



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

**COMPORTAMENTO DE FRUTOS SUBMETIDOS A
SOLICITAÇÃO CÍCLICA UTILIZANDO O MÉTODO DOS
ELEMENTOS DISCRETOS**

EDUARDO MALAVAZI PINTO

CAMPINAS
FEVEREIRO DE 2017

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

**COMPORTAMENTO DE FRUTOS SUBMETIDOS A
SOLICITAÇÃO CÍCLICA UTILIZANDO O MÉTODO DOS
ELEMENTOS DISCRETOS**

Dissertação submetida à banca examinadora
para obtenção do título de Mestre em
Engenharia Agrícola na área de concentração
em Máquinas Agrícolas.

EDUARDO MALAVAZI PINTO

Orientador: Prof. Dr. Antonio Carlos de Oliveira Ferraz

CAMPINAS
FEVEREIRO DE 2017

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Luciana Pietrosanto Milla - CRB 8/8129

P658c Pinto, Eduardo Malavazi, 1989-
Comportamento de fruto submetidos à solicitação cíclica utilizando o método dos elementos discretos / Eduardo Malavazi Pinto. – Campinas, SP : [s.n.], 2017.

Orientador: Antonio Carlos de Oliveira Ferraz.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.

1. Deformação (Mecânica). 2. Modelagem matemática e simulação. 3. Frutas - Classificação. 4. Frutas - Controle de qualidade. I. Ferraz, Antonio Carlos de Oliveira, 1953-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Agrícola. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Behavior of fruits subject to cyclical solicitation using the discrete element method

Palavras-chave em inglês:

Deformation (Mechanics)

Mathematical modeling and simulation

Fruits - Classification

Fruits - Quality control

Área de concentração: Máquinas Agrícolas

Titulação: Mestre em Engenharia Agrícola

Banca examinadora:

Antonio Carlos de Oliveira Ferraz [Orientador]

Renato Pavanello

Angel Pontin Garcia

Data de defesa: 21-02-2017

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Agrícola

Este exemplar corresponde à redação final da **Dissertação de Mestrado** defendida por **Eduardo Malavazi Pinto**, aprovada pela Comissão Julgadora em 21 de fevereiro de 2017, na Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas.

FEAGRI

Prof. Dr. Antonio Carlos de Oliveira Ferraz – Presidente e Orientador
FEAGRI/UNICAMP

Prof. Dr. Renato Pavanello – Membro Titular
FEM/UNICAMP

Prof. Dr. Angel Pontin Garcia – Membro Titular
FEAGRI/UNICAMP

Faculdade de
Engenharia Agrícola
Unicamp

A Ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no processo de vida acadêmica do discente.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Prof. Dr. Antonio Carlos de Oliveira Ferraz pela paciência, compreensão e disposição única em ensinar e aprender.

A minha família pelo apoio e suporte, compreensão, carinho e paciência em mais uma fase de minha vida.

Ao Dr. Henrique Leandro Silveira, aluno de doutorado Me. Luis Alfredo Pires Barbosa e aos alunos de mestrado Eng. Felipe Thadeu da Silva e Eng. Marcos Vieira pela ajuda nos processos de simulação e nos estudos dos modelos.

A Waldir Parise e a Irmãos Parise Ltda pelo respeito e pelo fornecimento dos pêssegos utilizados no estudo.

As funcionárias do Laboratório de Pós-Colheita da FEAGRI Maria Rosalia da Silva Favoretto e Ma. Rosa Helena Aguiar pela assistência na conservação dos frutos e nas análises das deformações.

Ao funcionário Leandro Moraes pelo auxílio no manuseio dos equipamentos e nos ensaios laboratoriais.

Ao funcionário José Maria da Silva pelo auxílio na construção do dispositivo usado nas análises.

RESUMO

O presente trabalho propõe e valida um modelo matemático para predição de dano mecânico em frutos esféricos submetidos a esforços cíclicos, empregando o método dos elementos discretos. Para tal, foi utilizado um modelo reológico constitutivo e o software Yade para modelagem dos frutos. Os frutos foram ensaiados em caixa de madeira com auxílio de uma mesa vibratória juntamente com um inversor de frequência. A deformação nos frutos foi medida com auxílio de dispositivo desenvolvido para este trabalho, baseado na metodologia de Mohsenin (1986). Após coleta dos parâmetros dos frutos, foram realizadas simulações para calibração e validação do modelo. Os resultados mostram que, na maioria dos pontos, a diferença entre valores ensaiados e simulados se manteve entre zero e 0,20mm, valor utilizado para avaliação.

ABSTRACT

This work proposes and validates a mathematic model for mechanical damage prediction in spherical fruits under cyclical tensions, using the Discrete Element Model. A constitutive rheological model and the YADE software were used for fruit modeling. The fruits were tested in a wooden box with the support of a vibrating table together with a frequency inverter. The deformation in the fruits was measured using a device developed for this work, based on Mohsenin methodology. After the fruit parameters were collected, simulations were conducted for calibration and validation of the model. The results show that, in most points, the difference between values tested and simulated remained between zero and 0.20mm, value used for evaluation.

LISTA DE SÍMBOLOS

C	= força de coesão entre as partículas [N]
c	= coeficiente de viscosidade [kg.s ⁻¹]
c_n	= coeficiente de viscosidade na direção normal [kg.s ⁻¹]
c_t	= coeficiente de viscosidade na direção tangencial [kg.s ⁻¹]
e_n	= coeficiente de restituição na direção normal [—]
e_t	= coeficiente de restituição na direção tangencial [—]
F	= força de contato [N]
$\vec{F}_i$	= força de contato atuando na partícula i [N]
F_n	= força de contato na direção normal [N]
F_t	= força de contato na direção tangencial [N]
F_t'	= força de contato na direção tangencial antes da iteração [N]
I_1	= momento de inercia do corpo 1 [kg.m ²]
I_2	= momento de inercia do corpo 2 [kg.m ²]
$\vec{J}_i$	= momento de inercia na direção i [kg.m ²]
k	= coeficiente de rigidez [kg.s ⁻²]
k_0	= coeficiente de rigidez inicial tangencial [kg.s ⁻²]
k_1	= coeficiente de rigidez normal para carregamento [kg.s ⁻²]
k_2	= coeficiente de rigidez normal para descarregamento [kg.s ⁻²]
k_n	= coeficiente de rigidez na direção normal [kg.s ⁻²]
k_t	= coeficiente de rigidez na direção tangencial [kg.s ⁻²]
m_{eff}	= massa efetiva [—]
$\vec{M}_i$	= momento atuando na partícula i [N.m]
m_i	= massa da partícula i [kg]
R_1	= raio do corpo 1[m]
R_2	= raio do corpo 2 [m]
s	= desvio padrão [—]
u_t	= vetor paralelo ao plano de contato [—]

γ = expoente usualmente fixado em 1/3 [—]

Δs = deslocamento relativo das superfícies [m]

δ = deformação do produto ou deslocamento do ponto do contato [m]

δ_0 = deslocamento quando a força no descarregamento atinge zero [m]

$\vec{\delta}_i$ = deslocamento da partícula i [m]

