alta.....	51
Figura 34 – Vista lateral do descarregamento.....	52
Figura 35 – Vista isométrica do descarregamento.....	52
Figura 36 – Análise gráfica do sistema.....	53
Figura 37 – Análise gráfica do retorno.....	54
Figura 38 – Vista lateral do carregamento.....	54
Figura 39 – Vista isométrica do carregamento.....	55
Figura 40 – Elevação baixa.....	56
Figura 41 – Elevação alta	56
Figura 42 – Vista lateral do descarregamento	57
Figura 43 – Vista isométrica do descarregamento.....	58
Figura 44 – Análise gráfica do sistema	59
Figura 45 – Análise gráfica do retorno	60
Figura 46 – Replica 3D em filamentos da caneca 12X8 M3	61
Figura 47 – Molde macho e fêmea da caneca 12X8 M3	62
Figura 48 – Primeiras canecas 12X8 M3 injetadas.....	63

RESUMO

A agricultura brasileira desempenha um papel crucial na economia, contribuindo significativamente para o PIB, emprego e exportações. Apesar da importância, a falta de avanços tecnológicos em equipamentos agrícolas, como elevadores, resulta em desafios, especialmente relacionados a componentes metálicos, como canecas. Este estudo aborda a substituição de canecas metálicas por versões de alto desempenho em polímero, enfrentando a resistência dos *stakeholders*. O objetivo principal é desenvolver canecas de polímero como alternativa eficaz às metálicas. A metodologia inclui análise de dados em campo, projeto no *Solidworks*, simulações computacionais, escolha de polímeros adequados e testes de eficiência. O foco é oferecer canecas com as mesmas dimensões, mas com resistência, capacidade de carga e durabilidade superiores. A solução proposta demonstrou eficácia, consistindo na criação de canecas em polímero (Nylon 6 e PU) que superam as metálicas em resistência, capacidade de carga e redução de peso. Além disso, essas canecas eliminam o risco de faíscas, mitigando potenciais explosões. Os métodos de simulação (DEM e FEA) validaram a eficiência do design. Conclui-se que a produção em massa dessas canecas é viável, proporcionando benefícios significativos à Empresa B e possivelmente a outros elevadores similares.

Palavras-chave: agricultura brasileira; canecas metálicas; polímero de alto desempenho; simulações computacionais.

ABSTRACT

The Brazilian agriculture plays a crucial role in the economy, significantly contributing to the GDP, employment, and exports. Despite its importance, the lack of technological advancements in agricultural equipment, such as elevators, poses challenges, particularly related to metallic components like buckets. This study addresses the replacement of metallic buckets with high-performance polymer versions, overcoming resistance from stakeholders. The main objective is to develop polymer buckets as an effective alternative to metallic ones. The methodology includes field data analysis, Solidworks design, computational simulations, selection of suitable polymers, and efficiency testing. The focus is on providing buckets with the same dimensions but superior strength, load capacity, and durability. The proposed solution has proven effective, involving the creation of polymer buckets (Nylon 6 and PU) that outperform metallic ones in terms of strength, load capacity, and weight reduction. Additionally, these buckets eliminate the risk of sparks, mitigating potential explosions. Simulation methods (DEM and FEA) have validated the efficiency of the design. It is concluded that mass production of these buckets is viable, offering significant benefits to Company B and potentially to other similar elevators.

Keywords: Brazilian agriculture; metallic buckets; high-performance polymer; computational simulations.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	3
1.1	Objetivos	5
1.1.1	Objetivos geral	5
1.1.2	Objetivos específicos	5
2	REFERENCIAL TEÓRICO	7
2.1	Modelos de canecas	11
2.1.1	Canecas plásticas	13
2.2	Polímeros	13
2.2.1	PEAD	15
2.2.2	PEAD Eagle	16
2.2.3	Nylon 6	16
2.2.4	Nylon 6.6	17
2.2.5	PU	17
2.3	Testes de validação do conceito	18
2.3.1	Abrasão	18
2.3.2	Tração	20
2.3.3	Deformação plástica e elástica	21
2.3.4	Elementos finitos	22
2.4	Método DEM	25
2.5	Prototipagem rápida	28
3	MATERIAIS E MÉTODOS	29
3.1	Análise do produto	29
3.2	Projeto das canecas de polímero	30
3.3	Prototipação das canecas de polímero	30
4	RESULTADOS	31
4.1	Ensaio mecânico das canecas metálicas	34
4.1.1	Caneca sem fundo	36
4.1.2	Caneca com fundo	38
4.2	Ensaio mecânico das canecas poliméricas	40
4.2.1	Caneca 12X8 M3 em nylon 6	42
4.2.2	Caneca 12X8 M3 em PU	44

4.3	Avaliações DEM	47
4.3.1	Simulação diagnóstica – canecas metálicas.....	49
4.3.2	Simulação solução – caneca 12X8 M3.....	54
4.4	Prototipagem	60
5	CONCLUSÃO	64
6	REFERENCIAS	66

1 INTRODUÇÃO

A agricultura brasileira é reconhecida como altamente competitiva e geradora de empregos, de riqueza, de alimentos, de fibras e de bioenergia para o Brasil e para outros países. É um dos setores que mais contribui para o crescimento do PIB nacional, responde por 21% da soma de todas as riquezas produzidas, um quinto de todos os empregos e 43,2% das exportações brasileiras, chegando a US\$ 96,7 bilhões em 2019 (Vendas..., 2020).

Apesar da sua importância, esse setor persiste na precariedade de novas tecnologias, principalmente, se tratando de equipamentos e seus insumos. Dentre esses equipamentos destacam-se os elevadores agrícolas, correias transportadoras, roscas sem-fim e transportadores *redlers*. E dentre os insumos destes equipamentos destacam-se as canecas, correias, kits de fixação, borracha plásticas, emendas mecânicas, dentre outras.

A Empresa A é uma empresa não apenas voltada em injeção e extrusão de polímeros, mas que também visa solucionar problemas e desenvolver novos produtos e tecnologias.

O presente projeto trata da substituição de canecas metálicas do modelo CF-SF (canecas com fundo intercaladas com canecas sem fundo) por canecas de alta performance a base de polímeros.

Essa substituição possui como principal empecilho a desconfiança dos *stakeholders*, que insistem em manter as canecas metálicas, uma vez que funcionam até o presente momento.

Atualmente, a empresa B sofre com quebra constante e precoce de canecas e capacidade abaixo da ideal, uma vez que por serem metálicas, deformam plasticamente, não retornando para a configuração atual. Por estarem deformadas, perdem a capacidade volumétrica dimensionada e também se chocam mais com as calhas do elevador, até romperem por completo.

Não somente em épocas de safra, onde os elevadores e demais equipamentos são fortemente solicitados, como nos outros períodos do ano, equipamentos inativados por problemas repentinos geram muito prejuízo para as empresas. Logo, quando uma caneca dentro de um elevador quebra, ela inativa todo

o equipamento e obriga a parada do processamento de produto, acarretando atraso da produção.

Além da quebra de canecas, a empresa B também sofre com a baixa capacidade de um dos elevadores. O elevador se torna gargalo na linha de processamento de grão. Por ser um gargalo, esse equipamento limita a capacidade máxima daquela linha inteira.

Partindo da situação atual do cliente, a Empresa A tem o desafio de desenvolver uma caneca que, além de substituir com as mesmas dimensões a caneca atual, entregue uma solução que resista à impactos e à abrasão, além de apresentar uma alta capacidade de transporte.

Alguns anos atrás todos os elevadores de grãos utilizavam canecas metálicas pelo baixo custo de fabricação, pois bastava um soldador com uma máquina de corte, solda e chapa metálica para confecção das canecas. Todavia, com o desenvolvimento das pesquisas em diversos polímeros, notou-se que essas canecas, até então metálicas, poderiam ser facilmente substituídas por canecas plásticas.

Os ganhos por essa simples substituição são vários, desde o baixo custo das canecas plásticas, menor peso quando comparadas às similares metálicas, e principalmente a deformação elástica presente nas canecas em polímero. O metal não possui a mesma deformação elástica que os plásticos, quando ele sofre uma força externa, ele deforma plasticamente e não volta ao seu estado inicial, diferente dos polímeros, que após a aplicação da força, tendem a retornar ao seu estado natural, desde que a tensão não ultrapasse o limite de escoamento.

Durante o transporte dos produtos no interior dos elevadores, alguns produtos são danificados e um pó é gerado, como é o caso da soja e milho que são os produtos mais transportados. Esse pó fica em suspensão no ar, com grande área de contato. Pelo fato de as canecas metálicas produzirem faíscas quando se chocam com a calha do elevador, o elevador tende a explodir e provocar incêndios. Algumas medidas de segurança são tomadas hoje em dia, como utilização de correias anti-chama, anti-óleo e anti-estática, entretanto mesmo assim alguns acidentes ainda ocorrem. Não se deve combater a consequência e sim a causa, evitar a faísca no interior dos elevadores sendo que não é possível evitar por completo o pó (mesmo com exaustores) e o ar, sendo esses um dos 3 componentes essenciais para a

combustão. Órgãos da Segurança do Trabalho estão sendo rigorosos nas fiscalizações e multando cooperativas que ainda persistem em canecas metálicas, uma vez que canecas plásticas não produzem nenhum tipo de faísca e evitam essas explosões.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivos geral

O presente trabalho tem como objetivo principal, desenvolver uma caneca em polímero que seja uma alternativa viável para substituir canecas similares fabricadas em metal.

1.1.2 Objetivos específicos

O trabalho em questão seguiu uma metodologia específica, detalhada através de objetivos específicos.

- 1) Realizar uma visita em campo para coleta de dados, da caneca atual, do equipamento e do produto transportado;
- 2) Com os dados em mãos, analisar a possibilidade de utilizar uma caneca já confeccionada pela Empresa A, se as dimensões coincidem com a caneca atual do cliente, a litragem e a eficiência para as especificações daquele elevador. Caso haja, ela é indicada e finaliza-se o processo, caso contrário uma nova caneca deve ser desenvolvida;
- 3) Projetar no *Solidworks*, software de CAD 3D, um modelo similar da caneca do cliente, modificando o perfil e demais medidas para aumentar a performance de carregamento e descarregamento, além da resistência estrutural;
- 4) Em seguida, testar a caneca computacionalmente, através do método FEA. Esse processo é realizado tanto para a nova caneca quanto para a caneca atual do cliente;

- 5) Caso a nova caneca apresente um comportamento igual ou superior a caneca do cliente, passar para a próxima etapa. Caso contrário, refazer o modelo 3D até a caneca apresentar as mesmas dimensões externas, litragem igual ou superior e resistências mecânicas iguais ou superiores;
- 6) A próxima etapa é conferir a eficiência da caneca. Simular tanto a caneca atual quando a caneca projetada, numa versão computacional do mesmo equipamento em campo, utilizando uma versão do produto calibrado dentro do software. O método utilizado para simular é o DEM, que reproduz com precisão o produto sendo carregado pelas canecas no interior do elevador, apontando possíveis ineficiências;
- 7) Caso não seja encontrada nenhuma ineficiência, principalmente no carregamento e no descarregamento do produto pela caneca, realizar a prototipagem rápida e posteriormente apresentar ao comitê dos gestores, caso contrário refazer o processo de modelagem 3D para corrigir a ineficiência;
- 8) Após aprovação do comitê, enviar a uma empresa para ela realizar o projeto do molde;
- 9) Em seguida, acionar uma segunda empresa terceira especializada em usinagem e solicitar a confecção do molde e realizar testes de injeção;
- 10) Iniciar os testes de injeção da própria Empresa A pela equipe de Produção;
- 11) Encaminhar as primeiras canecas injetadas para a equipe de Qualidade que reproduz os mesmos testes realizados computacionalmente pela Engenharia, mas em máquinas reais e testes práticos. Caso os resultados sejam de acordo com os esperados, a produção em massa é liberada. Caso ela não performe adequadamente, um *retrofit* é necessário. O processo de *retrofit* não será abordado neste presente trabalho, uma vez que varia de acordo com o projeto e problema encontrado, não sendo possível detalhar os passos a serem seguidos. Quando a Empresa A encontra um problema que necessite de retrofit, após a solução do problema, toda a equipe aprende a corrigir e nunca mais o mesmo erro ocorre, passa a fazer parte do checklist dos projetos.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Nesse tópico, serão apresentados termos e conhecimentos específicos da área de estudo do presente trabalho, juntamente com explicações e citações a fim de esclarecer possíveis dúvidas. Dentre os assuntos abordados, destacam-se os elevadores de canecas, os modelos de canecas existentes, os tipos de polímeros utilizados para injetar as canecas, esforços sofridos pelas canecas durante a operação dos elevadores e métodos de validação dos testes.

De acordo com os conhecimentos adquiridos pela empresa A durante anos de atuação no mercado, os elevadores de canecas são cruciais para a movimentação de produtos a granel ao redor do mundo. São utilizados no embarque e desembarque em portos, processamento em indústrias como extração de açúcar e óleo, processamento em moinhos de trigo, armazenamento de cereais, entre outros.



Figura 1 – Elevador de caneca carregando silo metálico
Fonte: <https://mared.com.br/elevador-de-canecas/>

A parte mais inferior dos elevadores, conhecida como pé do elevador, é responsável por sustentar toda a estrutura do elevador, além de acomodar o tambor inferior. É na calha de alimentação, por onde o elevador é alimentado com o produto. Ele pode chegar até a bica de alimentação por canalização, tubulações, moegas, chutes de correias transportadoras, *redlers*, dentre outros equipamentos. Assim que o produto adentra o elevador, ele carrega as canecas que estão fixas na correia.

Essa correia circunda o tambor superior e o tambor inferior, sendo tracionado por motores que sempre ficam na extremidade, conhecido também como cabeça do elevador.

O motor transmite o torque para o tambor superior, que por ser emborrachado traciona a correia que inicia seu movimento de rotação entre os tambores. As canecas que estão fixadas em toda sua extensão, captam o produto no pé do elevador, eleva até a cabeça do elevador e arremessa na calha de descarregamento.

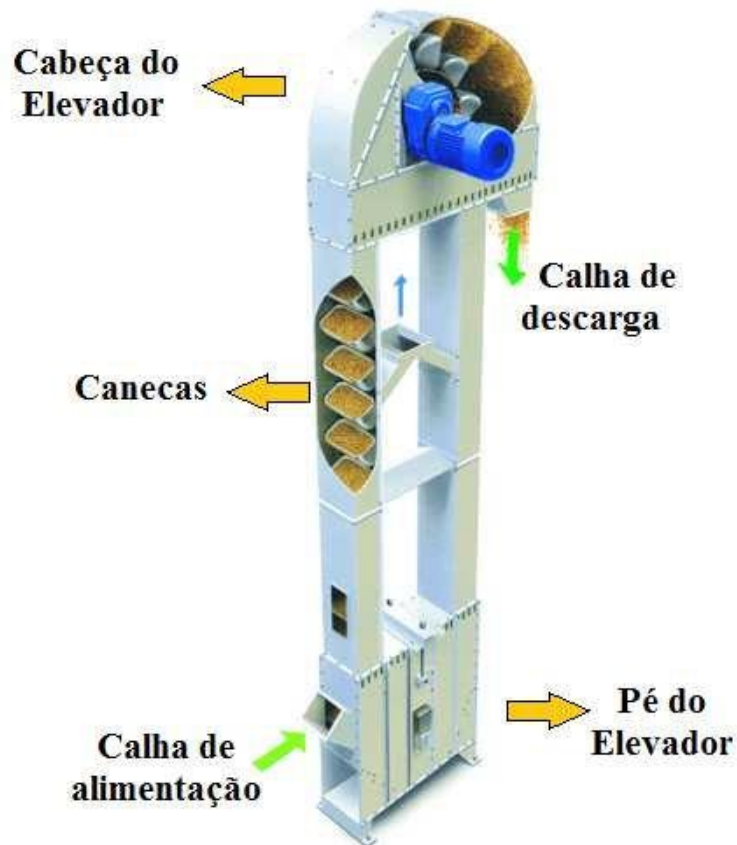


Figura 3 – Funcionamento de um elevador de caneca
Fonte: <https://www.fabricadoprojeto.com.br/2013/02/serie-transportadores-elevador-de-canecas/>



Figura 3 – Caneca de elevador vertical
Fonte: www.empresa A.com.br

Com aplicação de softwares de desenho assistido por computador, CAD 3D e método de elementos discretos (DEM), pode-se observar o movimento mecânico de materiais particulados dentro de equipamentos complexos e de fluxos contínuos. Com isso, é possível minimizar erros de dimensionamento e até mesmo otimizar processos existentes na indústria.

Neste trabalho será focado apenas nos modelos atual e proposto para o equipamento, fazendo a análise do material e resistência mecânica, além de apresentar as etapas utilizadas na análise DEM. Esta etapa é fundamental para a comprovação dos resultados antes mesmo da aplicação em campo, reduzindo para zero os custos com tentativa e erro.

2.1 Modelos de canecas

O modelo de caneca deve ser adequado a cada tipo de elevador, tendo em vista que o ângulo de descarga proveniente de cada modelo influencia diretamente na capacidade de carregamento. A utilização de modelo de caneca incorreto gera retorno de massa de grãos e acúmulo de produto no pé do equipamento ADAMSON (1991).



Figura 4 – Modelos de canecas de transporte de graneis
Fonte: Autoria própria

De acordo com a Figura 4, sabe-se que há 5 modelos principais de caneca de polímero utilizadas em elevadores.

O modelo tipo C é o mais antigo, foi o primeiro modelo de caneca em polímero. Seu perfil é o mesmo das canecas metálicas. Tem uma projeção menor e uma altura maior, logo apresenta menor capacidade volumétrica, mas um excelente descarregamento. Hoje em dia esse modelo de caneca é utilizado no transporte de café, as demais estão sendo substituídas pelo modelo S.

O tipo S, apresenta uma altura menor, logo pode ser utilizada em maior quantidade quando comparada com as canecas tipo C. Além disso apresenta maior projeção também, e por consequência uma maior capacidade volumétrica. Em contrapartida não apresenta a mesma eficiência de descarregamento da caneca C, mas para converter esse empecilho, fabricantes de elevadores estão dimensionando elevadores com diâmetro (\varnothing) de tambores maiores, proporcionando maior tempo de descarregamento e oferecendo para os modelos de caneca S o tempo necessário para o descarregamento. Por isso elevadores com canecas C estão sofrendo retrofit e sendo substituídos por canecas S, aumentando a capacidade do elevador e mantendo a performance.