δ_n = deformação do produto ou deslocamento do ponto de contato na direção normal [m]

δ_t = deslocamento do ponto de contato na direção tangencial [m]

$\dot{\delta}$ = taxa de deformação [mm.s⁻¹]

$\dot{\delta}_n$ = taxa de deformação na direção normal [mm.s⁻¹]

$\dot{\delta}_n^f$ = taxa de deformação na direção normal imediatamente depois do tempo t [mm.s⁻¹]

$\dot{\delta}_n^i$ = taxa de deformação na direção normal imediatamente antes do tempo t [mm.s⁻¹]

$\dot{\delta}_t$ = taxa de deformação na direção tangencial [mm.s⁻¹]

$\dot{\delta}_t^f$ = taxa de deformação na direção tangencial imediatamente depois do tempo t [mm.s⁻¹]

$\dot{\delta}_t^i$ = taxa de deformação na direção tangencial imediatamente antes do tempo t [mm.s⁻¹]

$\ddot{\delta}_n$ = aceleração dos corpos em contato na direção normal [m.s⁻²]

$\ddot{\delta}_t$ = aceleração dos corpos em contato na direção tangencial [m.s⁻²]

μ = coeficiente de atrito [—]

ϕ_u = ângulo de atrito [°]

$\vec{\varphi}_i$ = orientação angular na direção i [rad]

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1. MÉTODO DOS ELEMENTOS DISCRETOS	15
2.2. MODELOS DE FORÇA DE CONTATO	16
2.3. AVALIAÇÃO E PREDIÇÃO DE DANOS MECÂNICOS EM FRUTOS	20
2.4. PLATAFORMA YADE	22
3. METODOLOGIA	25
3.1. MATERIAL	25
3.2. PROPOSTA DE MODELO	25
3.3. DETERMINAÇÃO DAS ENTRADAS DA SIMULAÇÃO	26
3.3.1 – Determinação dos parâmetros do modelo	26
3.3.2 – Determinação da densidade	27
3.3.3 – Determinação do coeficiente de atrito	27
3.4. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	28
3.4.1 – Características da caixa	28
3.4.2 – Características das esferas	28
3.4.3 – Solicitação mecânica do conjunto	29
3.5. ENSAIO DE VALIDAÇÃO	29
4. RESULTADOS	34
4.1. ENSAIO PRELIMINAR	34
4.2. CALIBRAÇÃO DOS PARÂMETROS DO MODELO	37
4.3. VALIDAÇÃO DO MODELO	38

5. CONCLUSÃO	49
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	50

1. INTRODUÇÃO

Na produção comercial de produtos agrícolas, são utilizados vários equipamentos que interagem mecanicamente com esses produtos. No caso da produção de frutas, essa interação ocorre mais intensamente no processo de pós-colheita, onde o fruto passa por processos de classificação, seleção, embalagem, transporte e refrigeração. Nestas etapas o fruto é mecanicamente solicitado e muitas vezes danificado, gerando perdas.

De acordo com a FAO (2013):

“1,3 bilhões de toneladas de alimentos são desperdiçados anualmente não só causando grandes perdas econômicas, como também tem impacto significativo nos recursos naturais dos quais a humanidade depende para se alimentar. [...] 54% do desperdício de alimentos no mundo ocorre na fase inicial da produção, manipulação pós-colheita e armazenagem. Os restantes 46% ocorrem nas etapas de processamento, distribuição e consumo. [...] Quanto mais tarde um produto alimentar se perde na cadeia alimentar, maiores são as consequências ambientais, já que ao custo inicial da produção devem ser adicionados os custos ambientais incorridos durante o processamento, transporte, armazenamento e utilização.”.

Marques e Caixeta Filho (2001) ainda lembram que o transporte pode ser uma etapa prejudicial do ponto de vista de qualidade de produtos perecíveis devido a grande variedade de danos, em particular danos mecânicos, que podem surgir nesta etapa. Amassamentos devido ao empilhamento de caixas acima de sua capacidade ou por compressão da camada inferior devido ao próprio peso do produto. A movimentação do veículo pode gerar vibrações que causam fadiga e abrasões devido ao atrito com superfícies ásperas.

No caso particular de frutos esféricos confinados em uma caixa, Figura 1, solicitados ciclicamente, ocorrem interações mecânicas entre frutos e interações entre fruto e caixa. Tais interações podem levar a perda do produto. As investigações encontradas sobre frutos confinados em uma caixa solicitados por vibração analisaram o comportamento do conjunto considerando perdas totais de produtos e a influência da posição da caixa na pilha durante o transporte. No entanto, as interações força-deformação foram pouco exploradas nos frutos dentro de caixas no momento da solicitação.

Figura 1. Frutos confinados em uma caixa.



O conhecimento do comportamento dos frutos quando mecanicamente solicitado é importante quando se deseja avaliar a interação destes produtos agrícolas com outras superfícies. A avaliação dessas interações pode ser feita utilizando ensaios em laboratório variando as solicitações mecânicas, como impacto, corte ou vibração, assim como diferentes metodologias. Dentre essas metodologias, existe a simulação utilizando modelos matemáticos aplicados com auxílio de programas computacionais.

O uso da simulação computacional pode ser justificado através dos seguintes fatores (FILHO, 2010): Um estudo simulado permite aos analistas considerarem níveis de detalhes jamais imaginados há pouco tempo atrás, permitindo que diferenças de comportamento, às vezes sutis, venham a ser notadas. As abordagens tradicionais, ao contrário, empregam estudos preliminares estáticos e com tantas simplificações que, muitos projetos depois de implantados, acabam sofrendo inúmeras modificações e adaptações; a possibilidade do emprego de animações, permitindo que se visualize o comportamento dos sistemas durante as simulações; um estudo simulado pode economizar tempo e recursos financeiros no desenvolvimento de projetos, trazendo ganhos de produtividade e qualidade. Os custos de tais análises são, em geral, insignificantes se comparados aos seus benefícios; a percepção de que o comportamento modelo simulado é muito semelhante ao do sistema real.

Contudo a simulação não evita a realização de ensaios, visto que os parâmetros de entrada exigidos para simulação são obtidos através de ensaios laboratoriais. Outro ponto a ser levantado é a necessidade de saber utilizar o programa computacional além das metodologias laboratoriais.

Os métodos de simulação para sólidos podem considerar o objeto a ser simulado como contínuo (Elementos Finitos) e descontínuo (Elementos Discretos). Como existe descontinuidade num arranjo a granel de frutos, a abordagem por métodos que consideram o meio contínuo não é adequado. Assim optou-se pela utilização do método de elementos discretos (MED), método numérico de modelagem de comportamento mecânico de materiais particulados, a partir de modelos de força de contato. Para a utilização desta metodologia é necessário estabelecer modelos de contato entre as partículas para descrever o comportamento mecânico das interações partícula-partícula e partícula-superfície de contorno. Preferencialmente serão buscados modelos constitutivos por proporcionarem melhor entendimento do comportamento físico.

Dentre os programas computacionais para simulação disponíveis o YADE é um software livre que utiliza o Método dos Elementos Discretos, disponível na plataforma Linux, que utiliza em sua programação linguagem Python, sendo o software escolhido para realizar as simulações computacionais de frutos confinados em caixa sob vibração.

O objetivo deste trabalho é propor e validar um modelo de força de contato simples que descreve o comportamento de frutos confinados em uma caixa solicitada ciclicamente utilizando o Método dos Elementos Discretos.

Como objetivos secundários estão à execução de ensaios laboratoriais com frutos, sob solicitação cíclica para validação dos modelos de contato.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. MÉTODO DOS ELEMENTOS DISCRETOS.

O método dos elementos discretos foi apresentado por Donald Greenspan (GREENSPAN, 1973 in ZHANG; WHITEN, 1999).

Um dos primeiros trabalhos utilizando o método dos elementos discreto foi realizado por Cundall e Strack (1979). Eles definem o MED como “um modelo numérico capaz de descrever o comportamento mecânico de um conjunto de discos ou esferas.”.

O MED é uma aplicação simples para resolver as equações de movimento para um sistema de partículas com muitas interações (LUDING, 2008). O método é baseado na análise de interação entre partícula-partícula ou partícula-superfície, reduzindo o problema à integração da equação de movimento translacional de Newton e equação de movimento rotacional de Euler.

$$m_i \frac{\partial^2 \vec{\delta}_i}{\partial t^2} = \vec{F}_i \quad \text{e} \quad \hat{J}_i \frac{\partial^2 \vec{\varphi}_i}{\partial t^2} = \vec{M}_i \quad (1)$$

Van Zeebroeck (2007) levanta dois principais benefícios de se utilizar esta metodologia: a abrangência do modelo e a repetibilidade da simulação com MED. A abrangência refere-se à capacidade de estimar as forças agindo em cada fruto, para cada instante de tempo. Devido à variabilidade do material biológico, um ensaio mecânico jamais será igual ao outro. Na simulação com MED as características do produto serão sempre as mesmas, o que possibilita a repetibilidade dos ensaios mecânicos e uma maior confiabilidade nos resultados.

O método dos elementos discretos possui aplicação na resolução dos mais variados problemas envolvendo o comportamento de particulados de diferentes áreas como simulação de falha de concreto (SKARZYNSKI; NITKA; TEJCHMAN, 2015) e de fluxo do concreto (REMOND; PIZETTE, 2014), propagação de falha em rochas (TRIVINO; MOHANTY, 2015) e estudo de movimentação de solos (ASAF; RUBINSTEIN; SHMULEVICH, 2007).

Registros da utilização de modelagem discreta aplicada na área de pós-colheita, aparecem a partir da década de 90 na aplicação em frutos por Rong, Negi e Jofriet (1993), onde foi estudado o efeito do impacto causado pelo transporte em frutos representados por discos em uma simulação 2D (VAN ZEEBROECK, 2007).

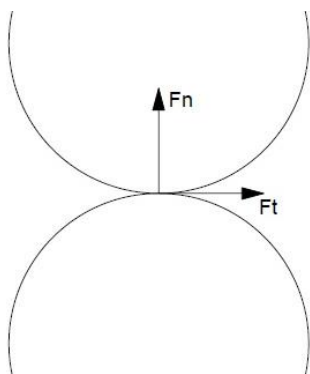
Existem pesquisas na área de pós-colheita voltadas para grãos (comportamento dos grãos na descarga de silos (LU; NEGI; JOFRIET, 1997), simulação das tensões em uma caixa de cisalhamento (SAKAGUCHI; FAVIER, 2000) separação de arroz integral e sem casca (SAKAGUCHI *et al*, 2001), comportamento de grãos sob compressão (RAJI; FAVIER, 2004)) e trabalhos que possuem aplicação direta na agricultura (eficiência de transporte de uma rosca transportadora (OWEN; CLEARY, 2009), escoamento de partículas em rosca alimentadora (HOU; DONG; YU, 2014)).

A maioria dos trabalhos encontrados com frutos e hortaliças foram realizados por Van Zeebroeck (VAN ZEEBROECK *et al*, 2003, 2006a, 2006b, 2008; VAN ZEEBROECK, 2007), que estudou o comportamento de maçãs e tomates com o auxílio de MED quando solicitados mecanicamente. Isto mostra que poucos trabalhos utilizando este método foram realizados com este tipo de material biológico, material estudado neste trabalho.

2.2. MODELOS DE FORÇA DE CONTATO.

Modelos de força de contato descrevem as forças no contato esfera-esfera ou esfera-superfície. Estas forças podem ser normais, F_n , e tangenciais, F_t , (Figura 2).

Figura 2. Diagrama esquemático de forças devido ao contato.



Os modelos de força de contato mais simples são o modelo elástico derivado da Lei de Hooke,

$$F = k\delta \quad (2)$$

e o aquele que descreve o comportamento dos fluidos newtonianos.

$$F = c\dot{\delta} \quad (3)$$

Esses modelos associados em paralelo formam o conhecido modelo de Kelvin-Voigt descrevendo assim um comportamento viscoelásticos.

$$F = k\delta + c\dot{\delta} \quad (4)$$

Os modelos (2) e (3) associados em série formam o modelo de Maxwell que também descreve um comportamento viscoelástico. A equação de força do modelo não fornece informações para obtenção dos parâmetros, neste caso a equação de deformação é mais indicada.

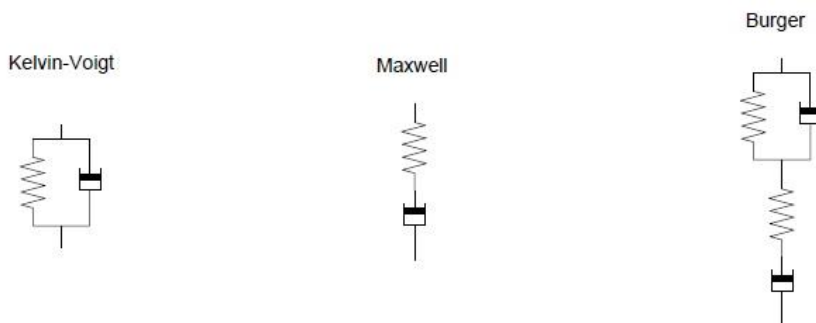
$$F = k\delta \text{ ou } F = c\dot{\delta} \quad \text{ou} \quad (5)$$

$$\delta = \frac{F}{k} + \frac{1}{c} \int F dt$$

Ambos os modelos, (4) e (5), são uteis na descrição do comportamento viscoelástico. O modelo de Kelvin-Voigt expressa fluência, enquanto o modelo de Maxwell expressa à relaxação do material. A representação reológica destes modelos é exposta na Figura 3.

Um modelo de força de contato mais completo que os dois anteriores é o modelo de Burger (Figura 3), que representa os comportamentos de relaxação e fluência, pois combina os modelos de Maxwell e Kelvin-Voigt em série.

Figura 3. Representação gráfica dos modelos.