O modelo CF-SF, conhecida também como canecas vazadas ou sem fundo, são canecas recomendadas em elevadores onde o cliente necessita de um aumento de capacidade acima da capacidade que a caneca S pode oferecer, nesses casos extremos, utiliza-se as canecas CF-SF e extrapola-se a capacidade do equipamento, mas pelo fato das canecas CF-SF apresentarem retorno de produto na ascendente, movimento de elevação das canecas, elas são limitadas em utilizações em elevadores de até 20 metros de altura, acima dessa altura não é recomendado a sua utilização pois a capacidade diminui pelo retorno e sua viabilidade é inativada.

Tanto o modelo S, C e CF-SF, são utilizados em elevadores em regime agrícola, ou seja, regimes sazonais, operando em alguns momentos do ano apenas, como é o caso dos armazéns.

Quando a operação é mais intensa, regime industrial, onde os elevadores operam 24 horas por dia durante todo o ano, como ocorre nos moinhos, indústrias e portos, utiliza-se canecas do tipo AP, Alta Performance. Esse modelo possui uma parede de caneca muito mais espessa, 11 mm nas canecas com 8" de projeção e 23 mm nas canecas com 10" de projeção. Essa parede mais espessa aumenta a vida útil das canecas diminuindo as manutenções de troca e consequentemente o tempo parado dos elevadores. Além disso elas resistem muito mais a impactos.

Por fim as canecas do tipo Z, são canecas específicas de elevadores conhecidos como flap-system. Esse tipo de elevador é especial de indústrias alimentícias de produtos frágeis, que não podem sofrer impacto senão danificam o produto, como é o caso dos salgadinhos de milho e batata. Além desses tipos de produtos, há também a aplicação para o transporte de sementes, que não podem

sofrer dano mecânico senão interrompem o “poder germinativo” da semente e ela não germina quando plantada. Esses elevadores são peculiares pela sua rotação limitada em 0,5 m/s, diferente dos elevadores convencionais que alcançam até 4,5 m/s, de acordo com a expertise adquirida pela empresa A durante 17 anos no mercado realizando testes práticos.

2.1.1 Canecas plásticas

Canecas plásticas são peças que como o próprio nome já diz, de material plástico, variando entre PEAD (polietileno de alta densidade), Poliamida 6 ou 66 (Nylon) e Poliuretano, com formato de “concha”, utilizadas para transportar material a granel.

Elas passaram a ser mais comercializadas no mercado de transporte e armazenamento de grão por serem alternativa viável à utilização de canecas metálicas. Não geram perda de eficiência no equipamento quando corretamente dimensionadas, eliminam o risco de explosões por faiscamento, e representam aproximadamente 30% do peso das equivalentes caçambas metálicas, de acordo com estudos internos realizados pela própria Empresa A.

O próximo tópico abordará uma revisão mais específica a respeito de cada um dos principais polímeros utilizados na fabricação de canecas.

2.2 Polímeros

Polímeros são formados por macromoléculas poliméricas os meros. Os plásticos são pertencentes ao grupo dos polímeros, e são utilizados em larga escala pelos mais diversos setores da indústria. Possuem grande processabilidade e algumas vantagens como: baixo custo, resistência ao impacto e à abrasão, são mais leves se comparados aos metais e podem ser reciclados (BEER, 2014).

Para a seleção do polímero a ser aplicado, considera-se dois fatores chaves: material transportado e regime de trabalho anual.

Os polímeros mais utilizados para confecção de canecas são o PEAD, PEAD EAGLE, NYLON 6, NYLON 6.6 e PU. O PEAD EAGLE é um desenvolvimento

próprio da Ucelo, possui a mesma base do PEAD mas com aditivos, e por ser patenteado recebeu a denominação EAGLE para remeter a empresa A.

Existem centenas de polímeros, entretanto por meio de um *benchmarking* realizado pela Empresa A sobre seus concorrentes, esses são os mais utilizados devido à alta fluidez durante a injeção e alto grau de resistência que oferecem. Além da pesquisa, testes foram realizados pelo tipo de Produção em cooperação com o time da Qualidade e dos polímeros testados, esses foram os que apresentaram melhores resultados. Por ser um estudo interno, não é possível apresentar nesse trabalho.

Esses polímeros podem ser analisados e ranqueados de acordo com a resistência a impacto e abrasão.

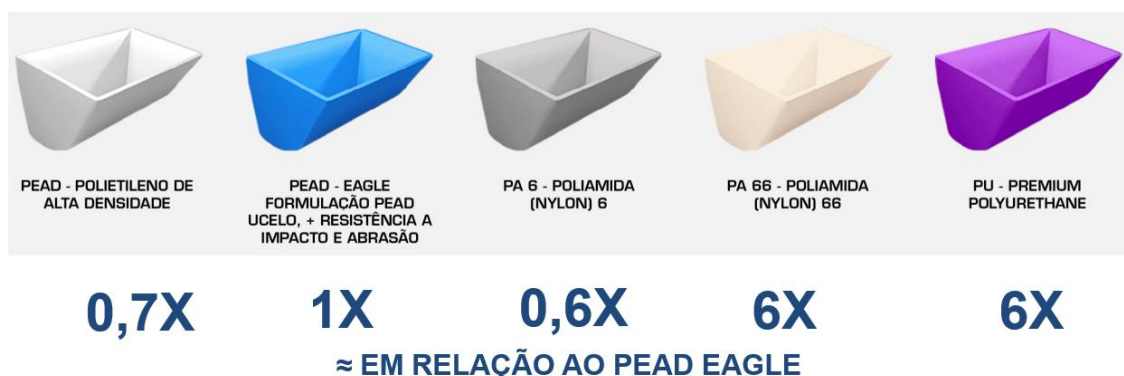


Figura 5 – Grau de resistência a impacto
Fonte: Autoria própria

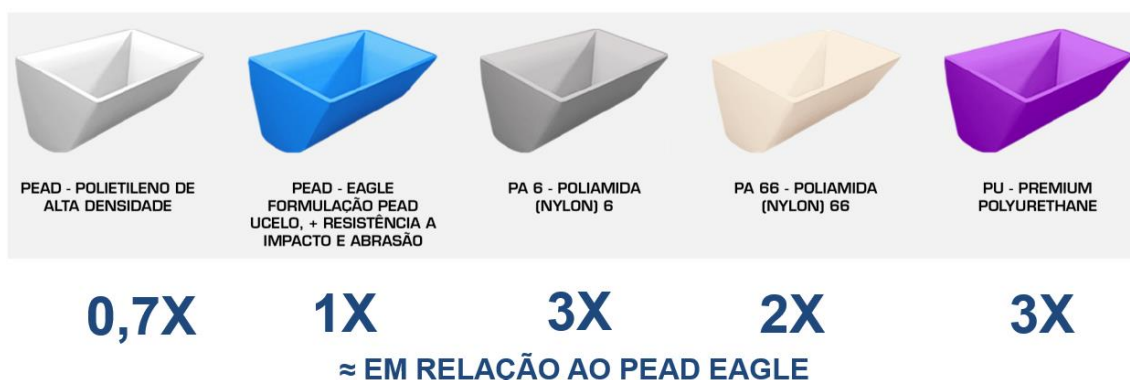


Figura 6 – Grau de resistência a abrasão
Fonte: Autoria própria

Segue, na Figura 7, as propriedades físicas dos polímeros citados anteriormente. Esses dados foram utilizados para calibrar o software *Solidworks* para as simulações FEA, durante a etapa de resultados, e foram obtidos do

Departamento de Qualidade da empresa A. De acordo com o responsável pelo departamento, esses dados são fornecidos pelos fornecedores de polímero, dos quais não podem ser citados por motivo de sigilo, e são atualizados a cada 6 meses pelos mesmos.

PROPRIEDADES	PEAD	PEAD EAGLE	NYLON 6	NYLON 6.6	PU
Módulo Elástico N/m ²	1,08E+09	1,07E+09	1,60E+09	2,00E+09	6,64E+08
Coeficiente de Poisson	0,450	0,410	0,380	0,280	0,394
Módulo de Cisalhamento N/m ²	3,73E+08	3,77E+08	6,18E+08	6,18E+08	6,18E+08
Massa Específica kg/m ³	955	952	1107	1080	1240
Resistência a Tração N/m ²	2,43E+07	2,44E+07	3,80E+07	3,92E+07	4,70E+07
Resistência a Compressão N/m ²	2,02E+07	2,02E+07	3,58E+07	3,58E+07	3,58E+07
Limite de Escoamento N/m ²	2,39E+07	2,40E+07	4,71E+07	5,00E+07	6,00E+07

Figura 7 – Propriedades físicas dos polímeros
Fonte: Autoria própria

2.2.1 PEAD

De acordo com Harper (2016), o polietileno de alta densidade (PEAD) é um dos polímeros mais amplamente utilizados na indústria de plásticos devido às suas excelentes propriedades físicas e químicas. Ele é produzido por polimerização do etileno em condições de alta pressão, resultando em uma estrutura de polímero altamente ramificada, que confere ao PEAD sua alta densidade e propriedades distintas.

A estrutura química do PEAD é caracterizada por ter uma alta densidade de ligações covalentes, resultando em uma estrutura altamente ramificada, o que lhe confere alta densidade e resistência. Essa estrutura é responsável pelas propriedades físicas e químicas únicas do PEAD, como sua rigidez, resistência a produtos químicos, resistência mecânica e resistência térmica (HARPER, 2016).

2.2.2 PEAD Eagle

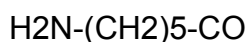
O PEAD Eagle possui a mesma cadeia do PEAD, composta por unidades repetitivas de etileno. O etileno é uma molécula simples que consiste em dois átomos de carbono (C) e quatro átomos de hidrogênio (H), e a unidade de repetição do polietileno é uma cadeia de carbono (-CH₂-CH₂-).

A fórmula química geral do PEAD pode ser representada como (C₂H₄)_n, onde "n" representa o número de unidades de etileno repetidas na cadeia. Quanto maior o valor de "n", maior será o peso molecular do PEAD, o que afeta suas propriedades (ASTM International, 2019). Apesar de possuir a mesma cadeia base, o PEAD Eagle é produzido com formulações, condições de polimerização e processo de fabricação específicos, resultando em um material com maiores resistências.

O PEAD Eagle é uma tecnologia própria da Empresa A desenvolvida, sintetizada e injetada pela mesma.

2.2.3 Nylon 6

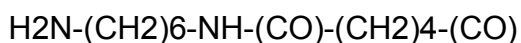
A poliamida, frequentemente conhecida como nylon, é um polímero amplamente utilizado devido às suas notáveis propriedades físicas e químicas. O nylon 6, ou poliamida 6, é um membro proeminente da família das poliamidas e é produzido a partir da polimerização da ε-caprolactama. Esta reação forma uma cadeia de polímero composta de unidades repetitivas, que contêm grupos amida em sua estrutura. Abaixo está a representação esquemática de uma unidade da cadeia de nylon 6:



Nesta estrutura, "H₂N" representa o grupo amino (-NH₂), "(CH₂)₅" indica uma cadeia de cinco átomos de carbono, e "CO" representa o grupo funcional de carbonila (-CO-) que forma a ligação amida (Polyamides, 2010).

2.2.4 Nylon 6.6

De acordo William Andrew, em seu livro *Nylon Plastics* de 1995, a poliamida 6.6, frequentemente conhecida como nylon 6.6, é um tipo específico de poliamida amplamente utilizada na indústria de plásticos devido às suas notáveis propriedades físicas e químicas. O nylon 6.6 é produzido por meio da polimerização da hexametilenodiamina e do ácido adípico, resultando em uma cadeia polimérica composta por unidades repetitivas com grupos amida. Abaixo está a representação esquemática de uma unidade da cadeia do nylon 6.6:



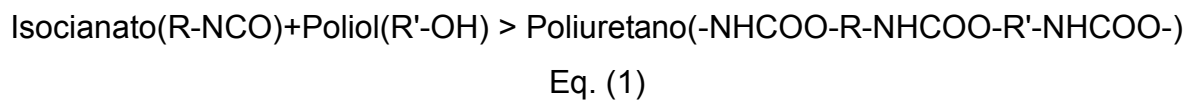
Nesta estrutura, "H₂N" representa o grupo amino (-NH₂), "(CH₂)₆-NH" indica uma cadeia de seis átomos de carbono ligados a grupos amino, e "(CO)-(CH₂)₄-(CO)" representa grupos funcionais de carbonila (-CO-) ligados a uma cadeia de quatro átomos de carbono, formando as ligações amida.

2.2.5 PU

O poliuretano (PU) é um polímero amplamente utilizado na indústria de plásticos, conhecido por sua versatilidade e ampla gama de aplicações. Os poliuretanos são criados através da reação química de isocianatos com polióis, resultando em uma ampla variedade de produtos que variam desde materiais flexíveis até rígidos.

A cadeia do poliuretano (PU) é formada por unidades repetitivas de diferentes grupos funcionais que podem variar dependendo da formulação e das reações químicas envolvidas na sua síntese. Os poliuretanos são produzidos por meio da reação de polióis (que contêm grupos hidroxila -OH) e isocianatos (que contêm grupos isocianato -NCO), e essas reações resultam em uma estrutura polimérica composta por ligações uretânicas (-NH-CO-). A cadeia do PU pode variar em termos de flexibilidade, rigidez e outras propriedades, dependendo dos tipos de polióis e isocianatos usados (MEIER-WESTHUES & MECKING, 2007).

A reação básica de formação do PU pode ser representada pela Equação 1.



Nesta estrutura, "R" e "R'" representam grupos orgânicos que podem variar. A reação pode ser feita de forma que diferentes cadeias poliméricas se formem, com variações na rigidez, peso molecular e outras propriedades.

Além disso, o PU pode ser modificado com outros grupos funcionais, como ésteres, éteres e grupos aromáticos, o que resulta em diferentes tipos de poliuretanos com características específicas (MEIER-WESTHUES & MECKING, 2007).

2.3 Testes de validação do conceito

2.3.1 Abrasão

Os testes de abrasão representam uma área crucial na avaliação do desgaste de materiais, desempenhando um papel fundamental em diversas indústrias. São procedimentos padrões, utilizados na indústria para estudar a resistência de um produto a danos e desgastes causados geralmente pelo atrito entre materiais.

Smith (2005) discute a importância de compreender os mecanismos de abrasão, destacando a distinção entre abrasão adesiva e abrasão abrasiva. Há a necessidade de métodos de teste precisos para avaliar materiais em condições realistas de desgaste.

Jones et al. (2010), aborda a variedade de testes de abrasão disponíveis, desde o ensaio de roda de borracha até o ensaio de pino sobre disco. Eles enfatizam a importância de selecionar o método de teste mais apropriado com base nas características específicas do material em estudo.

Para realização de testes de abrasão, utiliza-se um equipamento conhecido como Abrasímetro. Esse equipamento consiste em um rolo revestido por uma lixa, que através de um motor, rotaciona. Na parte superior do equipamento há uma pinça para fixar o corpo de prova. Cada corpo de prova é fabricado com um tipo de polímero diferente. Um por vez é fixado na pinça e pressionado contra o tambor em

movimento. Esse processo é replicado até todos os corpos serem testados. Como todos os polímeros são testados sobre as mesmas condições, mesmo equipamento, lixa, velocidade de rotação e tempo do teste, é possível aferir o corpo o corpo de prova desgastou, o quanto perdeu de massa.



Figura 8 – Abrasímetro
Fonte: Autoria própria

Várias técnicas são usadas para testes em laboratórios, existem alguns que são realizados com base em normas internacionais. O método mais utilizado é desenvolvido pela ASTM International (American Society for Testing and Materials), cuja norma é a ASTM D4060, que se intitula “Standard Test Method for Abrasion Resistance of Organic Coatings by the Taber Abraser”.

Uma das normas internacionais mais amplamente reconhecidas para testes de abrasão em polímeros, e apesar de ser especificamente voltada para revestimentos orgânicos, essa norma é frequentemente utilizada para avaliar a resistência à abrasão de uma variedade de materiais poliméricos.

2.3.2 Tração

Os ensaios de tração são procedimentos utilizados para avaliar as propriedades mecânicas de um material quando submetido a uma força de tração. Esse tipo de ensaio é amplamente empregado em diversos campos da engenharia e ciência dos materiais, permitindo compreender o comportamento do material diante da aplicação de uma carga uniaxial (CALLISTER, 2014).

De acordo com Callister (2014), durante o ensaio de tração, uma amostra do material, conhecida como corpo de prova, é submetida a uma força axial progressivamente crescente. A força é aplicada de forma contínua e gradual até que a amostra se rompa ou atinja um limite de deformação pré-estabelecido.

Enquanto a força é aplicada, são registrados os valores de carga e a correspondente deformação sofrida pela amostra. Esses dados são utilizados para traçar um gráfico de tensão versus deformação, que representa o comportamento do material durante o ensaio.

Através dos ensaios de tração, é possível obter diversas informações importantes sobre o material testado. Alguns parâmetros comumente determinados são:

- Limite de resistência à tração: É a maior tensão que o material suporta antes de se romper. Representa a capacidade do material de resistir a uma força de tração;
- Limite de escoamento: É a tensão máxima que o material suporta antes de começar a apresentar deformação permanente. Indica a resistência do material à deformação plástica;
- Ductilidade: Refere-se à capacidade do material de se deformar plasticamente antes de se romper. Pode ser expressa em termos de alongamento ou redução de área;
- Módulo de elasticidade: É uma medida da rigidez do material e sua capacidade de retornar à forma original após a remoção da carga.



Figura 9 – Máquina Universal de Ensaio
Fonte: Autoria própria

Para realizar os estudos de tração, utiliza-se a Máquina Universal de Ensaio. Através dele é possível ensaiar corpos de prova dos diversos polímeros e aferir o comportamento resultante.

A Figura 9 ilustra do equipamento utilizado. Um corpo de prova é fixado nas garras da máquina e uma força externa é aplicada. Essa força causa uma tensão no corpo de prova e um computador ligado a máquina coleta os dados.

2.3.3 Deformação plástica e elástica

A deformação plástica e elástica são dois conceitos fundamentais na área da mecânica dos materiais, que descrevem o comportamento de um material quando submetido a uma carga.

Para Callister (2014), a deformação elástica ocorre quando um material é submetido a uma carga e sofre uma deformação temporária. Nesse caso, o material

é capaz de retornar à sua forma original assim que a carga é removida. A deformação elástica é reversível, ou seja, o material não sofre alterações permanentes em sua estrutura molecular durante esse processo. O comportamento elástico é descrito pela chamada Lei de Hooke, que estabelece uma relação linear entre o esforço aplicado (força ou tensão) e a deformação resultante (alongamento ou compressão) dentro da faixa elástica do material.

Por outro lado, a deformação plástica, de acordo com o autor, ocorre quando um material é submetido a uma carga além de sua faixa elástica. Nesse caso, o material sofre uma deformação permanente ou irreversível, mesmo após a remoção da carga. A deformação plástica é acompanhada de rearranjos e deslizamentos dos átomos ou moléculas do material, resultando em alterações permanentes em sua estrutura. Essa deformação está associada à capacidade do material de fluir ou se deformar plasticamente sem se romper.

De acordo com Callister (2014), a transição entre a deformação elástica e plástica dos polímeros é representada pelo limite de escoamento, que é o ponto em que a deformação plástica começa a ocorrer de forma significativa. Acima do limite de escoamento, o material exibe um comportamento plástico, com maior deformação permanente e uma resposta não linear ao aumento da carga.

O conhecimento da deformação plástica e elástica é fundamental para o projeto e a análise de estruturas e componentes. Compreender como os materiais se comportam sob diferentes cargas permite selecionar materiais adequados para aplicações específicas, evitar falhas estruturais e determinar os limites de segurança dos projetos (CALLISTER, 2014).

Os testes de deformação plástica e elástica são realizados juntamente com os testes de tensão, logo, utiliza-se a mesma Máquina Universal de Ensaio da Figura 9, mas os dados coletados pelo computador não são a tensão máxima suportada pelo corpo de prova e sim o deslocamento provocado pela força externa aplicada.

2.3.4 Elementos finitos

A análise de elementos finitos (FEA – Finite Element Analysis) é uma técnica numérica amplamente utilizada para analisar e resolver problemas complexos de engenharia e ciência dos materiais. Ela é uma abordagem computacional que

permite modelar e simular o comportamento de estruturas e componentes sujeitos a diferentes tipos de carregamentos.

A análise FEA divide um domínio complexo em partes menores e mais simples, chamadas de elementos finitos. Esses elementos são conectados uns aos outros por nós, formando uma malha ou discretização do domínio de interesse. Cada elemento é caracterizado por propriedades mecânicas específicas e é definido por equações matemáticas que descrevem o comportamento do material (REDDY, 2017).

A análise FEA é baseada no princípio da discretização, onde o domínio contínuo é dividido em elementos finitos discretos. A partir dessa representação discreta, são aplicadas as leis da física, como as equações de equilíbrio e as leis constitutivas do material, para calcular as respostas estruturais, como tensões, deformações, deslocamentos e outros parâmetros relevantes.

O processo de análise FEA envolve as seguintes etapas principais:

- Modelagem: Consiste em criar um modelo geométrico do componente ou estrutura a ser analisado. Isso inclui definir as dimensões, formas, conectividade dos elementos, condições de contorno e propriedades mecânicas;
- Geração de malha: O domínio é dividido em elementos finitos através da geração de uma malha adequada. Essa malha define como os elementos se conectam entre si e como os nós estão distribuídos ao longo da estrutura;
- Aplicação das condições de contorno: São definidas as condições de contorno para simular as restrições ou os carregamentos aplicados ao modelo. Isso inclui fixações, forças, pressões, temperaturas, entre outros;
- Solução: As equações matemáticas que descrevem o comportamento estrutural são resolvidas numericamente para obter as respostas desejadas. Isso é realizado por meio de algoritmos computacionais que calculam as soluções aproximadas para cada elemento;
- Análise e interpretação dos resultados: Após a solução, os resultados são analisados e interpretados para entender o comportamento do

componente ou estrutura sob diferentes condições de carregamento. Isso permite avaliar a segurança, a eficiência e a confiabilidade do projeto.

A análise FEA oferece uma poderosa ferramenta para a engenharia, permitindo a otimização do *design*, a redução de custos, a previsão de falhas estruturais, a simulação de diferentes cenários e a tomada de decisões informadas.

São diversos *softwares* que realizam a análise FEA computacionalmente, todavia, os dois mais utilizados são o *Solidworks* e o *Ansys Static*.

Por meio desses *softwares* é possível replicar o mesmo equipamento, componente e estrutura em campo, no software. Aplicar movimentos e restrições, aplicar parâmetros de simulação e características de materiais específicos. Em seguida é possível simular o projeto e analisar os resultados obtidos, sem a necessidade de ensaios práticos e confecções de protótipos.

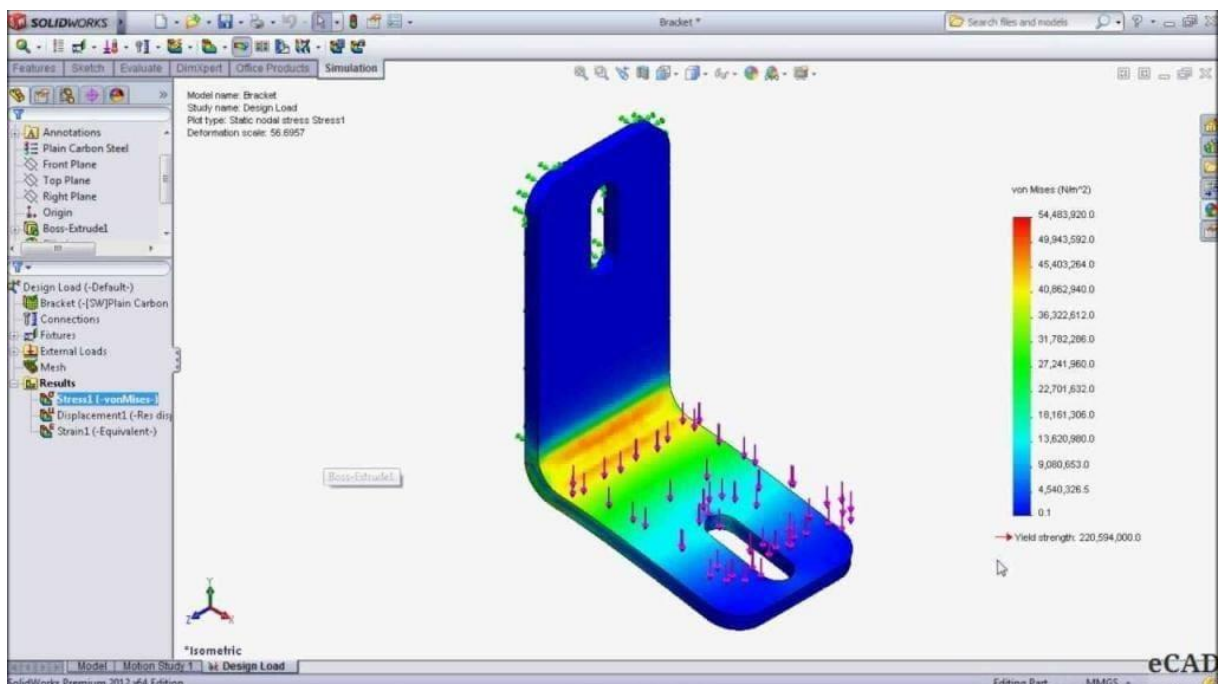


Figura 10 – Ensaio FEA no Solidworks de uma cantoneira
Fonte: <https://www.lwtsistemas.com.br/solidworks-simulation-simulacao/>

A Figura 10 ilustra um exemplo de simulação FEA realizada no software *Solidworks*. Trata-se de uma cantoneira comum de marcenaria, onde uma das suas extremidades esta fixada, simulando a fixação por meio de um parafuso, enquanto sua outra extremidade sofre uma força externa, simulando uma carga estacionário

suspensa na cantoneira. É possível observar, através do gráfico de cores, o local de maior concentração de tensão, representado pelas cores vivas, e regiões de baixa tensão interna, cores frias. Além da região, o software retorna o gradiente da tensão naquela região em especial.

2.4 Método DEM

O método do elemento discreto é um modelo numérico que descreve o comportamento mecânico de materiais particulados, baseado no uso de um modelo numérico específico no qual a interação das partículas é monitorada por contato e pelo movimento das partículas modeladas partícula por partícula (CUNDALL, P; STRACK, O.D.L,1979) e (NEVES, 2009). Em outras palavras, esse método computacional, através de uma pré-calibração do produto a ser simulado e dos materiais os quais o produto entra em contato, replica o comportamento exato das partículas, a trajetória das partículas, força de impacto, tempo de residência e velocidade.

Nos primeiros anos de desenvolvimento e criação do DEM a modelagem ficou restrita apenas a problemas geométricos em escala reduzida (100 a 1000) partículas em duas dimensões. O método tem sido aplicado em escala industrial ao longo dos anos, em três dimensões e em sistemas com geometrias complexas possibilitando avaliar interações entre partículas na casa de 1.000.000 de partículas (CLEARY, 2010).

A evolução no método e na tecnologia para estudo tem produzido diversos trabalhos relacionados à movimentação de fluxo de material granular (massa), como Langston et al. (1995) que utilizou um modelo computacional para simular o fluxo de material granular armazenado em um silo, ou Montellano et al. (2011) que desenvolveu um modelo de três dimensões, capaz de simular o fluxo de grãos de milho durante a descarga de um pequeno silo, utilizando três variáveis: a densidade média no final da fase de enchimento, a taxa de descarga e o padrão de escoamento.

Para Coetzze (2009) o processo de calibração do método, outros parâmetros devem ser avaliados para aumentar o grau de precisão da análise, para isto o

pesquisador realizou teste de compressão e cisalhamento que determinou o ângulo de atrito interno do material e rigidez.

A fim de comparar os dados, os autores transformaram as coordenadas para variáveis adimensionais (números reais sem indicativo de dimensão), permitindo a compreensão de características importantes do fluxo, com resultados semelhantes entre as simulações e os experimentos, sendo muito importante para validar o método DEM.

A calibração dos parâmetros envolve a característica da partícula, no caso de simulações de transporte de soja as características dos grãos podem ser classificadas como físicas, mecânicas, térmicas, elétricas e ópticas.

A porosidade é definida pela relação entre volume de ar nos espaços vazios onde não se encontram grão e o volume total ocupado pela massa de grãos. Podendo variar dependendo de alguns fatores como teor de umidade, geometria de grãos, impurezas entre outros (PARK, 2007).

O grão é um meio higroscópico, ou seja, tem a capacidade de liberar e receber umidade, sendo composto por 3 tipo de umidade: superficial, localizada na área externa do grão, intersticial, localizada no interior do grão e de constituição, presente nas células do grão ligadas quimicamente a vitaminas proteínas gorduras entre outros (BERTOLAINA,2011).

A calibração é feita no *software* a partir de uma amostra de soja padrão exportação, seguindo a IN-11/2007.



Imagem da amostra a ser usada para estudo, apresentando um range de 6 a 8mm de diâmetro entre os grãos avaliados.

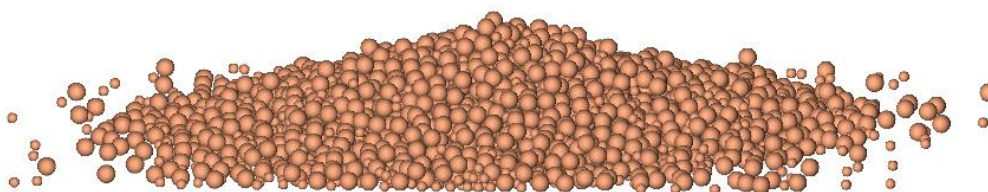


Imagem retirada de software DEM após calibração da soja avaliada, onde o comportamento das partículas computacionais replica o real, trabalhamos com uma pequena tolerância nos ângulos de acomodação.

2.5 Prototipagem rápida

A prototipagem rápida é uma abordagem tecnológica inovadora que permite a criação rápida e eficiente de modelos físicos tridimensionais de peças ou produtos. Também conhecida como fabricação aditiva, impressão 3D ou manufatura aditiva, a prototipagem rápida revolucionou os processos de desenvolvimento de produtos em diversos setores, como engenharia, design industrial, medicina e muitos outros.

Gibson (2014), afirma que diferentemente dos métodos tradicionais de fabricação, que envolvem a remoção de material de um bloco bruto para criar uma peça, a prototipagem rápida baseia-se na adição de camadas sucessivas de material para construir um objeto tridimensional. Essas camadas são criadas a partir de um modelo digital prévio, que é fatiado em seções transversais e interpretado por um software especializado.

Existem várias técnicas de prototipagem rápida disponíveis, como a estereolitografia (SLA), a sinterização seletiva a laser (SLS), a fusão por deposição de material (FDM), a impressão por jato de tinta (PolyJet), entre outras. Cada técnica utiliza diferentes materiais e processos para criar os modelos, variando desde plásticos e resinas até metais e cerâmicas.

A prototipagem rápida apresenta uma série de benefícios significativos. Primeiro, permite a produção de protótipos funcionais com rapidez, reduzindo consideravelmente o tempo necessário para testar e validar um projeto. Além disso, oferece flexibilidade de design, possibilitando a criação de geometrias complexas e customizadas que seriam difíceis de serem alcançadas com métodos tradicionais. A prototipagem rápida também facilita a iteração e a melhoria contínua do design, permitindo que os projetistas e engenheiros realizem ajustes e modificações de forma ágil e econômica.

Essa tecnologia tem aplicações diversas, desde a criação de protótipos para testes de design e funcionalidade até a produção de pequenas séries de peças personalizadas.

Para Gibson (2014), a prototipagem rápida tem desempenhado um papel fundamental na aceleração do processo de inovação e no desenvolvimento de produtos mais eficientes e adaptados às necessidades do mercado. Com o avanço

contínuo dessa tecnologia, espera-se que ela continue a revolucionar a indústria e a abrir novas possibilidades de design e fabricação.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Análise do produto

A caneca substituta de polímero deve apresentar resistência, performance e capacidade igual ou superior à caneca metálica, caso contrário sua fabricação não tem sentido.

Portanto, o primeiro passo foi analisar essas três características da caneca metálica antes de projetar a substituta.

Análise de resistência engloba resistência a tensão, desgaste por abrasão e deformação. As canecas, em geral, são submetidas a todo tipo de esforço continuamente e, como são fundamentais para a operação da linha de movimentação de granéis, não podem sofrer fraturas ou se desgastar facilmente.

Os ensaios de resistências foram realizados, inicialmente, de maneira computacional com auxílio do software Solidworks por meio de uma análise de elementos finitos FEA.

Além de resistir, elas precisam desempenhar uma boa performance de carregamento e descarregamento dos produtos transportados, logo a sua geometria e perfil são fundamentais. A partir da análise de performance das canecas metálicas é possível projetar a melhor substituta.

As canecas em polímero devem transportar a mesma quantidade de produto, ou superior. Mas as dimensões externas são limitadas, não podem extrapolar a largura e projeção das canecas, caso contrário não caberão nos elevadores.

Finalizado o levantamento das características da caneca metálica, suas dimensões, capacidades, performances e, principalmente, os limites de cada um dos estudos de resistências, é possível projetar uma nova caneca para substituí-la.

3.2 Projeto das canecas de polímero

A primeira etapa é projetar o perfil da nova caneca, obedecendo as dimensões coletadas da caneca metálica no procedimento anterior. Para saber se o perfil da caneca apresenta boa performance de desempenho, utiliza-se o software DEM. Realiza-se uma simulação com o projeto da caneca operando dentro de um elevador. Os parâmetros do elevador, como velocidade de rotação, diâmetro do tambor de giro e capacidade de fluxo, são alterados e analisa-se o comportamento da caneca.

Quando a caneca atende aos requisitos de desempenho estabelecidos, inicia a próxima fase do projeto: a seleção do material e do modelo de caneca. Nessa etapa, é crucial determinar a geometria apropriada para reforçar a resistência da caneca, considerando também as áreas de alívio de massa. Essa fase desempenha um papel fundamental, assegurando que a nova caneca atinja ou ultrapasse a resistência da versão feita de metal.

Como as informações do limite de cada uma das diversas resistências já foram coletadas, os mesmos estudos computacionais são realizados na nova caneca.

3.3 Prototipação das canecas de polímero

Com o projeto finalizado, a última etapa é a prototipação da caneca projetada.

O primeiro protótipo foi o de aparência. Imprimiu-se a caneca com auxílio de uma impressora 3D de filamento de PP (polipropileno). Sua função foi apenas visual. Ela também foi apresentada aos gerentes e CEO da Empresa A, juntamente com o relatório da análise de produto e projeto.

Sendo aprovado, o segundo protótipo foi confeccionado, conhecido como protótipo funcional ou alfa (α). Ele foi fabricado na mesma proporção da peça final, 1:1, e, também, no mesmo material, através de usinagem. Dessa forma é possível aplicar os mesmos testes de resistência, entretanto testes reais. Apesar dos testes computacionais serem muito precisos, para aprovação final do projeto são necessários a comprovação dos resultados por meio dos testes físicos.

O último protótipo é o beta (β). Além de ser fabricado na mesma proporção e com o mesmo material da peça final, usa o mesmo processo de fabricação, a injeção. Por ser a última etapa, nela analisa-se o molde e como será injetada a peça, se há bolhas no interior da peça, se a refrigeração está contemplando toda a caneca e se há contração ou empenamento.

4 RESULTADOS

A primeira etapa do desenvolvimento de uma nova caneca partiu da necessidade de um cliente, neste caso, uma necessidade da empresa B. O cliente possui uma caneca específica confeccionada em metal, com as dimensões ideais para operar dentro do seu elevador além de entregar uma capacidade que supri a capacidade da linha.

Na Figura 11, ilustram as canecas metálicas que sofreram uma tensão acima do limite de escoamento. Por terem deformado plasticamente, perdem performance.