Estes modelos são lineares e descrevem o comportamento do material uma vez conhecido os parâmetros do mesmo. Devido o componente viscoso, após um período de tempo ocorrerá deformação permanente, comportamento típico da resposta de produtos agrícolas. Os modelos não consideram a geometria dos corpos em contato, como ocorre no modelo de Hertz, desenvolvido para esferas rígidas em contato. Como o material a ser ensaiado possui componente viscoso muito evidente e o modelo de Hertz não é linear, não será considerado para o estudo.

Cundall e Strack (1979) utilizaram-se de um modelo de força de contato viscoelástico linear para descrever o comportamento de um conjunto de nove discos postos dentro de quatro paredes que simulavam partículas minerais sobre pressão. O modelo é descrito por:

$$F_n = k_n \delta_n + c_n \dot{\delta}_n \quad (6)$$

$$F_t = \min[(F_n \tan \phi_u + C), (k_t \delta_t + c_t \dot{\delta}_t)] \quad (7)$$

Na direção normal consideraram um modelo de Kelvin-Voigt. Na direção tangencial o modelo de Kelvin-Voigt também foi considerado, porem, caso ocorresse deslizamento entre as esferas a força de atrito comandaria o movimento, descrita pelo modelo de atrito seco de Coulomb. Assim, a força na direção tangencial corresponde ao menor valor.

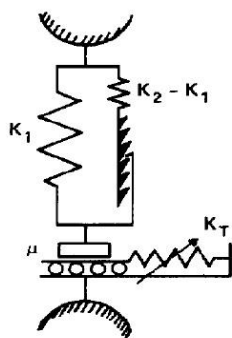
Walton e Braun (1986) conduziram a modelagem com discos tratando-os como materiais elastoplásticos, isto é, com ocorrência de deformação e perda de energia permanente sem dependência temporal. Eles apresentam um novo modelo e uma abordagem diferenciada em relação ao trabalho de Cundall e Strack (1979), que trataram os elementos (discos) como sendo materiais viscoelásticos.

$$F_n = \begin{cases} k_1 \cdot \delta & \text{para carregamento} \\ k_2 \cdot (\delta - \delta_0) & \text{para descarregamento} \end{cases} \quad (8)$$

$$F_t = F'_t + \begin{cases} \Delta s \cdot k_0 \left(1 - \frac{F'_t - F_{t0}}{\mu F_n - F_{t0}}\right)^\gamma & \text{para sentido positivo} \\ \Delta s \cdot k_0 \left(1 - \frac{F_{t0} + F'_t}{\mu F_n + F_{t0}}\right)^\gamma & \text{para outro sentido} \end{cases} \quad (9)$$

Onde F_{t0} é inicialmente zero e ganha o valor de F'_t a cada iteração. E sua representação é apresentada na Figura 4.

Figura 4. Representação do modelo de Walton-Braun.



Este modelo foi utilizado por Vu-Quoc, Zhang e Walton (2000) para realizar modelagem discreta tridimensional com material de geometria não esférica. O modelo, por descrever deformação plástica, contempla deformação permanente não possuindo dependência temporal. Na direção tangencial o modelo apresenta um componente de rigidez e outro de atrito seco. Nesse aspecto se distancia dos modelos viscoelásticos e por isso, este modelo não demonstra potencial para ser utilizado para este trabalho.

Kuwabara e Kono (1987) propõem um modelo viscoelástico de Kelvin-Voigt com componentes não lineares (VAN ZEEBROCK, 2007).

$$F = k\delta^{3/2} + c\delta^{1/2}\dot{\delta} \quad (10)$$

A parte do modelo que representa a rigidez ou a parte elástica agora possui um expoente 3/2 na deformação e a parte que representa a viscosidade depende, além da taxa de deformação, da deformação elevada a um expoente 1/2.

A mesma equação foi proposta por Brilliantov *et al* (1996ab), partindo de pressupostos distintos (VAN ZEEBROCK, 2007).

Van Zeebroeck (2007) utilizou o modelo de Kuwabara e Kono em seu trabalho de predição de dano mecânico em frutos e encontrou dificuldade na determinação dos parâmetros. Como não foi encontrado trabalho de predição do comportamento dos frutos utilizando o método de elementos discretos com modelos reológicos lineares, este trabalho irá utilizar um dos modelos lineares.

Analizando os modelos tangenciais, Zhang e Whiten (1999) propuseram uma nova abordagem para modelo tangencial, aplicando um modelo para descrever deslizamento e outro modelo para descrever rotação, os dois baseados no atrito seco dinâmico, diferente do modelo apresentado por Cundall e Strack (1979). Maiores detalhes a respeito do modelo são apresentados em Zhang e Whiten (1999). Em frutos dispostos em

um ambiente confinado, solicitado ciclicamente, com baixas acelerações e amplitudes a força normal será mais expressiva que a força tangencial. Portanto, pressupõe que este modelo vá além das necessidades do estudo.

Os modelos mais utilizados e os aperfeiçoamentos propostos nos modelos para determinação das forças de contato foram apresentados neste tópico. A escolha do melhor modelo carece de dados do comportamento do produto para determinação.

2.3. AVALIAÇÃO E PREDIÇÃO DE DANOS MECÂNICOS EM FRUTOS.

Entendesse por danos mecânicos, em frutas e hortaliças, a quebra da estrutura do material, com liberação de enzimas polifenoloxidasas, causada por interações mecânicas, tais como impacto, corte, vibração, abrasão e compressão.

Investigações encontradas voltadas para estudo de danos mecânicos em frutos utilizam compressão, impacto, corte ou abrasão (avaliação da firmeza de produtos hortícolas através de compressão (LUENGO *et al*, 2003). Uso de impacto para coleta de parâmetros de modelo de força de contato para análise do comportamento mecânico de maçãs, tomates e batatas (VAN ZEEBROECK *et al*, 2003). Danos causado em bananas após colheita (SANCHES *et al*, 2004) e em todo o processo (COSTA, 2005). Avaliação de dano mecânico causado por impacto em maçãs e tomates (VAN ZEEBROECK, 2007). Resposta fisiológica do mamão após solicitado por corte, impacto e abrasão (GODOY, 2008), de abacate após solicitado por compressão, corte e impacto (SANCHES, 2008) e de maçãs após solicitado por compressão e impacto (MONTERO *et al*, 2010). Resposta fisiológica do mamão após solicitado por corte (TEZOTTO *et al*, 2011). Efeito da atmosfera modificada na resistência de goiabas danificadas por impacto e compressão (GRIGIO *et al*, 2010)) para avaliar o aparecimento de danos ou a profundidade do dano gerado no produto.

Na avaliação da extensão física dos danos mecânicos nos corpos de prova os métodos mais comuns são a análise de volume do dano (VAN ZEEBROECK, 2007) e análise da área de superfície do dano (GODOY, 2008; SANCHES, 2008). Estes métodos são chamados de métodos destrutivos, pois é necessário seccionar o corpo de prova para realização das medidas, impedindo que novos dados possam ser coletados.