Figura 11 – Canecas do tipo CF-SF com deformação plástica

Fonte: Autoria própria

A nova caneca precisa atender essas mesmas dimensões caso contrário não caberá no interior do elevador. Além disso precisa possuir uma capacidade igual ou superior.

As canecas atuais do cliente, apesar de serem metálicas não apresentam o perfil das canecas modelo C, como de costume. Elas são reproduções do modelo CF-SF. Independente desse fato, como hoje a empresa B opera em regime industrial, sabe-se, de acordo com a literatura desse trabalho, que se deve utilizar canecas do tipo AP, Alta Performance. Portanto, o perfil da nova caneca utiliza como base o perfil das canecas AP e também sua parede deve ter 11 mm de espessura.

Para desenhar a caneca utilizou-se o software de desenho CAD, Solidworks. Figura 12 ilustra o croqui da caneca.

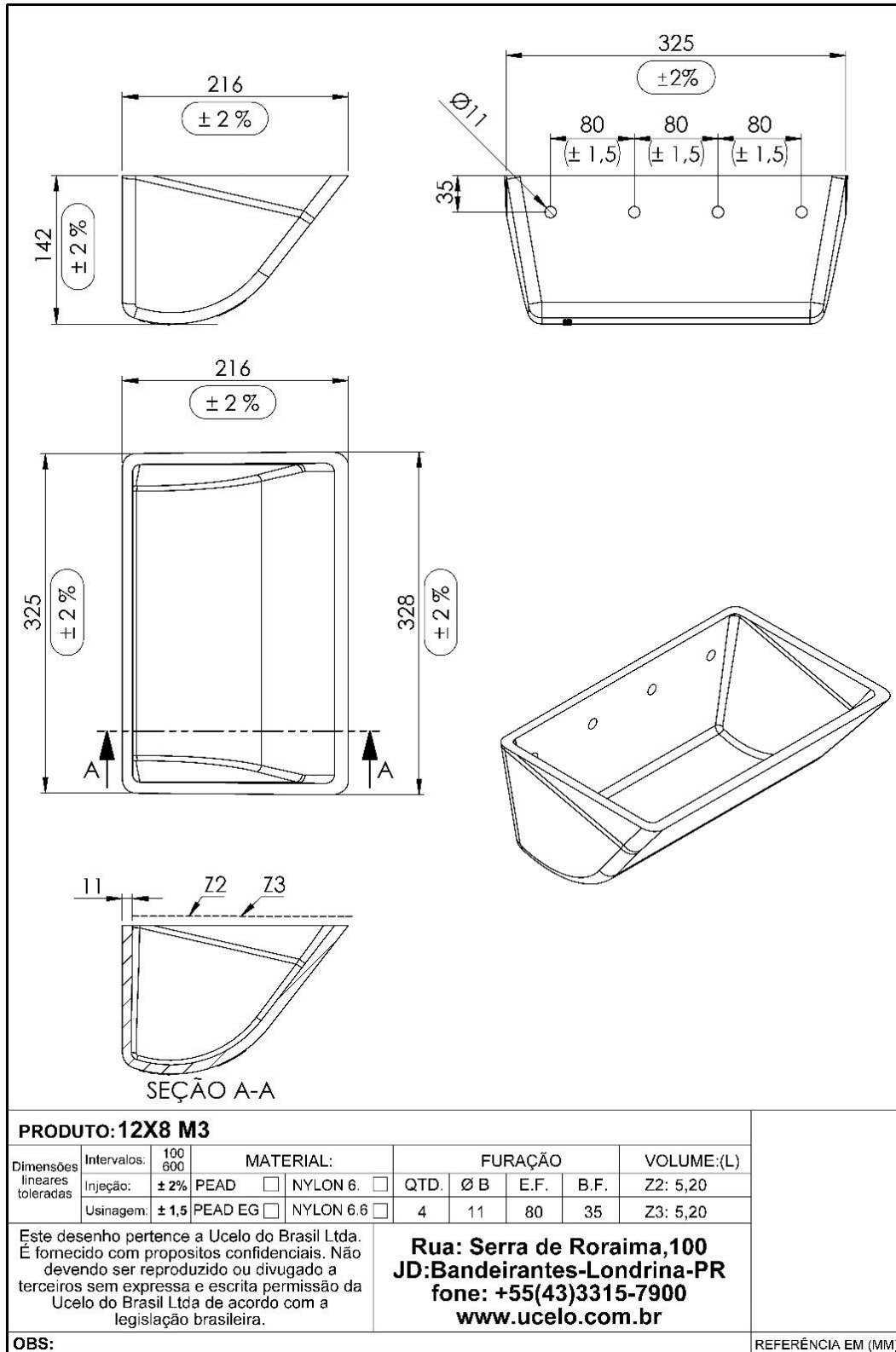


Figura 12 – Croqui da caneca 12X8 M3
 Fonte: Autoria própria

A caneca recebeu a denominação 12X8 M3. O número 12 equivale ao comprimento interno de 12”, o número 8 equivale a projeção interna da caneca de 8” e M3 equivale ao corte realizado na caneca após ela ser extraída da injetora.

Ao final do processo conferiu se as dimensões e volume foram satisfeitas, caso contrário replica-se esse procedimento até que o resultado seja satisfatório.

Após a confecção do modelo 3D no CAD, é necessário verificar se a caneca entrega a mesma resistência mecânica que a similar metálica.

Através da utilização de um software realizou-se a análise estática da caneca projetada, aplicou-se uma força na face na qual ocorre o maior contato com os grãos, a borda frontal da caneca e definiu-se os pontos de fixação. O software retorna com a tensão máxima recebida e o deslocamento sofrido pela peça.

Com análise estrutural da peça, foi possível observar possíveis pontos de cisalhamento da caneca, na região das perfurações para passagem dos fixadores, sendo que os mais afetados são os das extremidades.

Primeiramente, realizou-se os testes de tensão e deformação na caneca metálica, a fim de se obter padrões a serem, posteriormente, superados pela caneca desenvolvida.

4.1 Ensaios mecânicos das canecas metálicas

A Figura 13 ilustra os detalhes dos pontos de fixação e da carga aplicadas no *software*.

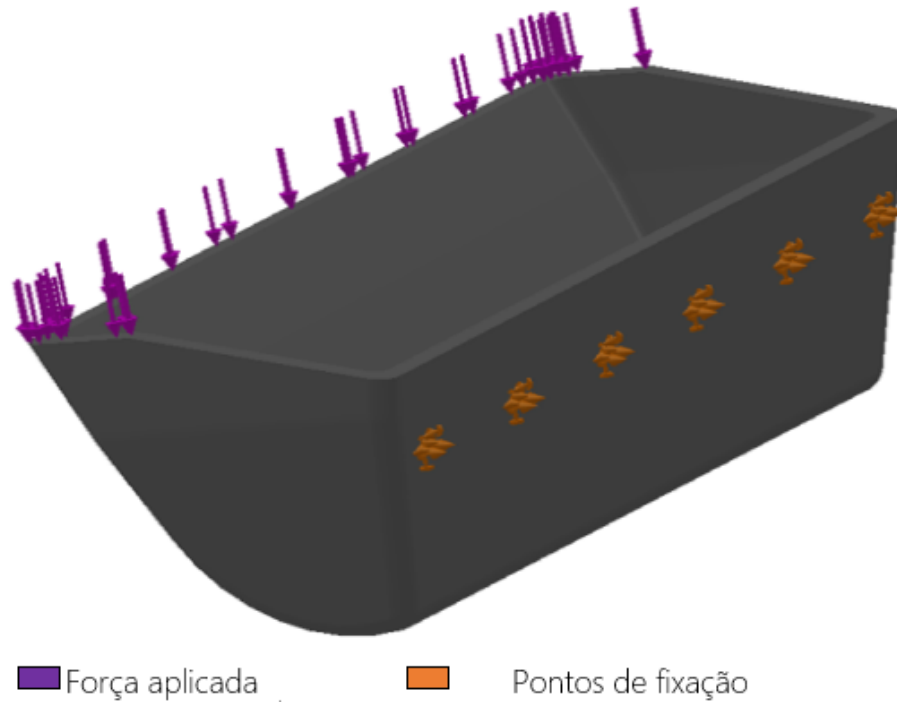


Figura 13 – Elementos de fixação
 Fonte: Autoria própria

Na Figura 14, há exemplos de resultados de análises FEA realizadas em canecas de polímero, sendo respectivamente, uma análise de tensão e uma análise de deformação.

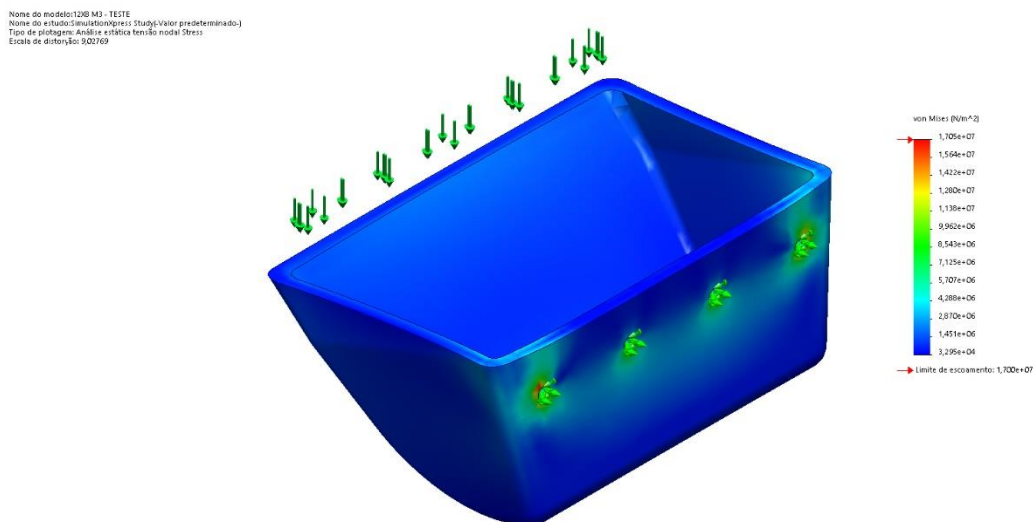


Figura 14 – Análise do ensaio de tensão
 Fonte: Autoria própria

Nome do modelo: 1208 M3 - TESTE
 Nome do e Runo: Simulação (pre) 1 Study (valor predeterminado)
 Tipo de plotagem: Deslocamento estático Displacement
 Escala de distorção: 902769

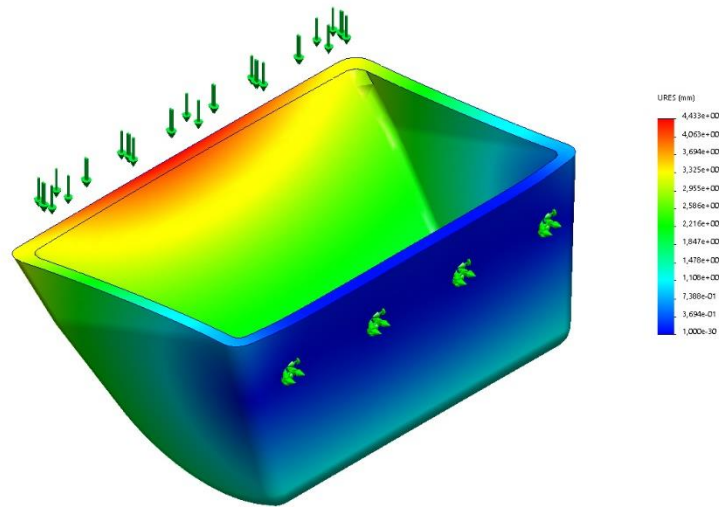


Figura 15 – Análise do ensaio de deformação
 Fonte: Autoria própria

4.1.1 Caneca sem fundo

Realiza-se análise FEA na caneca metálica, sem fundo, através de *software*.

Caneca Metálica – Sem Fundo	Propriedades
	Massa: 1,09046 kg
	Volume: 0,000138033 m ³
	Densidade: 7900 kg/m ³
	Nome: AISI 1020
	Tipo de modelo: Isotrópico linear elástico
	Critério de falha predeterminado: Tensão de von Mises máxima
Limite de escoamento: 3,51571e+08 N/m ²	
Resistência à tração: 4,20507e+08 N/m ²	

Figura 16 – Propriedades volumétricas e mecânicas da caneca metálica sem fundo
 Fonte: Autoria própria

Nome	Tipo	Mín.	Máx.
Stress	VON: tensão de von Mises	2,081e+05 N/m ² Nó: 13028	3,641e+08 N/m ² Nó: 56

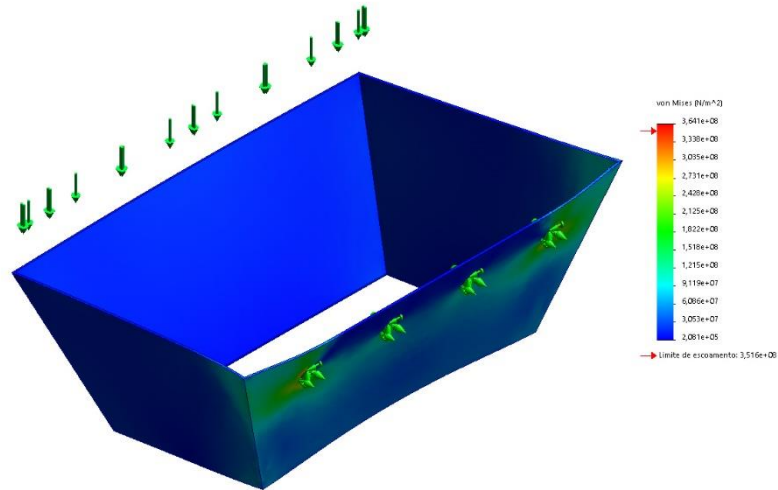


Figura 17 – Ensaio de tensão da caneca metálica sem fundo
Fonte: Autoria própria

Nome	Tipo	Mín.	Máx.
Displacement	URES: Deslocamento resultante	0,000e+00 mm Nó: 1	7,110e+00 mm Nó: 665

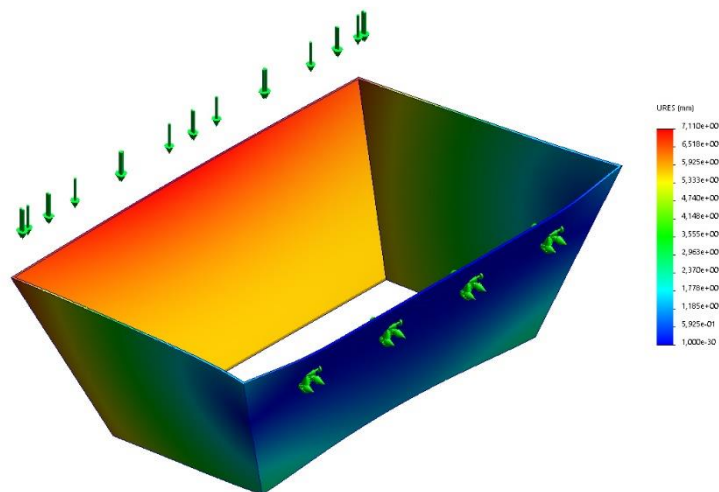


Figura 18 – Ensaio de deformação da caneca metálica sem fundo
Fonte: Autoria própria

O ensaio através do software indicou que sofrendo um esforço de 105 N, equivalente a um peso de 18,6 kg, a caneca sofre um deslocamento máximo de aproximadamente 7,11 mm, e a tensão máxima gerada por esta força é de 36.410 kN/m² na região dos furos de fixação.

4.1.2 Caneca com fundo

Realiza-se análise FEA na caneca metálica, com fundo, através de *software*.

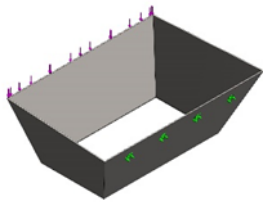
Caneca Metálica – Com Fundo	Propriedades
	Massa: 1,39461 kg
	Volume: 0,000176533 m ³
	Densidade: 7900 kg/m ³
	Nome: AISI 1020
	Tipo de modelo: Isotrópico linear elástico
	Critério de falha predeterminado: Tensão de von Mises máxima
Limite de escoamento: 3,51571e+08 N/m ²	
Resistência à tração: 4,20507e+08 N/m ²	

Figura 19 – Propriedades volumétricas e mecânicas da caneca metálica com fundo
Fonte: Autoria própria

Nome	Tipo	Mín.	Máx.
Stress	VON: tensão de von Mises	1,423e+05 N/m ² Nó: 10258	3,542e+08 N/m ² Nó: 48

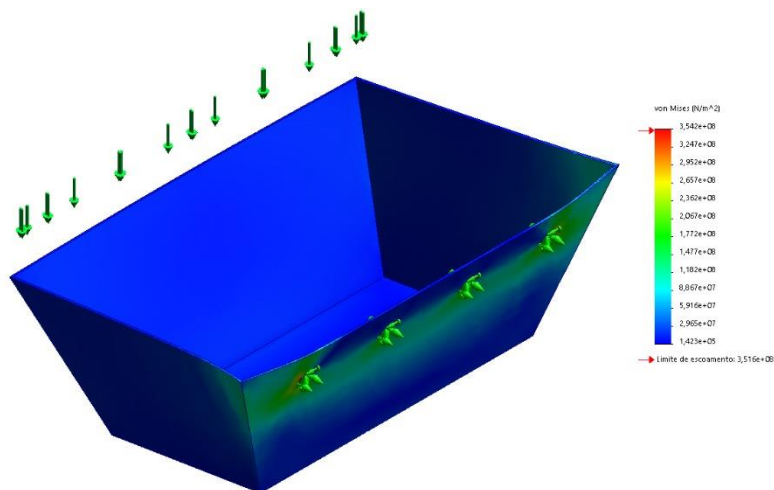


Figura 20 – Ensaio de tensão da caneca metálica com fundo
Fonte: Autoria própria

Nome	Tipo	Mín.	Máx.
Displacement	URES: Deslocamento resultante	0,000e+00 mm Nó: 1	6,441e+00 mm Nó: 11485

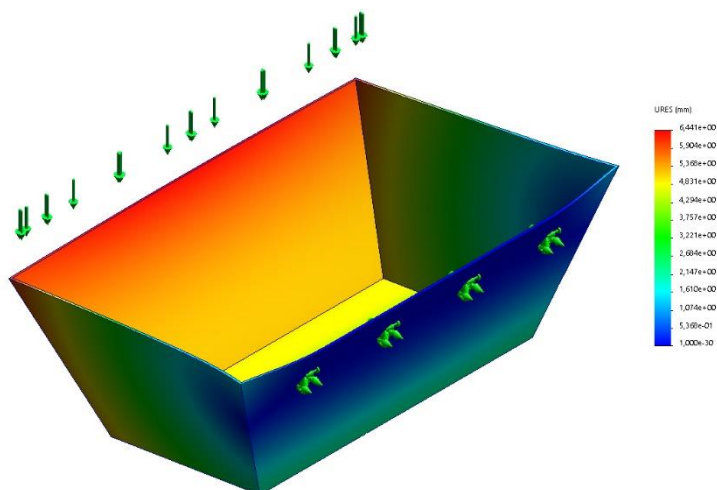


Figura 21 – Ensaio de deformação da caneca metálica com fundo
Fonte: Autoria própria

O ensaio através do software indicou que sofrendo um esforço de 117 N, equivalente a um peso de 18,6 kg, a caneca sofre um deslocamento máximo de aproximadamente 6,44 mm, e a tensão máxima gerada por esta força é de 35.420 kN/m² na região dos furos de fixação.

4.2 Ensaio mecânicos das canecas poliméricas

O presente trabalho apresenta 5 tipos de polímeros utilizados pela Empresa A na injeção de canecas, PEAD, PEAD Eagle (desenvolvimento Empresa A), Nylon 6, Nylon 6.6 e PU. Até o presente momento, esses são os melhores polímeros para fabricação de canecas, devido a relação custo-benefício, propriedades mecânicas e propriedades físicas como fluidez, fator muito importante e que sempre é levado em consideração no processo de injeção. Através do *benchmarking*, sabe-se que concorrentes da Empresa A também utilizam dos mesmos polímeros para injeção, com exceção do PEAD Eagle.

A seleção dos polímeros depende exclusivamente do produto transportado pelos elevadores. Dependendo do produto transportado, indica-se um material específico.

Cada material possui vantagens e desvantagens, sendo mais indicados do que os outros, dependendo da aplicação.

O PEAD é o polímero com menor custo de injeção, mas também é o polímero com menores resistências. Ele é indicado para o transporte de produtos de baixa densidade, como é o caso do caroço de algodão, cascas e resíduos.

O PEAD Eagle possui aditivos que encarece a injeção, sendo o segundo material com menor custo. Apresenta uma resistência superior tanto ao impacto quanto a abrasão, indicado para produtos de maiores densidades e graneis arredondados, simétricos radialmente, sem extremidades pontiagudas que causam abrasão na caneca. É o caso da soja e do café.

O próximo é o Nylon 6, produto intermediário. Tem uma resistência a abrasão alta, sendo muito indicado para produtos abrasivos como é o caso de graneis como o milho com uma das extremidades pontiagudas e o caso do trigo com duas extremidades pontiagudas.

Diferente do Nylon 6, o 6.6 apresenta alta resistência a impacto, sendo recomendado para elevadores que transportam produtos higroscópicos, ou seja, produtos que absorvem umidade do ar e enrijecem, formando blocos maciços. O açúcar é o principal produto higroscópicos, mas há também fertilizantes como ureia e fosfato e farelos como farelo de soja e milho.

Por fim o PU, é o material com altíssima resistência, tanto ao impacto quanto ao desgaste por abrasão, contemplando para si todas as qualidades positivas, o único defeito é o custo da matéria prima e a complexidade da injeção, que encarecia ainda mais as canecas de PU. Sua aplicação é específica de matérias com alta densidade e extremamente abrasivos como é o caso dos minérios de ferro, alumínio, cobre, pedras, carvão, dentre outros. Além dessa aplicação, canecas de PU são muito utilizadas em combinação com outras canecas, como uma espécie de canecas raspadoras ou canecas de sacrifício. Esse tipo de caneca, por ser de PU e apresentar altíssima resistência a abrasão são duradouras, mais que as demais, e por apresentar altíssima resistência a impacto, não quebram quando se chocam com corpos estranhos dentro do elevador. Logo, caso uma tampa fundida de comporta de navio, uma cantoneira de metal, uma chapa ou placa de revestimento que se desgrudou do elevador ou até mesmo uma tábua de madeira, adentre o elevador acidentalmente, se não houver uma caneca raspadora, todas as canecas do elevador vão se chocar com esse corpo e quebrar. Caso haja essa caneca, intercalada com as demais, as canecas antes dessa em especial arrebentarão em contato com o corpo, mas quando chegar a vez dessa caneca se chocar com o corpo, ela não arrebentará e abrirá um caminho seguro para as demais, preservando a integridade.

Nesse estudo em questão desenvolvido para a empresa B trabalha com dois tipos de graneis, soja e milho. Como o milho é mais crítico dentre os dois, é ele que é usado como referência para selecionar os materiais para injeção das canecas. Como informado anteriormente, no trabalho com milho utiliza-se sempre canecas em Nylon 6, por isso o estudo a partir desse ponto irá focar apenas em canecas com esse material.

Além disso, foi informado pelo cliente, que corpos estranhos adentram constantemente o elevador e muitas canecas metálicas apresentam deformação plástica. Para evitar quebra geral das canecas, recomendou-se para o presente

estudo, a aplicação de canecas em PU, raspadoras, na proporção 10%, ou seja, a cada 9 canecas em Nylon 6, instala-se uma caneca em PU.

4.2.1 Caneca 12X8 M3 em Nylon 6

Realiza-se análise FEA na caneca, 12X8 M3 em Nylon 6, através de *software*.

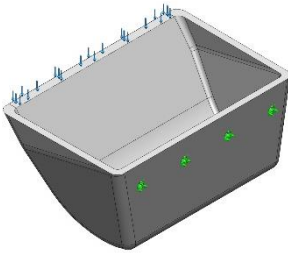
Caneca 12X8 M3 – Nylon 6	Propriedades
	Massa:1,69279 kg
	Volume:0,00147587 m ³
	Densidade: 1146,98 kg/m ³
	Nome: NYLON6
	Tipo de modelo: Isotrópico linear elástico
Critério de falha predeterminado: Tensão de von Mises máxima	
Limite de escoamento: 1,7e+07 N/m ²	
Resistência à tração: 7,5e+07 N/m ²	

Figura 22 – Propriedades volumétricas e mecânicas da caneca 12X8 M3 em Nylon 6
Fonte: Autoria própria

Nome	Tipo	Mín.	Máx.
Stress	VON: tensão de von Mises	3,295e+04 N/m ² Nó: 17208	1,705e+07 N/m ² Nó: 2248

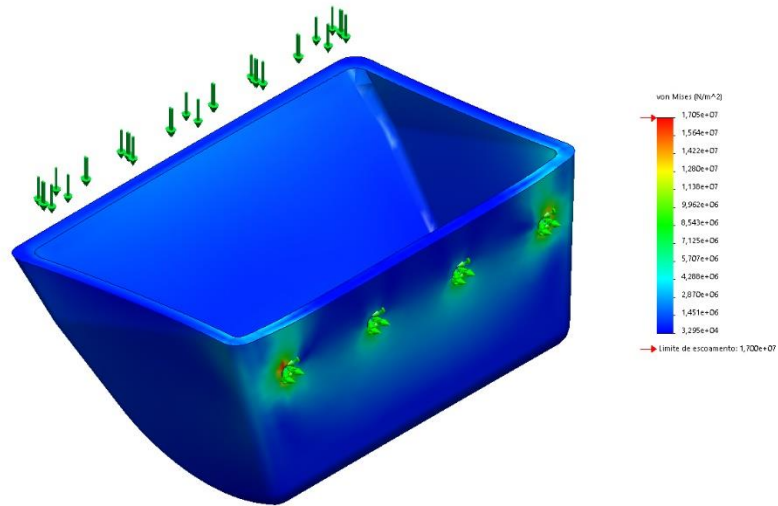


Figura 23 – Ensaio de tensão da caneca 12X8 M3 em Nylon 6
Fonte: Autoria própria

Nome	Tipo	Mín.	Máx.
Displacement	URES: Deslocamento resultante	0,000e+00 mm Nó: 1	3,589e+00 mm Nó: 601

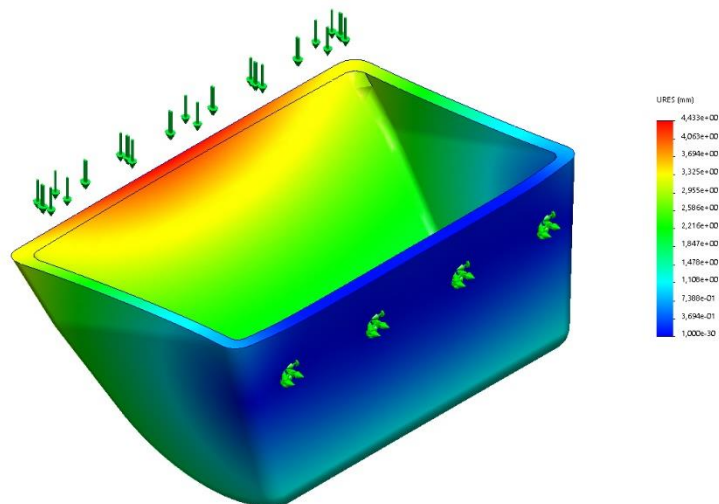


Figura 24 – Ensaio de deformação da caneca 12X8 M3 em Nylon 6
Fonte: Autoria própria

O ensaio através do software nos indica que sofrendo um esforço de 186 N, equivalente a um peso de 18,6 kg, a caneca sofre um deslocamento máximo de aproximadamente 4,43 mm, e a tensão máxima gerada por esta força é de 17.050 kN/m² na região dos furos de fixação.

4.2.2 Caneca 12X8 M3 em PU

Realiza-se análise FEA na caneca, 12X8 M3 em PU, através de *software*.

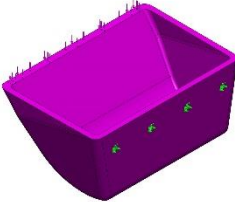
Caneca 12X8 M3 – PU	Propriedades
	Massa:1,76511 kg
	Volume:0,00147587 m ³
	Densidade: 1195,98 kg/m ³
	Nome: PU
	Tipo de modelo: Isotrópico linear elástico
	Critério de falha predeterminado: Tensão de von Mises máxima
Limite de escoamento: 6e+07 N/m ²	
Resistência à tração: 4,7e+07 N/m ²	

Figura 25 – Propriedades volumétricas e mecânicas da caneca 12X8 M3 em PU

Fonte: Autoria própria

Nome	Tipo	Mín.	Máx.
Stress	VON: tensão de von Mises	1,139e+05 N/m ² Nó: 17208	6,015e+07 N/m ² Nó: 2248

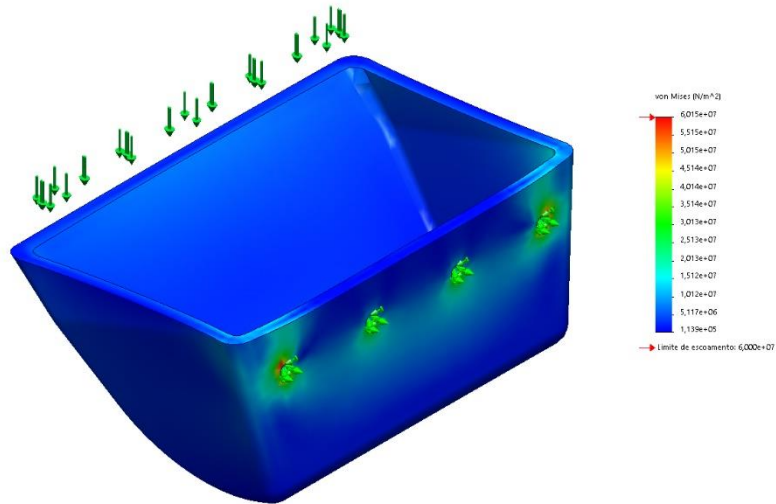


Figura 26 – Ensaio de tensão da caneca 12X8 M3 em PU
Fonte: Autoria própria

Nome	Tipo	Mín.	Máx.
Displacement	URES: Deslocamento resultante	0,000e+00 mm Nó: 1	5,596e+01 mm Nó: 605

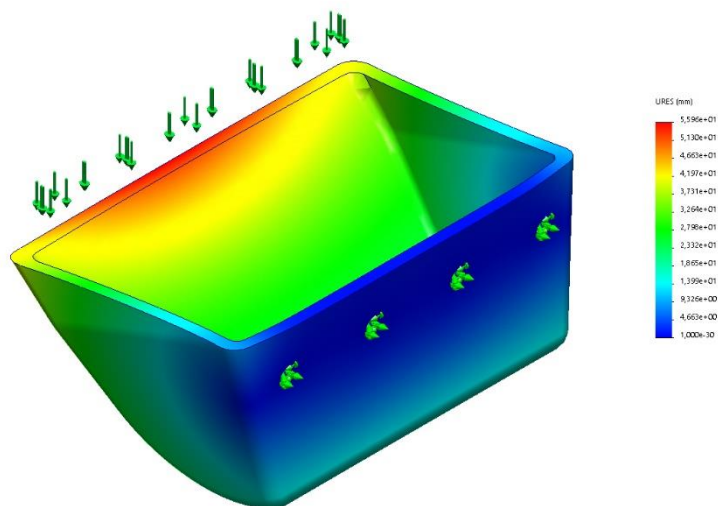


Figura 27 – Ensaio de deformação da caneca 12X8 M3 em PU
Fonte: Autoria própria

O ensaio através do software indica que sofrendo um esforço de 670 N, equivalente a um peso de 67 kg, a caneca sofre um deslocamento máximo de aproximadamente 55,96 mm, e a tensão máxima gerada por esta força é de 60.150 kN/m² na região dos furos de fixação.

Realizaram-se esses mesmos estudos FEA com os demais materiais, PEAD, PEAD Eagle e Nylon 6.6; entretanto, optou-se por combinar Nylon 6 e PU.

Dentre os materiais disponíveis para injeção, o PU é o que apresenta as melhores resistências tanto de tensão quanto de deformação, em contrapartida, é o que apresenta maior custo de venda. Logo, sua função no elevador será de “raspador” e sua proporção será 20% da quantidade total das canecas. Raspador são canecas com alta resistência inseridas no meio de canecas com resistência menor, dessa forma a caneca raspadora tende a absorver o maior dano mecânico caso um corpo estranho adentre ao elevador.

O Nylon 6 possui um ótimo custo-benefício (a análise financeira foi realizada pelo Departamento Financeiro em cooperação com o Departamento Comercial, não foram divulgados dados e valores), além de possuir a segunda melhor resistência a abrasão, atrás apenas do PU. Sua combinação é de 80% em relação ao total de canecas no interior do elevador.

PROPRIEDADES	CANECA METÁLICA SEM FUNDO	CANECA METÁLICA COM FUNDO	CANECA 12X8 M3 NYLON 6	CANECA 12X8 M3 PU
ESFORÇO APLICADO (N)	105	117	186	670
MÁXIMA TENSÃO GERADA (KN/m ²)	36410	35420	17050	60150
MÁXIMO DESLOCAMENTO (mm)	7,11	6,44	4,43	55,96

Figura 28 – Comparativo das análises das canecas
Fonte: Autoria própria

4.3 Avaliações DEM

A última etapa do desenvolvimento de canecas para elevadores verticais de graneis é a simulação DEM. Por meio dessa simulação é possível aferir como será o desempenho da caneca no interior do elevador, sem a necessidade de fabricação de uma amostra em tamanho real e realização de testes físicos.

Caso a caneca seja reprovada nessa etapa, devido a ineficiência no carregamento ou descarregamento, inicia-se todo o processo novamente, com um novo desenho no CAD 3D, estudos do FEA e DEM.

Para avaliação de movimentação das partículas, através do método DEM, implanta-se a geometria simplificada de projeto do equipamento do cliente, empresa B, incluindo informações de alimentação. Despreza-se os detalhes estruturais, salvo quando tal detalhe estiver na passagem do fluxo, com base nos arquivos fornecidos pelo cliente e pela coleta de dados realizado em visita na unidade.

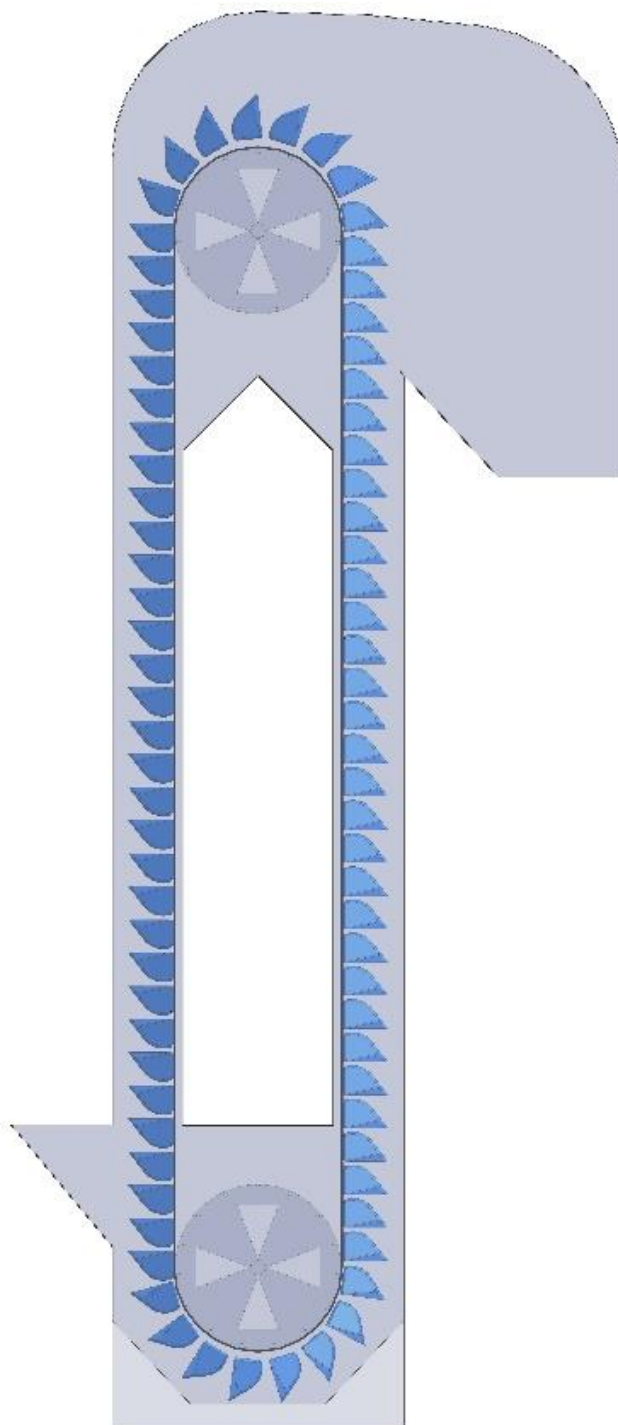


Figura 29 – Modelo de implantação CAD para acoplamento DEM sem detalhes estruturais
Fonte: Autoria própria

Visto que a caneca desenvolvida será utilizada em um elevador específico, simula-se o mesmo equipamento em campo, mas com a nova caneca desenvolvida, utilizando a calibração do mesmo produto que o cliente transporta. Uma amostra do produto é fornecida pelo cliente para então calibrar o software.