Outra linha analisa os danos sofridos devido à vibração do fruto. A maior parte destes concluíram que a quantidade de frutos danificados no transporte está relacionada com a posição da caixa na pilha e a posição da pilha no veículo de transporte (estudo de danos causados por vibração devido ao transporte do fruto ainda no pomar (TIMM *et al*, 1998), avaliação de danos causado pelo transporte em nêspersas (BARCHI *et al*, 2002) e em peras (SLAUGHTER; HINSCH; THOMPSON, 1993; BERARDINELLI *et al*, 2005; ZHOU *et al*, 2007) e avaliação do dano gerado por vibração em função da posição da caixa e do fruto no caminhão (SOLEIMANI; AHMADI, 2014)). Kimmel, Peleg e Hinga (1992) estudaram os efeitos da vibração em laranjas e maçãs. Devido à estrutura do material, maçãs são os frutos mais utilizados nos estudos a que envolvem vibração (efeitos dos picos da oscilação em maçãs durante transporte (SCHOORL; HOLT, 1985; SCHULTE-PASON *et al*, 1990; HINSCH *et al*, 1993;)).

Nessas investigações, ficou evidente a dificuldade de avaliar progressão temporal da extensão do dano. A maioria das vezes optou-se por uma abordagem destrutiva, porém existe métodos para avaliação de dano que não destroem o espécime. Wu e Wang (2014) utilizaram de espectrometria, na região visível e infravermelho próximo, para avaliar dano em tomate gerado por diferentes níveis de vibração em transporte simulado.

Na mesma linha de atuação proposta neste trabalho, isto é, a análise de danos causados por vibração utilizando o método dos elementos discretos, somente foi encontrado o trabalho de Van Zeebroeck (2006b), onde foi utilizada a avaliação do volume do dano mecânico para a predição do dano e validação da simulação.

Como alternativa, a utilização de espectroscopia (WU; WANG, 2014) para análise do dano se apresenta como uma metodologia não destrutiva promissora para uso nesta pesquisa, em substituição a metodologia de avaliação utilizando o volume de dano.

A avaliação do dano consiste em determinar a extensão do dano depois do dano ocorrer ou ser gerado. Quando se utiliza de outra metodologia para estudar o dano em produto que não seja medir o dano produzido, o estudo é chamado de predição do dano. Para tal, é necessário conhecer o comportamento do produto e avaliar a qualidade do método de predição utilizado.

Xing e Beardmeaker (2007) realizam um estudo de predição de dano em maçãs utilizando espectrometria e medidas do módulo de elasticidade (E). Os resultados

obtidos apontam que o parâmetro comparado não prediz com precisão a ocorrência de dano.

O trabalho realizado em 2008 por Sadrnia *et al* utilizou elementos finitos no lugar da espectrometria para prever a resposta de melancias solicitadas por compressão, tendo a deformação da melancia como parâmetro para validação da simulação. A capacidade de predição neste trabalho é condicional ao ensaio, modelos 2D tiveram menos erro em ensaio longitudinal e modelos 3D em ensaios transversais.

Zarifneshad *et al* (2012) realizaram ensaio utilizando dispositivo pendular para coletar dados de entrada para inserir em rede neural artificial (RNA) com o intuito de que esta RNA consiga realizar predições de dano. O volume do dano no fruto foi o parâmetro comparado e os critérios avaliam a rede neural. O YADE não possui alguma função que avalie o volume de dano e os critérios de avaliação utilizados são voltados para o RNA, não sendo possível a aplicação neste estudo.

ZHU 2016 utilizou imagens hiper-espectrais e modelo de mínimos quadrados para prever a suscetibilidade ao dano, gerado com a auxílio de um pendulo invertido, em maçãs. O volume do dano foi utilizado para comparação e a predição obtida teve valores razoáveis. O bom nível de predição se deu principalmente pela grande quantidade de dados para calibração. A utilização de imagem é uma possibilidade para coleta de parâmetros para este estudo.

Van Zeebroeck (2006) realizou predição de dano utilizando o método dos elementos discretos. Em sua investigação, a profundidade do dano no produto foi com a profundidade de dano simulada em DEM, obtendo predições razoáveis de acordo com as necessidades do trabalho.

A utilização da profundidade de dano para validação da predição é uma alternativa para este trabalho, uma vez que a plataforma YADE permite coleta de dados de deformação ocorridos durante a simulação.

2.4. PLATAFORMA YADE.

Para a simulação computacional, a plataforma escolhida é o YADE versão 1.20.0, um software de plataforma livre construído em linguagem c++ que trabalha utilizando linguagem Python para construção do algoritmo, controle da simulação e para pós-processamento (YADE).

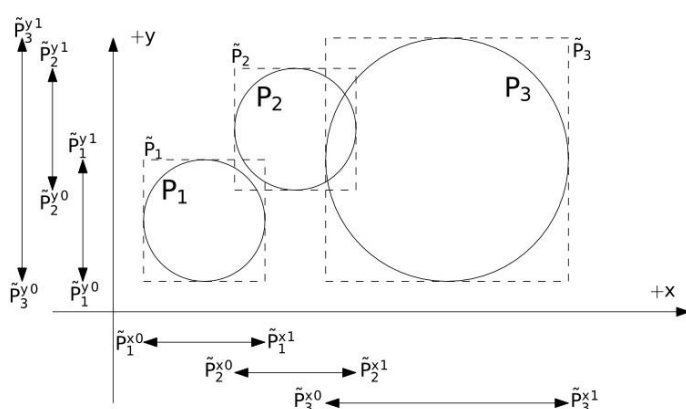
Para realizar a simulação no programa computacional alguns elementos básicos necessitam ser definidos no algoritmo como a geometria dos corpos estudado, os tipos de interações que irão ocorrer, o material dos corpos envolvidos, o modelo de contato que se deseja utilizar e o incremento do tempo a ser utilizado pelo programa.

Outras funções do YADE incluem a utilização de aceleração que representa a aceleração da gravidade, a capacidade de exibir gráficos com curvas da energia envolvida no processo simulado. Também é possível importar corpos gerados em softwares parametrizados de desenho e exportar dados de força e deslocamento obtidos na simulação para posterior análise.

Durante a simulação, com as definições básicas são estabelecidas, o YADE primeiramente procura possíveis colisões entre partículas e uma vez encontrada, os modelos são aplicados e o processo de iterações do cálculo de deformações, velocidades, acelerações e forças envolvidas e de seus valores se inicia utilizando o incremento de tempo para determinar o intervalo entre as iterações.

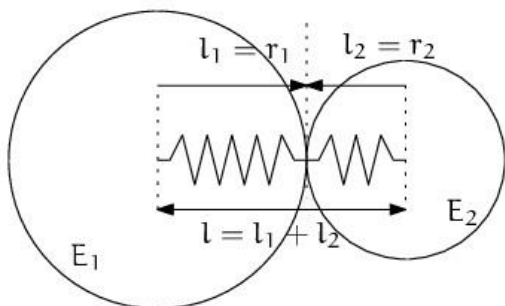
No processo de determinação das colisões o programa gera uma geometria em torno da geometria declarada no algoritmo (Figura 5) que é utilizada neste processo. Caso uma possível colisão seja identificada, a geometria declarada é utilizada e os cálculos de iteração se iniciam.