Com o projeto do elevador em formato CAD, as novas canecas desenvolvidas também em formato CAD e o simulador calibrado, iniciou-se a simulação.

A calibração não será abordada nesse estudo uma vez que é uma peculiaridade própria da Empresa A, não sendo possível expor essa calibração. Mas o intuito é replicar o mesmo comportamento do produto do cliente, nesse caso a soja, dentro do simulador, seja o coeficiente atrito dinâmico e estático, coeficiente de restituição, ângulo de escoamento, ângulo de acomodação, coeficiente de rolagem e densidade.

Os principais pontos de atenção da simulação são no instante do carregamento do produto pela caneca e do descarregamento. Logo, analisa-se principalmente esses pontos.

4.3.1 Simulação diagnóstica – canecas metálicas

Apresenta-se as imagens da análise DEM do equipamento considerando o layout atual e canecas metálicas no modelo CF-SF, sendo exibidos os principais pontos como pé, elevação baixa, elevação alta, cabeça, descarga, além de informações de tempo de residência e velocidade dos grãos.

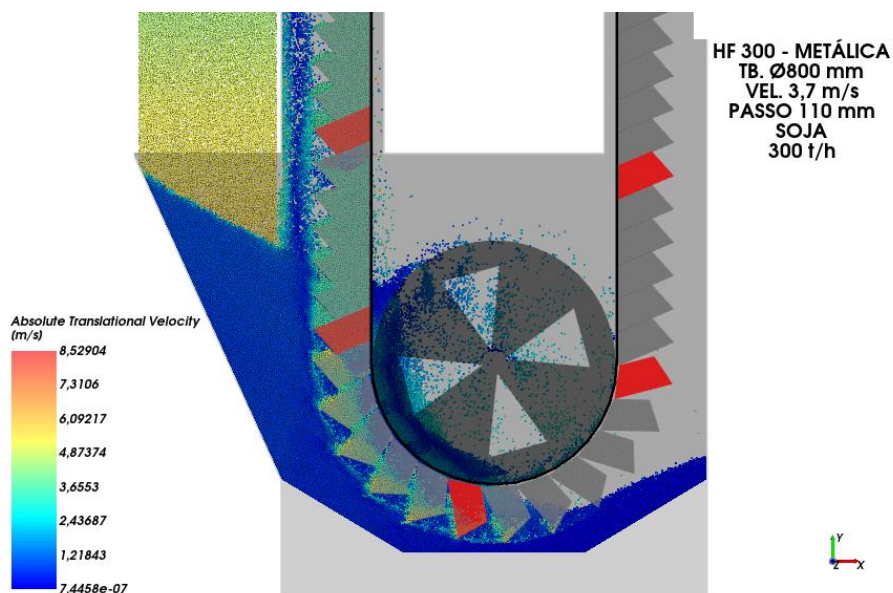


Figura 30 – Vista lateral do carregamento
Fonte: Autoria própria

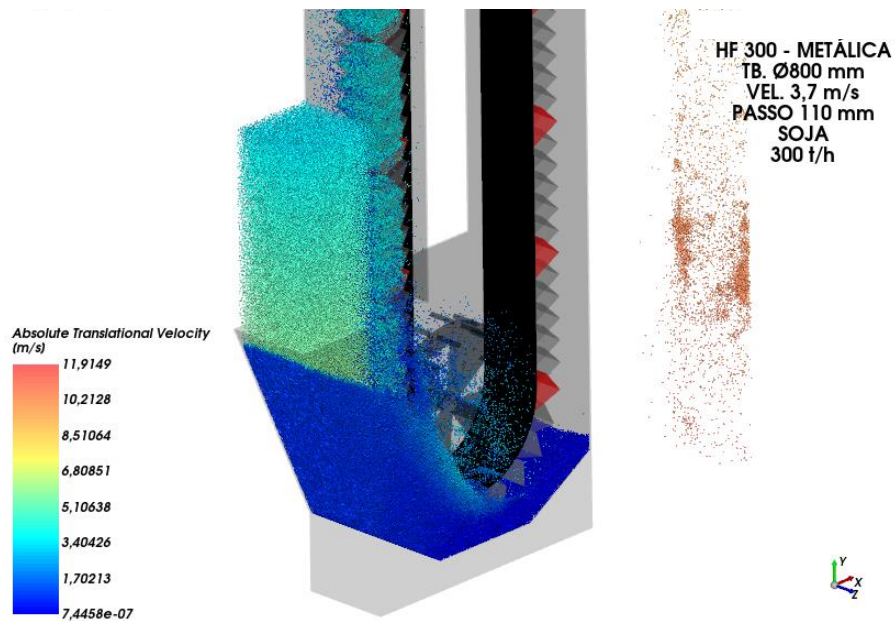


Figura 31 – Vista isométrica do carregamento
 Fonte: Autoria própria

As Figuras 30 e 31 foram retiradas no ponto alimentação, produto se acumulando no pé do elevador como podemos observar na imagem de *Residence time*. Ilustram o instante do carregamento do produto pelas canecas, que estão em movimento horário.

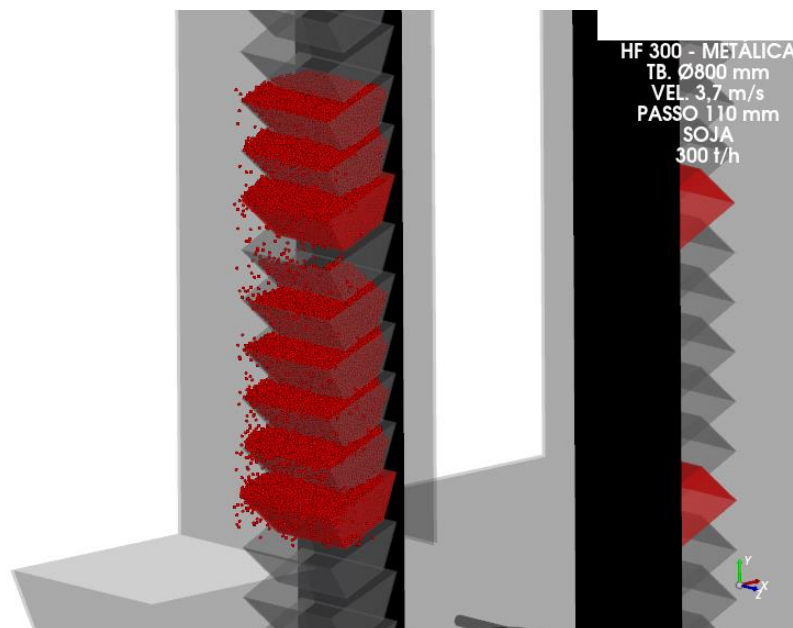


Figura 32 – Elevação baixa
 Fonte: Autoria própria

A Figura 32, extraída através de um sensor posicionado logo na ascensão das canecas, ou seja, logo após o carregamento do produto pelas canecas.

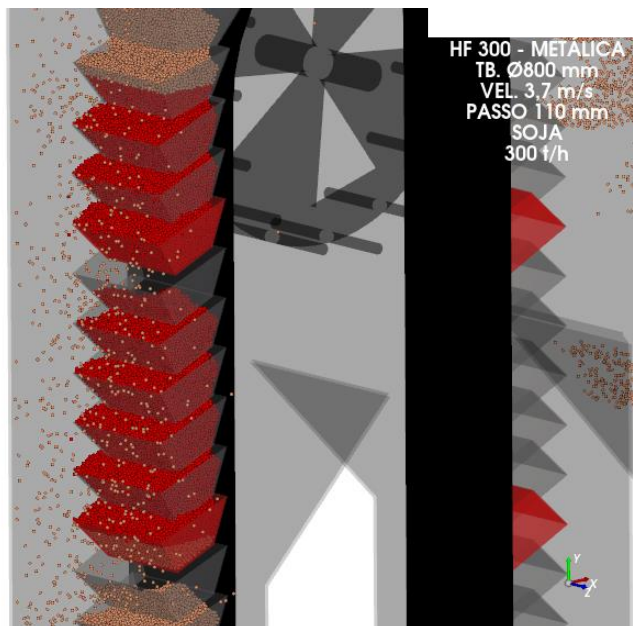


Figura 33 – Elevação alta
Fonte: Autoria própria

Figura 33, extraída através de um sensor posicionado logo abaixo do rolo superior, é possível visualizar o retorno de produto na ascendente.

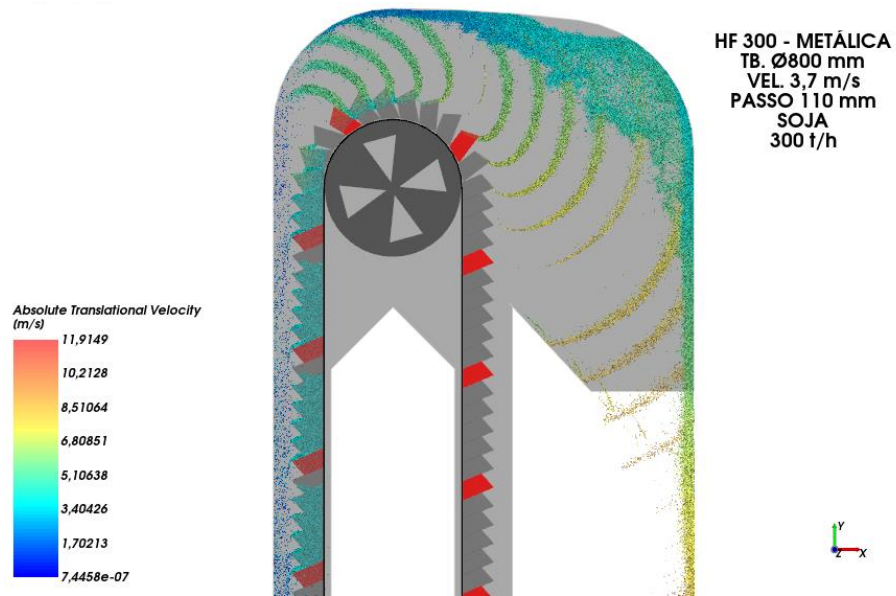


Figura 34 – Vista lateral do descarregamento
 Fonte: Autoria própria

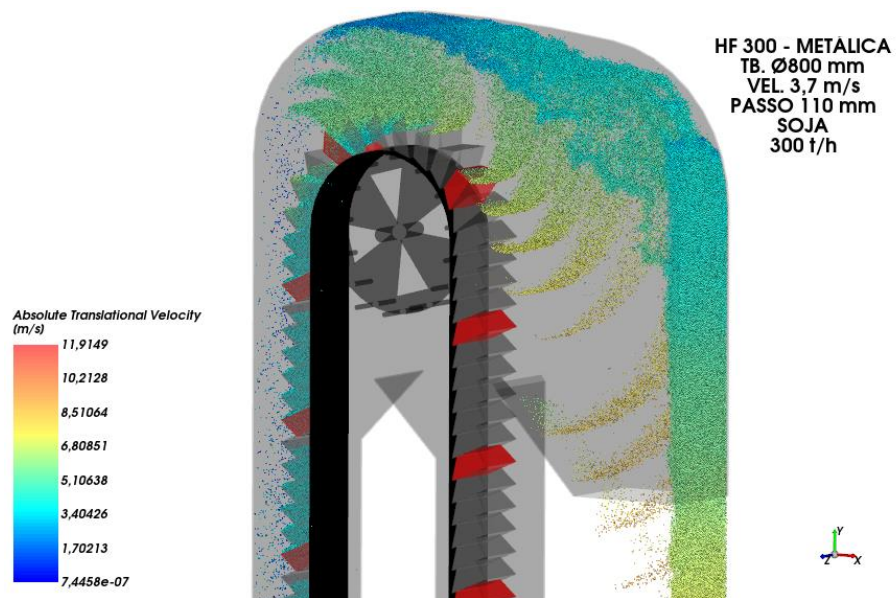


Figura 35 – Vista isométrica do descarregamento
 Fonte: Autoria própria

As imagens geradas permitem analisar o exato ponto de lançamento das partículas, tanto o início quanto o fim do arremesso, que devido a caneca estar em condições estruturais intactas apresentou um bom descarregamento.

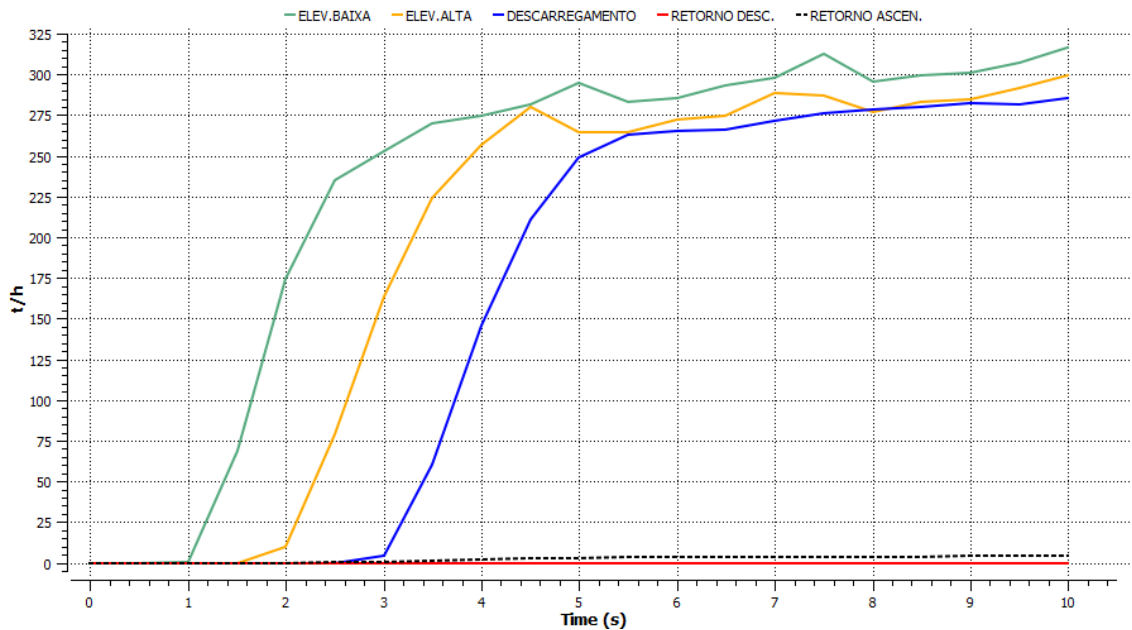


Figura 36 – Análise gráfica do sistema
 Fonte: Autoria própria

Pelo fato das canecas metálicas atuais instaladas no equipamento do cliente apresentarem retorno de produto na ascendente, de aproximadamente 4,5 t/h, as curvas do gráfico não convergem. A elevação baixa apesar de atingir 300 t/h, não é acompanhada da elevação alta e posteriormente também não é acompanhada pelo descarregamento.

Por se tratar de um sistema transiente, todo o fluxo que entra precisa sair, como está entrando 300 t/h, caso não saia essa mesma quantidade, significa que esse excedente está se acumulando dentro do equipamento, e apesar de pouco quando comparado a entrada, em alguns instantes enche o pé do elevador e provoca o embuchamento do pé. O motor não suporta e desarma, acionando um aviso para a equipe de manutenção abrir e limpar o pé do elevador, para darem seguimento a operação.

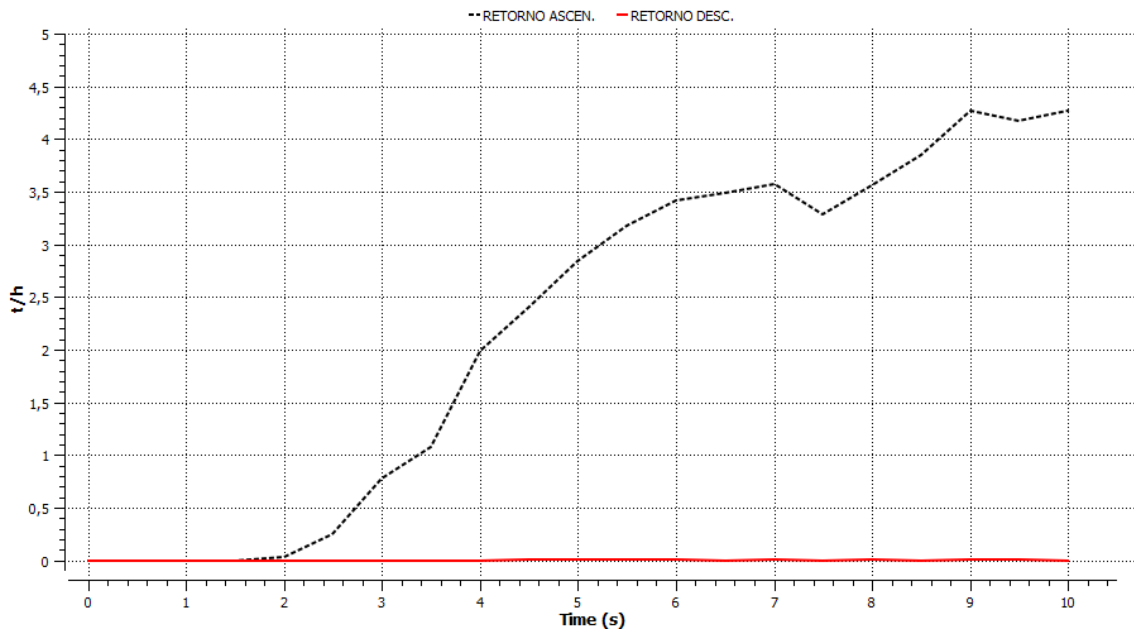


Figura 37 – Análise gráfica do retorno
 Fonte: Autoria própria

4.3.2 Simulação solução – caneca 12X8 M3

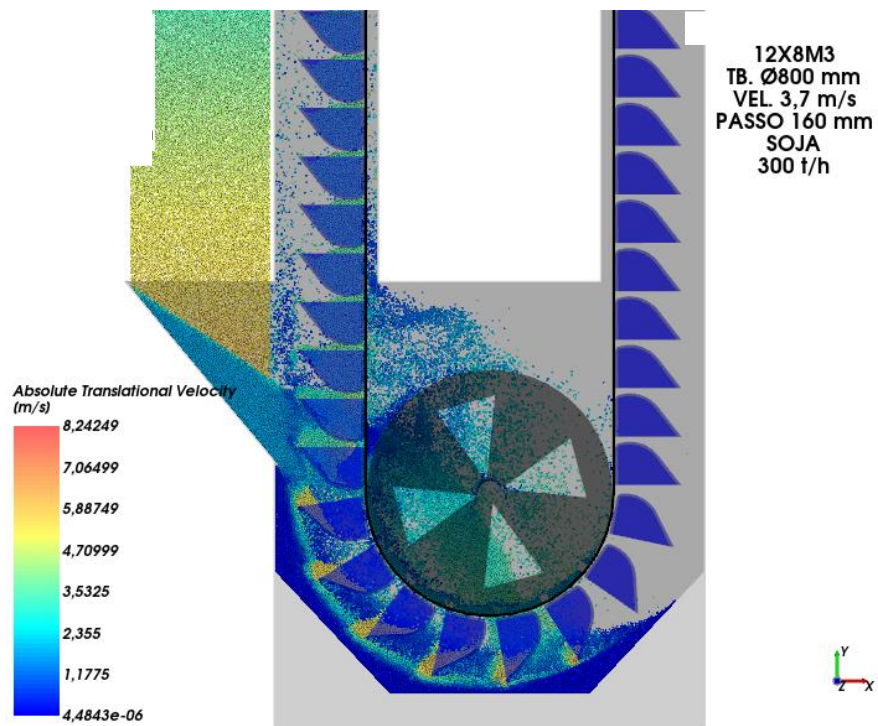


Figura 38 – Vista lateral do carregamento
 Fonte: Autoria própria

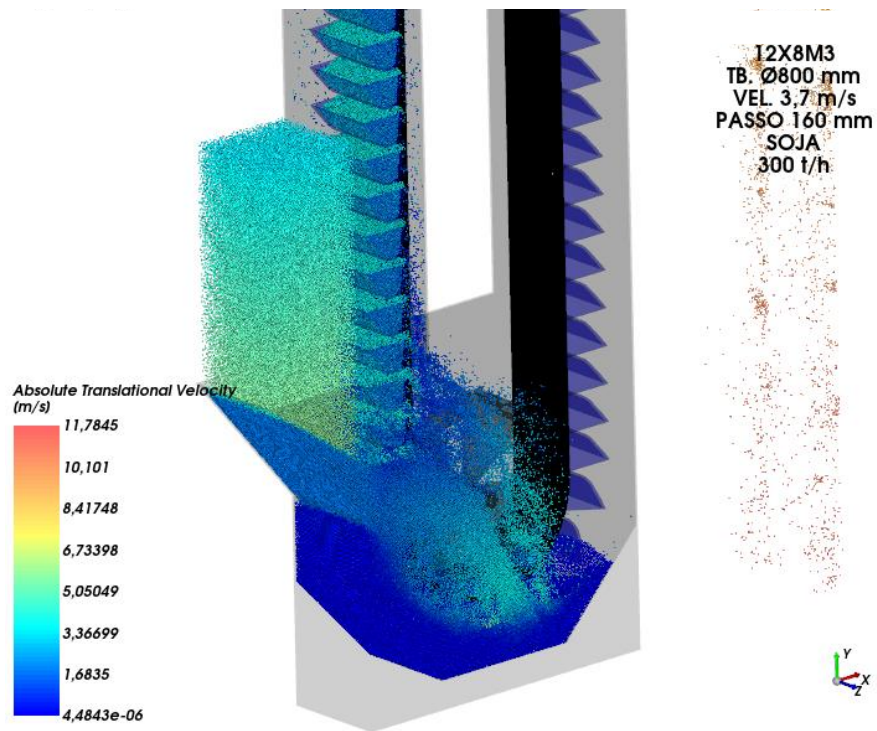


Figura 39 – Vista isométrica do carregamento
 Fonte: Autoria própria

Figura 38 e 39 são dados extraídos da simulação das canecas performando dentro de um elevador similar ao do cliente, empresa B, com o mesmo produto transportado. Nota-se que o modelo de caneca desenvolvida nesse trabalho apresenta bom carregamento, iniciando a dragagem na descendente e finalizando o carregamento na ascendente onde a caneca se encontra na posição de trabalho. Tal feito é possível pela grande projeção de 8" da caneca, raspando todo o produto no pé do elevador e empurrando para próximo da bica.

Outro ponto a ser levantando é que mesmo a uma velocidade linear alta, de 3,7 m/s, as canecas não espalham o produto durante o carregamento, uma vez que a caneca é funda suficiente para armazenar todo o produto no seu interior. Em um passo de 170 mm e transportando soja, a capacidade aferida por essa caneca é de 300 t/h.

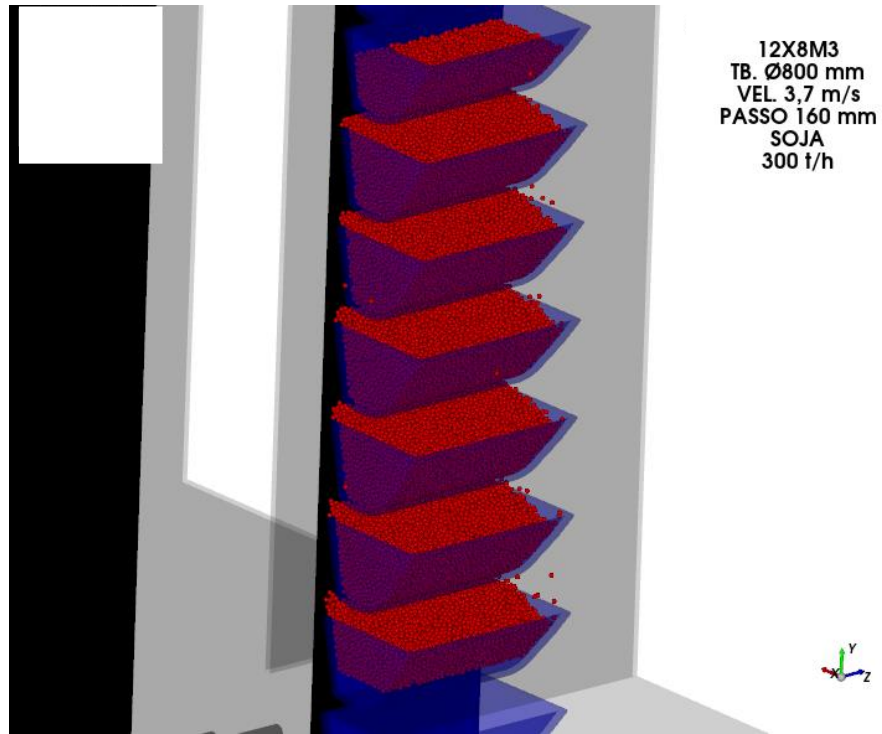


Figura 40 – Elevação baixa
 Fonte: Autoria própria

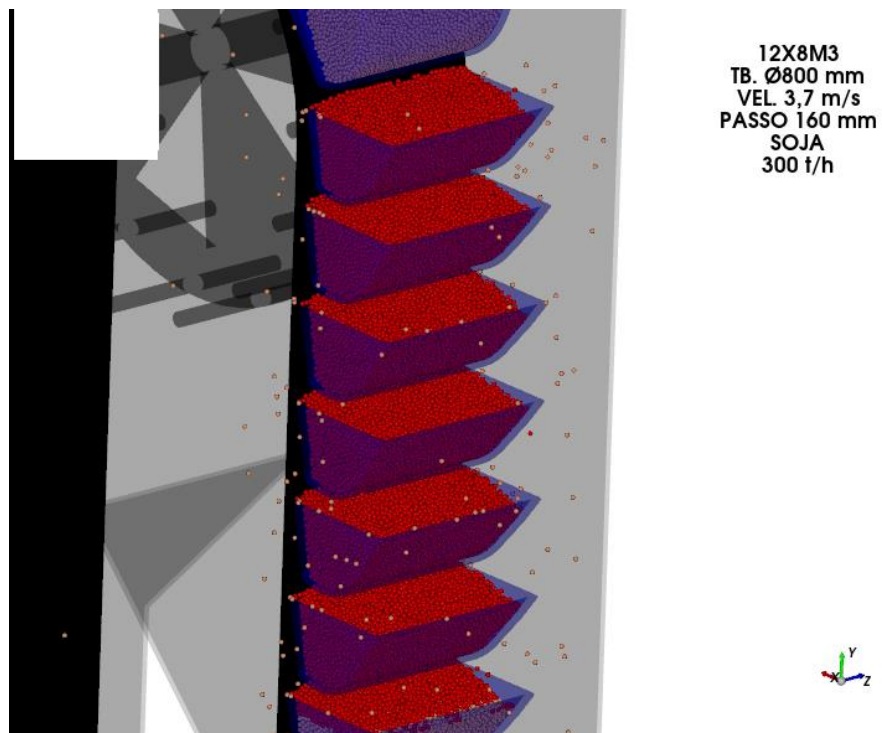


Figura 41 – Elevação alta
 Fonte: Autoria própria

Uma segunda preocupação era como a caneca se comportaria durante o movimento de elevação, desde o pé do elevador até a cabeça. Logo, também se analisou a elevação baixa, região logo após o carregamento do produto, e elevação alta, instante que sucede o descarregamento.

Na elevação baixa, nota-se a eficiência de enchimento no pé do equipamento, é possível observar que as canecas passam nesse ponto com produto acima do nível de água.

Já na elevação alta, a diferença de produto comparada com a elevação baixa é quase zero, isto representa que não há retorno de produto na ascendente.

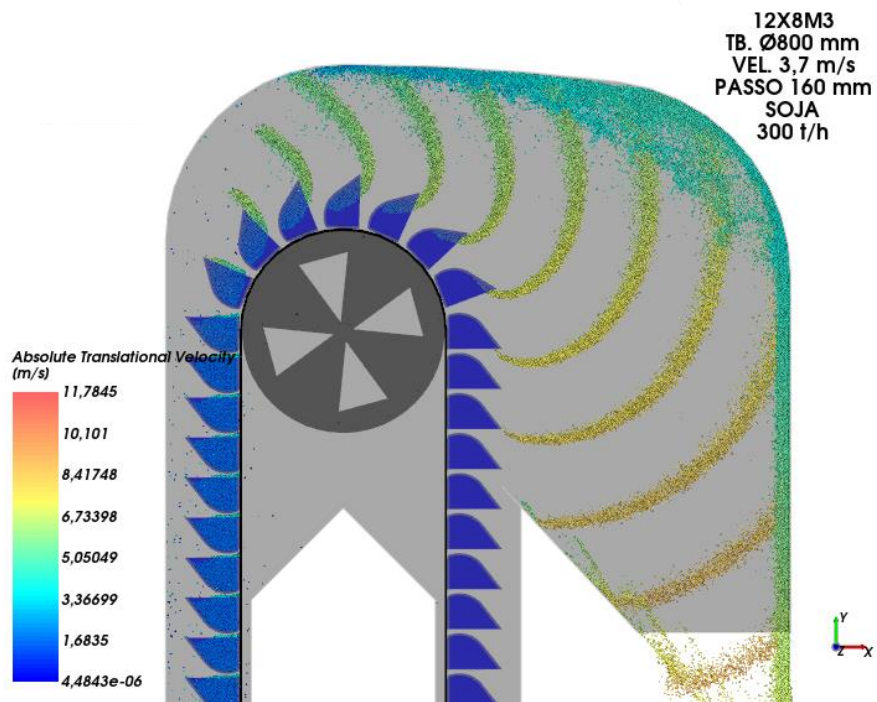


Figura 42 – Vista lateral do descarregamento
Fonte: Autoria própria

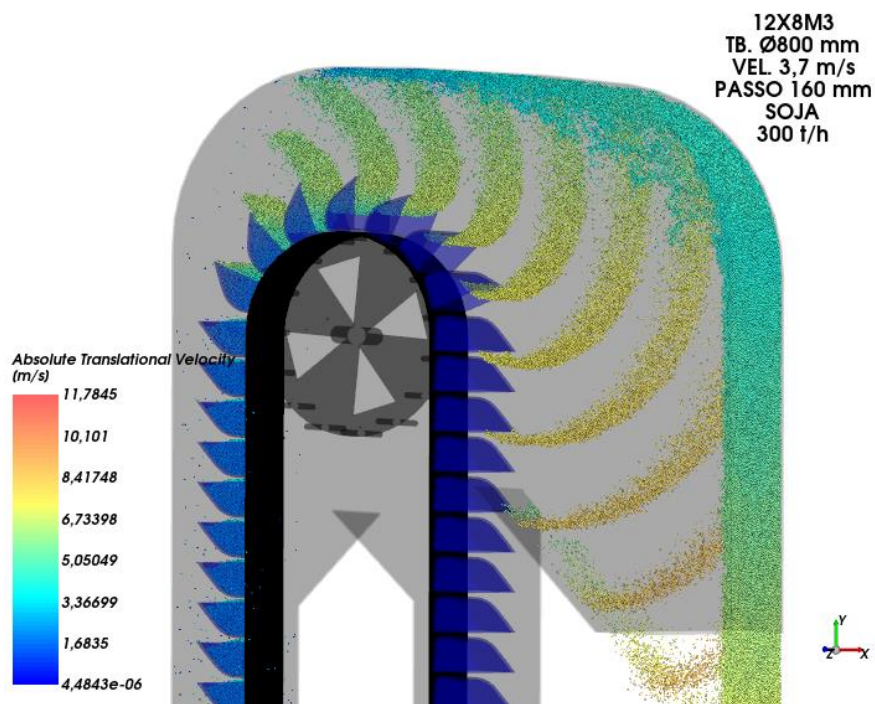


Figura 43 – Vista isométrica do carregamento
Fonte: Autoria própria

O descarregamento é a terceira e maior preocupação do estudo, uma vez que se a caneca apresenta retorno de produto, ou seja, se a caneca descarregasse para baixo ao invés de descarregar na bica de descarregamento, seria necessário refazer a caneca, desde o desenho CAD.

Entretanto, as imagens geradas permitem analisar o exato ponto de lançamento das partículas, tanto o início quanto o fim do arremesso, são possíveis ver a eficiência no descarregamento.

No instante de giro, a caneca transmite energia cinética ao produto que está em seu interior. O produto que até então estava em repouso, agora, devido ao ganho de energia, tende a escoar para o sentido da aceleração centrípeta.

O movimento de arremesso do produto inicia ainda no começo da curvatura, por volta de 135°.

Forma-se um leque perfeito de produto sendo arremessado para fora da caneca, encerrando antes da caneca iniciar seu movimento de descida. Caso houvesse produto ainda no seu interior, esse produto não teria mais a aceleração centrípeta para auxiliar e seria arremessado para baixo, causando o retorno do produto.

Entretanto isso não ocorre, graças ao perfil da caneca, que condiz com a melhor e mais curta trajetória para o produto percorrer durante o descarregamento.

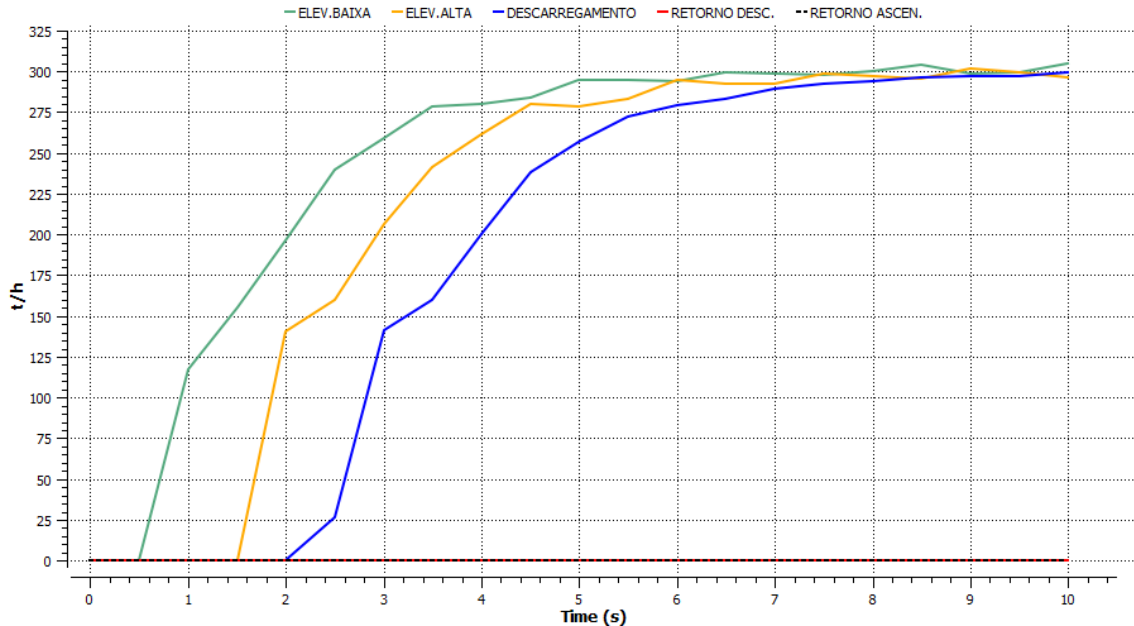


Figura 44 – Análise gráfica do sistema
Fonte: Autoria própria

A curva verde representa a elevação baixa e a linha amarela a elevação alta. Nota-se que ambas convergem para o mesmo ponto e possuem o mesmo comportamento, apenas com 1 segundo de diferença. Isso significa que a mesma quantidade de produto que foi carregado pelas canecas chegou na cabeça do elevador. E como a curva azul, representando o descarregamento, também desempenhou uma curva semelhante, convergindo também para as 300 t/h, demonstra graficamente a eficiência da caneca projetada.