Figura 5. Método de detecção de colisões utilizado pelo YADE



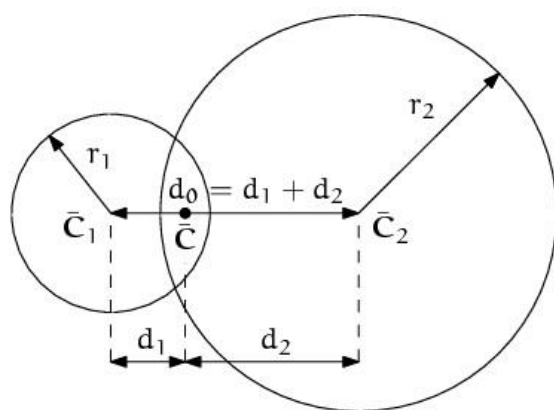
Uma vez determinada a colisão, o YADE aplica um modelo de força de contato em cada objeto envolvido representando o comportamento de cada objeto. No caso de duas esferas em contato, é aplicado o modelo de força de contato para cada esfera (Figura 6).

Figura 6. Contato de duas esferas rígidas.



Os corpos criados pelo YADE são indeformáveis. Quaisquer deformações que venham a ocorrer no material real são observadas na simulação através da sobreposição dos corpos (ou “overlap”), como apresentado na (Figura 7).

Figura 7. Sobreposição dos corpos indeformáveis.



Devido ao YADE ser uma plataforma livre que trabalha com MED e permite o estudo da deformação ocorrida corpos simulados, é a plataforma selecionada para ser utilizada neste trabalho.

3. METODOLOGIA

3.1. MATERIAL

Para avaliação o comportamento de frutos esféricos acondicionados em caixa de madeira utilizou-se frutos íntegros de pessegueiro no ensaio experimental. A escolha do produto é justificada devido à necessidade de um fruto com mesocarpo (polpa) espesso, de forma que a resposta dos outros componentes, perante a solicitação mecânica, seja desprezível.

Os frutos utilizados nos ensaios laboratoriais e para obtenção dos parâmetros necessários para simulação foram da cultivar BRS Rubimel, calibre 4 (diâmetro maior que 56 até 61mm).

Frutos, em geral, possuem algumas características particulares como:

- São compostos por varias camadas, epicarpo, mesocarpo e endocarpo. Essas camadas possuem cada uma delas um material diferente.
- Possuem geometria irregular.
- Por ser material biológico, ou seja, um material vivo que se desenvolve, cada fruto possui uma estrutura de material única, que difere entre as camadas do fruto e entre frutos da mesma espécie. Assim, um caqui (*Diospyros kaki*), por exemplo, terá uma estrutura de material diferente que qualquer outro caqui, o que reduz a possibilidade de repetibilidade.

A utilização de todas estas características na simulação tornaria o trabalho muito complexo e demandaria muito tempo. Para evitar deste problema, serão utilizadas esferas maciças, compostas por um único material, mesocarpo do pêssogo, com as características mecânicas (parâmetros) do produto na simulação.

3.2. PROPOSTA DE MODELO

O modelo deve descrever as forças normais e tangenciais conforme ilustrado na Figura 2. Como se pretende trabalhar com forças normais, com baixas acelerações e baixas amplitudes, assumiu-se que as forças tangenciais não serão representativas e não necessitam de um modelo exclusivo, sendo possível a utilização do mesmo modelo aplicado para as forças na direção normal.

Para observar a resposta e orientar a escolha do modelo, um ensaio de compressão cíclica foi realizado em um fruto de pessegueiro utilizando como entrada ciclos de força variando de 0 - 8N. A taxa de deformação constante utilizada foi $0,6\text{m.s}^{-1}$ realizando-se por 10 minutos. A resposta do ensaio e o comportamento dos modelos são apresentados na seção 4.1.

Através do ensaio preliminar realizado, o modelo de Burguer demonstrou ser o que melhor descreve o comportamento do fruto. Contudo, o Yade ainda não possui o modelo em sua biblioteca e a resolução do modelo possui peculiaridades de impediram a implementação do modelo no programa tendo em vista o período de tempo disponível. Assim, será utilizado o modelo de Kelvin-Voigt, nas direções normais e tangenciais.

3.3. DETERMINAÇÃO DAS ENTRADAS DA SIMULAÇÃO

3.3.1 – Determinação dos parâmetros do modelo

Para determinação dos parâmetros do fruto realizou-se ensaio de fluência em um espécime cilíndrico de polpa de pêssego com 12mm de altura por 10mm de diâmetro utilizando 2,5N de força. Os dados obtidos do ensaio foram utilizados de entrada no software MATLAB®, juntamente com a equação do modelo encontrada em Mohsenin (1986), onde se determinaram os valores de k e c através do ajuste de curvas.

Após a coleta dos parâmetros k e c , estes valores foram utilizados como dados de entrada no YADE, onde simulou-se um ensaio de fluência. Para calibração, comparou-se a curva de fluência obtida no software YADE com a curva construída no MATLAB® com os dados do ensaio. Os valores de entrada do YADE foram corrigidos até os softwares apresentarem curvas com erros dentro do aceitável. Os resultados obtidos são apresentados na seção 4.2.

Em comparação ao fruto, o material da caixa é muito rígido e, portando, seu comportamento pode ser considerado puramente rígido. Para obter os parâmetros do material da caixa foi realizado ensaio uniaxial utilizando-se de espécime, da mesma madeira da caixa, de 27,5 x 10,75 x 8,4 mm.

3.3.2 – Determinação da densidade

Com o auxílio de um béquer com escala milimétrica preenchido por água, onde o volume de água deslocado pelo pêssego no béquer foi medido e os valores de massa de cada pêssego calculou-se a densidade para cada pêssego e determinou-se a densidade média.

Para determinação da densidade da madeira da caixa, utilizou-se do mesmo espécime utilizado na definição dos parâmetros do modelo de força, medindo o volume e pesando o mesmo.

3.3.3 – Determinação do coeficiente de atrito

O dispositivo utilizado na especificação do coeficiente de atrito do fruto consiste de uma estrutura retangular de 200mm de comprimento, 180mm de largura e 60mm de altura, suportada por rolamentos apoiados em uma segunda estrutura retangular de 200mm de comprimento, 180mm de largura e 65mm de altura. Ambas as estruturas compostas por acrílico (Figura 8).

Figura 8. Equipamento para determinação do coeficiente de atrito.



Com as duas estruturas retangulares preenchidas com os pêssegos e adição de massa no recipiente na extremidade do cabo determinou-se a força necessária para movimentação do produto dentro das estruturas de acrílico. Mediu-se a massa adicionada no recipiente e a massa dos pêssegos. Baseando-se na Lei de Coulomb especificou-se o coeficiente de atrito, utilizando-se dos dados obtidos.

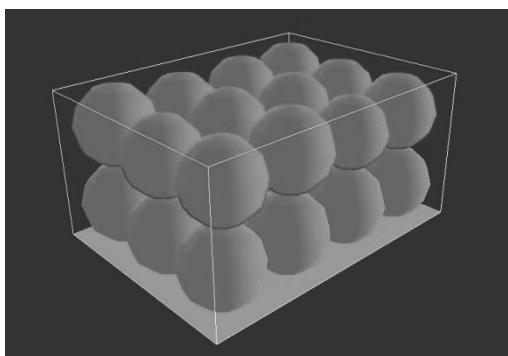
Estabeleceu-se o valor do coeficiente de atrito da madeira através de tabela de caracterização, utilizando a densidade e o coeficiente de rigidez como entrada.

3.4. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Utilizando o software realizou-se a simulação do comportamento de frutos a granel, acondicionados em caixa de madeira e solicitados ciclicamente.

O arranjo dos frutos, representado por esferas, Figura 9, é composto por caixa contendo 24 esferas dispostos em duas camadas, simétricas, de 12 esferas cada.

Figura 9. Arranjo das esferas na caixa.



3.4.1. Características da caixa

Criou-se a caixa para simulação com as características de uma caixa de madeira utilizada em pós-colheita. Para descrever o comportamento deste material na simulação necessitou-se conhecer as características do material, a saber: coeficiente de rigidez normal; densidade do material e coeficiente de atrito seco. Os parâmetros determinados foram o coeficiente de rigidez normal = 9840 kg.s^{-2} , densidade do material = $514,18 \text{ kg.m}^{-3}$ e coeficiente de atrito seco = 0,837.

Construiu-se a geometria da caixa através de composição e união de faces descritas no próprio algoritmo.

3.4.2. Características das esferas

As esferas utilizadas representaram os frutos durante a simulação. Cada esfera ocupou uma posição específica dentro da caixa e através da média dos diâmetros dos pêssegos que ocuparam aquela posição em cada variante do ensaio laboratorial, determinou-se o diâmetro das esferas. Os dados utilizados na simulação foram diâmetro das esferas variável de acordo com o diâmetro do pêssego utilizado no ensaio experimental, coeficiente de rigidez normal = 1044 kg.s^{-2} , coeficiente de amortecimento = 38750 kg.s^{-1} , densidade do pêssego = 132 kg.m^{-3} e coeficiente de atrito seco = 0,512.

3.4.3. Solicitação mecânica do conjunto

Solicitou-se ciclicamente o conjunto caixa-esferas na direção vertical, através de um sinal senoidal. A utilização deste estímulo pode ser justificada pelos seguintes fatores:

- É o estímulo predominante no qual os frutos estão sujeitos no processo de transporte;
- Facilita a comparação entre simulado e real;
- A utilização de um sinal de entrada mais complexo não traz benefícios para a validação do modelo.

Estimulou-se o conjunto com três números de ciclos diferentes, a saber, 43.200, 64.800 e 86.400 ciclos. Para utilizar números de ciclos variados fixou-se a frequência e variou-se o tempo de aplicação do estímulo. Decidiu-se fixar o valor de frequência uma vez que este parâmetro está diretamente relacionado com a taxa de deformação aplicada no produto e, portanto, a resposta do componente viscoso.

Utilizou-se o comando *HarmonicMotionEngine* da plataforma YADE para descrever o estímulo senoidal no conjunto, baseado em valores fornecidos de amplitude frequência e ângulo de fase. Empregou-se 1mm de amplitude, frequência de 12Hz e valores de tempo de 60, 90 e 120 mim (t60, t90 e t120, respectivamente). Esse valor de frequência foi escolhido porque na maioria dos trabalhos encontrados utilizaram solicitação cíclica em frutos com valores de frequência entre 4Hz a 15Hz (HINSCH *et al*, 1993; SLAUGHTER; HINSCH; THOMPSON, 1993; TIMM *et al*, 1998;).

3.5. ENSAIO DE VALIDAÇÃO

Realizou-se a validação utilizando-se de uma mesa vibratória com amplitude constante e frequência variável. Posicionou-se e fixou-se a caixa com os frutos na mesa, de modo que a vibração da caixa fosse solidária a vibração da mesa. A Figura 10 apresenta a mesa vibratória utilizada no ensaio.

Figura 10. Mesa vibratória com caixa de frutos.



Para estabelecer o valor de frequência pretendido ao ensaio, utilizou-se inversor de frequência WEG CFW08.

Organizaram-se os frutos na caixa no mesmo arranjo apresentado na Figura 9, e desenhou-se em cada fruto uma linha no topo do produto, no sentido longitudinal da caixa (Figura 11), representando um plano vertical que passava pelo centro do fruto, com a finalidade de determinar o posicionamento inicial do fruto e assim visualizar rotações no fruto, caso ocorram. No total utilizou-se 24 frutos por ensaio, divididos em duas camadas de 12 pêssegos.

Figura 11. Frutos com marcações pré-ensaio.



A Figura 12 apresenta a caixa com os frutos antes e após o ensaio, sendo possível perceber que a rotação ocorreu somente em alguns frutos e foi pequena o suficiente para ser desprezada.

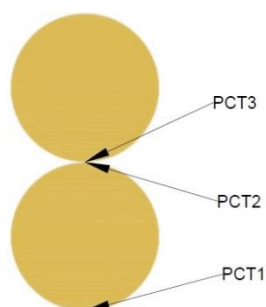
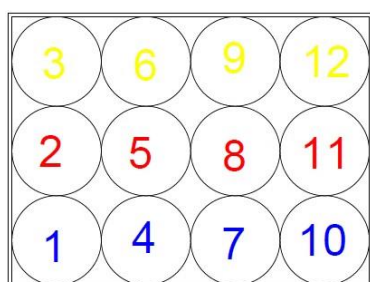
Figura 12. Rotação nos frutos, antes (esquerda) e após (direita) ensaio.



Os ensaios foram realizados com 1mm de amplitude, 12Hz e tempos de 60min, 90min e 120 min. Para cada tempo foi realizada triplicata.

Após o ensaio, numeraram-se os frutos de acordo com a camada, camada 1 (inferior) e camada 2 (superior) e a posição do fruto na camada (Figura 13) para facilitar a medição. Esperou-se 24hs para realizam da medição a fim de visualizar a liberação das enzimas e facilitar o processo de medição.

Figura 13. Numeração dos frutos e pontos de contato analisados.

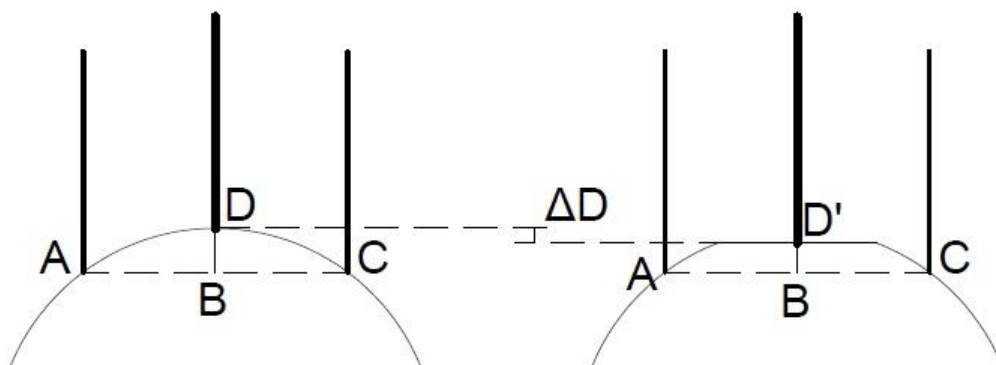


Na direção vertical existem três pontos de contato que serão avaliados, sendo PCT1 o ponto de contato sujeito à massa das duas camadas, PCT2 o ponto de contato sujeito à massa de uma das camadas e PCT3 o ponto de contato da camada superior (Figura 13).