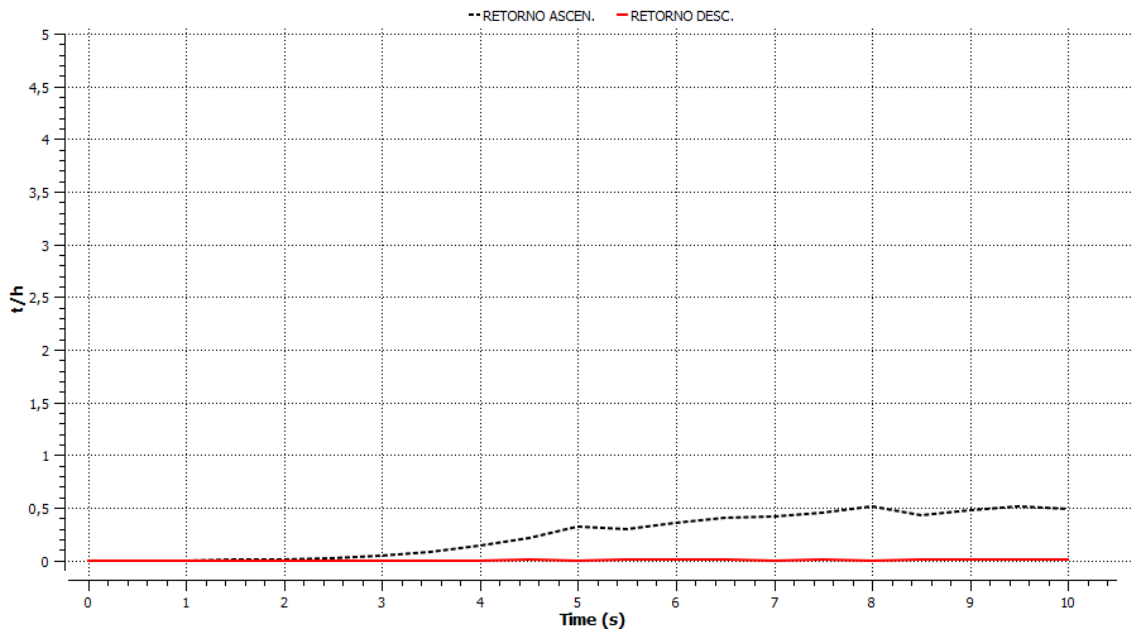


Figura 45 – Análise gráfica do retorno
Fonte: Autoria própria

A preocupação do retorno de produto é desmistificada com a Figura 45, ilustrando que o retorno do produto tende a zero quando o elevador opera com o modelo de caneca desenvolvido nesse estudo.

Uma segunda simulação foi realizada utilizando o modelo de caneca metálica utilizada pelo cliente. Apesar de não ser o foco do estudo, ainda na Figura 33 pode observar uma curva tracejada em preto, representando o retorno de soja causado pelas canecas metálicas. Mesmo que aparentemente seja um baixo retorno, de apenas 0,5 t/h, a longo prazo esse retorno causa diversos danos. Em uma hora a caneca será responsável pelo acúmulo de 500 kg de soja no pé do elevador. A caneca não dará conta de carregar e o pé irá embuchar. Quando isso ocorre, o moto redutor desarma visto que não foi dimensionado para esse excesso de potência exigida e obriga que colaboradores parem suas demandas para limpar o pé do elevador embuchado e religar o elevador.

4.4 Prototipagem

Após a conclusão do projeto 3D e a validação por meio do método FEA e DEM, parte-se para a última etapa do desenvolvimento do projeto da nova caneca.

Essa última etapa inicia com o tratamento do projeto 3D da caneca, refilando a malha em fatias, para posteriormente serem lidas pela impressora 3D.

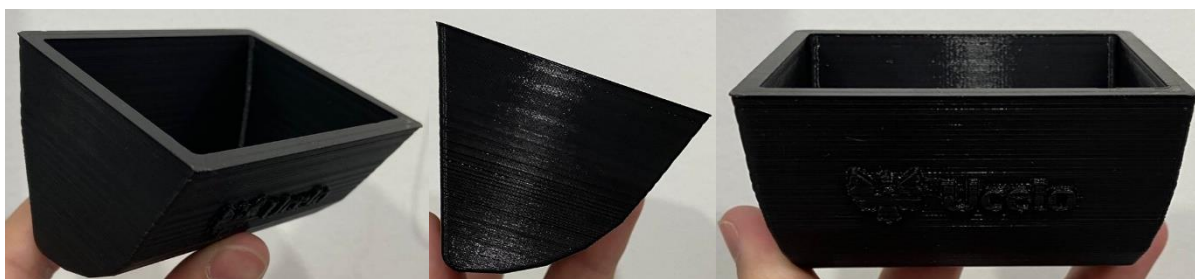


Figura 46 – Replica 3D em filamentos da caneca 12X8 M3
Fonte: Autoria própria

Apesar de meramente ilustrativa, a intenção da replica 3D de filamento da caneca em questão é auxiliar a visualização do projeto final. Juntamente com o relatório do projeto, a replica foi apresentada ao comitê dos gestores e em reunião debateram a viabilidade da fabricação do molde e a injeção da caneca 12X8 M3.

O projeto foi aprovado e solicitaram um projeto de molde. O molde foi fabricado numa empresa terceira no exterior e enviado para a Empresa A onde os primeiros testes do molde foram realizados.

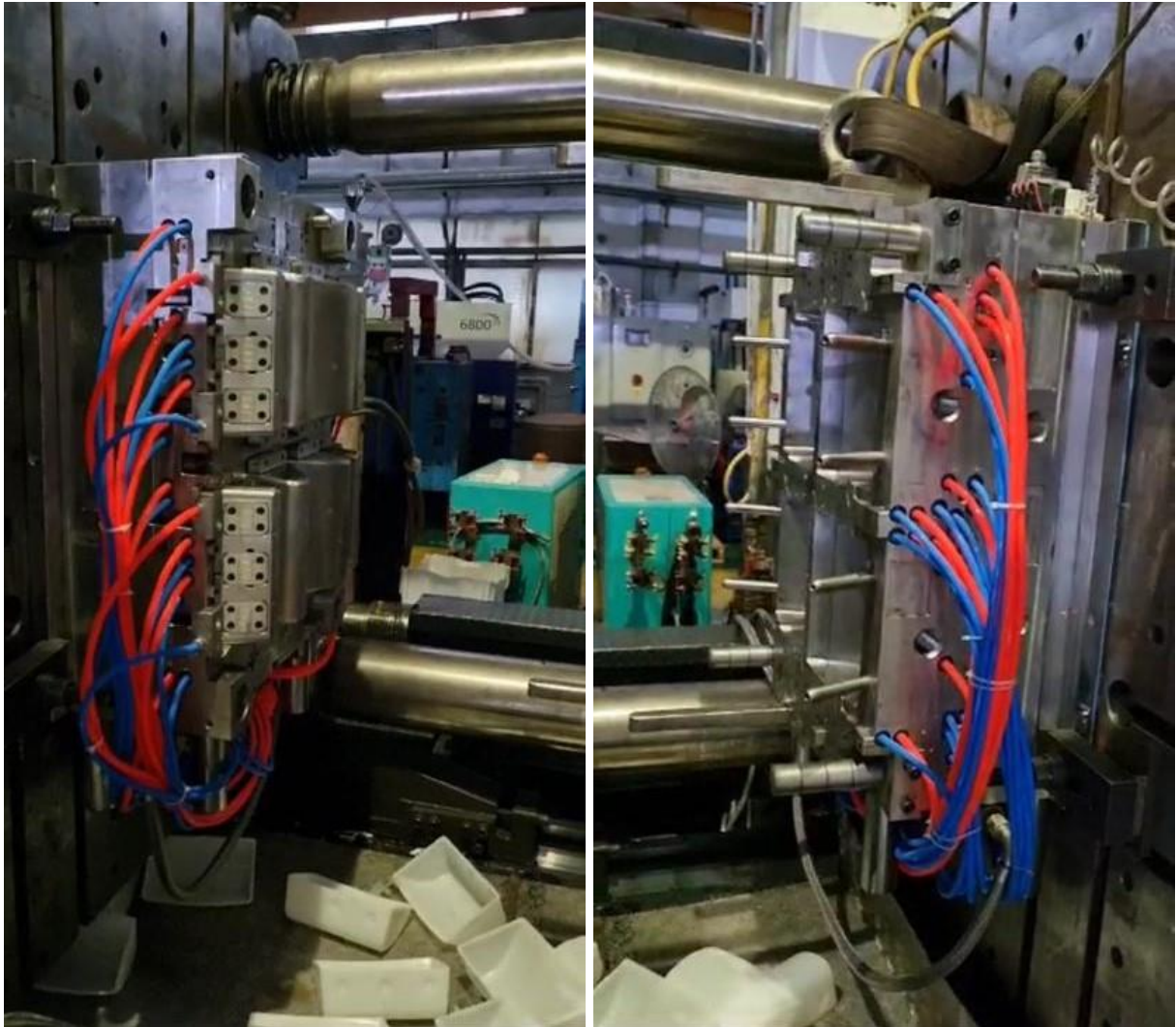


Figura 47 – Molde macho e fêmea da caneca 12X8 M3
Fonte: Autoria própria

O molde foi instalado dentro de umas das injetoras e testes foram iniciados. O responsável por essa etapa é o Departamento de Produção, mais especificamente o supervisor de injeção, em cooperação com o Departamento de Qualidade, que verificam os possíveis defeitos da peça e solicitam ajustes, se necessário, do molde.



Figura 48 – Primeiras canecas 12X8 M3 injetadas
Fonte: Autoria própria

A Figura 48 retrata as primeiras canecas 12X8 M3 injetadas pela Empresa A. Nota-se que há marcas pretas nas duas extremidades próximas. Essas marcas são marcas de degradação do polímero, que nada mais é do que a queima do polímero. Isso ocorreu porque a saída de ar dos moldes estava menor do que o necessário, causando atrito em excesso do ar com as paredes do molde, principalmente próximo ao furo. A solução do problema foi aumentar a abertura de saída de ar.

5 CONCLUSÃO

Com base no estudo realizado para desenvolver uma solução viável para substituição das canecas metálicas utilizadas nos elevadores da empresa B se demonstrou eficaz.

A solução encontrada nada mais é do que o desenvolvimento de uma caneca em polímero com as mesmas dimensões e volume, resistência superiores.

O modelo de caneca 12X8 M3 precisa ter as mesmas larguras que a metálica para que não haja complicação durante a substituição, ela não pode ser maior caso contrário não será aceita pela correia já instalada. Ela também necessita de um volume igual ou superior como é o caso, a fim de aumentar a capacidade nominal do elevador.

O aço SAE 1020, com dureza de carbono 8.8, é o material utilizado para confeccionar as canecas metálicas. O material da caneca 12X8 M3 também deve apresentar uma performance superior quando exposta aos mesmos testes que a caneca metálica. Para isso, utiliza-se polímeros especiais, além de uma camada de parede das canecas de 11 mm. Os materiais selecionados são dois, Nylon 6 e PU.

O modelo correto escolhido para cada elevador, as seleções dos polímeros adequados foram realizadas, para este elevador deve-se utilizar 80% de canecas de Poliamida (NYLON) 6 pois é um material com maior resistência a desgaste, e 20% de caneca de Poliuretano (PU) pois é um material que tem resistência a desgaste e impacto, trabalhando como uma caneca raspador prolongando a vida útil das demais canecas.

O comparativo de deformação que as canecas sofrem devido a um impacto, em virtude de as canecas plásticas terem um limite de escoamento maior que o aço a diferença foi 600% que a caneca raspadora de PU suporta em comparação à metálica. Atualmente o equipamento trabalha aproximadamente com 9,09 caneca / metro, isso equivale a 645 canecas atingindo um peso de 970 kg, realizando a troca por canecas plástica haverá uma redução no número de canecas por metro para 6,25 totalizando 444 canecas, isso representa 747 kg obtendo uma redução de 23% de peso no equipamento. O motor atual tem 43,6 kw ou 60 cv sendo o suficiente para transportar 300 t/h de soja.

Além das canecas em polímero reduzirem a massa total do sistema, visto que o polímero é um material mais leve do que o aço, forma alcançadas maiores resistências ao impacto como tensão e deformação.

O limite de escoamento tanto do Nylon 6 quando do PU são muito superiores ao do aço, logo quando sofrem um esforço externo, deformam elasticamente enquanto o metal deforma plasticamente e não retorna ao formato inicial. Isso prejudica a capacidade volumétrica da caneca que passa a carregar uma menor quantidade de produto, resultando numa menor capacidade para o elevador.

Os polímeros são considerados materiais não abrasivos, e, mesmo quando em contato com metal ou outros polímeros, não geram faíscas, diferentemente das canecas metálicas. A geração de faíscas é um dos três requisitos para o risco de explosão, junto com a presença de oxigênio e a existência de material em pó dentro do elevador, o qual, mesmo com a utilização de exaustores, não pode ser completamente removido. Órgãos de Segurança do Trabalho têm intensificado a fiscalização em elevadores que ainda utilizam canecas metálicas, aplicando multas e restrições. Portanto, a escolha de canecas plásticas apresenta mais uma vantagem nesse contexto.

Apesar do modelo da caneca 12X8 M3 ser apenas um projeto 3D, com uma versão no CAD, é possível através do método de elementos discretos, DEM, comprovar sua eficiência. Esse método replica virtualmente as mesmas condições reais encontradas em campo, desde o equipamento ao produto transportado. Esse método atribui segurança e assertividade no desenvolvimento de novos produtos.

Além desse método também se utilizou o método de elementos finitos, FEA, que atribui confiabilidade a resistência da caneca, independente do teste realizado.

Conclui-se que é viável a fabricação do molde e, posteriormente, a injeção para fabricação do modelo de caneca 12X8 M3 em larga escala pela Empresa A para atender a empresa B. Não somente essa caneca deve ser utilizada nessa situação. Elevadores com características semelhantes também podem se usufruir desse modelo de caneca.

6 REFERENCIAS

- ASTM International. (2019). "Standard Specification for Polyethylene (PE) Plastic Pipe (DR-PR) Based on Controlled Outside Diameter." ASTM D3035-15;
- BEER, F. P., Johnston, E. R., DeWolf, J. T., & Mazurek, D. F. (2014). *Mecânica dos Materiais*. 7ª edição. McGraw-Hill Brasil;
- CALLISTER, W. D., Jr., & Rethwisch, D. G. (2014). *Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução*. 8ª edição. LTC;
- CLEARY, P. (2010). DEM prediction of industrial and geophysical particle flows. *Particuology*, v.8, p 106–118;
- COETZEE, C., ELS, D. (2009). Calibration of discrete element parameter sand the modelling of silo discharge and bucket filling. *Computers and Electronics in Agriculture* 65 (2), 198–212;
- COETZEE, C., ELS, D. (2009). The numerical modelling of excavator bucket filling. *Journal of Terramechanics*. 46 (5), 217–227;
- COETZEE, C., Els, D., Dymond, G. (2010). Discrete element parameter calibration and the modelling of dragline bucket filling. *Journal of Terramechanics*. 47 (1), 33–44;
- DOWLING, N. E., LeMonds, J., & Drucker, D. C. (2007). *Mechanical Behavior of Materials: Engineering Methods for Deformation, Fracture, and Fatigue*. 4th edition. Prentice Hall;
- GIBSON, I., Rosen, D., & Stucker, B. (2014). *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*. 2nd edition. Springer;
- Harper, C. A. (2016). "Handbook of Plastics, Elastomers, and Composites." McGraw-Hill Education;
- MONTELLANO, C. RAMIREZ, Á. GALLEGO, E. AYUGA, F. (2011). Validation and experimental calibration of 3D discrete element models for the simulation of the discharge flow in silos. *Chemical Engineering Science* Volume 66, Issue 21, 1 November, Pages 5116–5126;
- NEVES, Carlos Eduardo Veras. (2009). *Comportamento de materiais granulares usando o método dos elementos discretos*. 166 f. Dissertação (Mestrado em Geotécnica) -Universidade de Brasília, Brasília;
- Osswald, T. A., Rudolph, N., & Pipe, K. P. (2015). "Polymer Processing: Principles and Design." Carl Hanser Verlag;
- PARK, K. J.; ANTONIO. G. C; OLIVEIRA. R. A; PARK. K. L. B.; *Conceitos de processo e equipamentos de secagem*. CT&EA, Campinas – SP 2007;

"Polyamides." In: Handbook of Engineering and Specialty Thermoplastics, Volume 3: Polyethers and Polyesters. Ed. Johannes Karl Fink. Scrivener Publishing LLC, 2010;

"Nylon Plastics Handbook." In: Plastics Design Library. Ed. Mel Schwartz. William Andrew, 1995;

REDDY, J. N. (2017). An Introduction to the Finite Element Method. 4th edition. McGraw-Hill Education;

SILVA, L. C. (1999). Explosões em unidades armazenadoras de grãos. Cascavel: Unioeste. Disponível em <http://www.unioeste.br>. Acesado em 24 de abril de 2018,

SILVA, L. C. (2006). Operação de Secadores Cascata. Departamento de Engenharia Rural. Universidade Federal do Espírito Santo;

Ulrich Meier-Westhues, Stefan Mecking. (2007) "Polyurethanes: Versatile Materials and Sustainable Problem Solvers in the 21st Century." *Angewandte Chemie International Edition*, 46(37), 5716-5719.