— Medida de dano

Os trabalhos encontrados em literatura não apresentavam uma medida mecânica de medição da deformação de forma não destrutiva. Desta forma o trabalho propôs uma metodologia para medição na deformação baseado na metodologia de Mohsenin (1986) para determinação do raio de curvatura. Mohsenin (1986) propõe que utilizando um relógio comparador e hastes fixas igualmente distantes da haste do relógio e conhecendo essas distâncias (pontos A, B e C da Figura 14) e tendo somente a medida do relógio comparador como variável (ponto D da Figura 14) é possível determinar o raio de curvatura do produto. O trabalho realizado propõe que realizando está medida no ponto de contato pré-dano e pós-dano (pontos D e D' da Figura 14), através da diferença das medidas é possível determinar a deformação do fruto (ΔD na Figura 14).

Figura 14. Pontos no produto.



O dispositivo de medição foi montado na própria Faculdade de Engenharia Agrícola da UNICAMP (Figura 15).

Figura 15. Dispositivo para medir deformação (esquerda) e detalhe com fruto (direita).



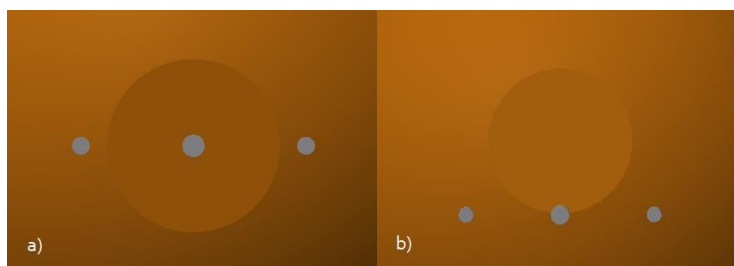
O dispositivo possui um ajuste fino com marcação do ponto de origem e um ajuste de base, menos preciso. Com o ajuste de base é possível fixar a posição do ensaio para um específico fruto, sendo que o ajuste fino permite a movimentação do relógio comparador mantendo a posição inicial conhecida.

A grande dificuldade do método está em realizar a medida pré-dano sem conhecer o ponto de contato. A fim de superar o problema, conduziu-se um estudo de variação de diâmetro de 45 pêssegos selecionados aleatoriamente onde se aferiu o diâmetro de cada produto na região do equador, desconsiderando a região da sutura, sendo realizadas três medidas espaçadas 10mm entre si e determinou-se o coeficiente de variação do diâmetro do produto da amostra.

A metodologia proposta para coleta de dados experimentais demonstra que depende da qualidade do produto a ser utilizado no trabalho para que os dados coletados possam ser confiáveis. Pode ser considerada uma metodologia não destrutiva, pois não necessita cortar ou destruir a amostra. Todavia cada amostra só pode ser utilizada uma única vez.

O valor médio dos diâmetros encontrado foi de 59,11mm e valor médio obtido de variação de diâmetro foi 3%, o que pode ser considerado como uma variação pequena e dessa forma assumiu-se que o valor do diâmetro no exato local do ponto de contato é idêntico ao valor do diâmetro na borda da região deformada devido à excitação cíclica. Assim, coletaram-se medidas no centro da área deformada, medida de pós-dano (Figura 16a) e medida na borda da região deformada, equivalente à medida de pré-dano (Figura 16b). A diferença do valor entre essas medidas forneceu os dados de deformação do produto proveniente do ensaio.

Figura 16. Pontos de medida da deformação



Realizou-se a validação da simulação comparando os dados de deformação da simulação com os dados de simulação do ensaio.

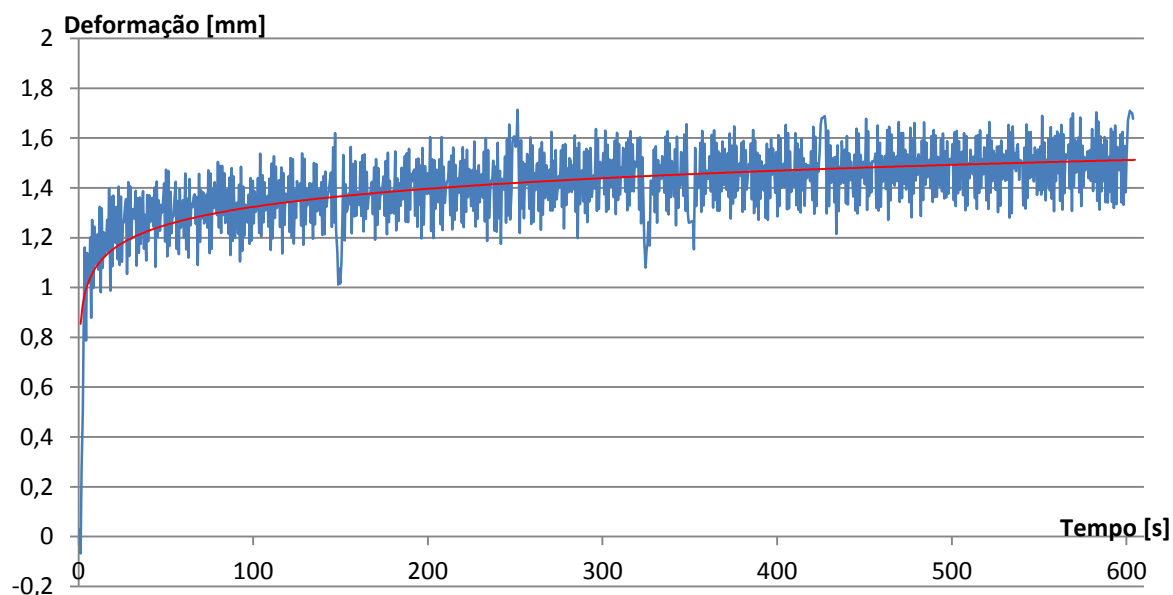
4. RESULTADOS

Os valores de deformação são apresentados com unidades de milímetro [mm] ao invés de serem expressos em deformação específica [mm/mm], pois devido aos diâmetros dos pêssegos serem semelhantes, as tendências das respostas também seriam semelhantes.

4.1 ENSAIO PRELIMINAR

A resposta de deformação do produto obtida no ensaio será referência na comparação com as respostas de deformação dos potenciais modelos. O comportamento de deformação do fruto ou deslocamento do ponto de contato é apresentado na Figura 17.

Figura 17. Resposta de deformação obtida em ensaio de compressão cíclica.

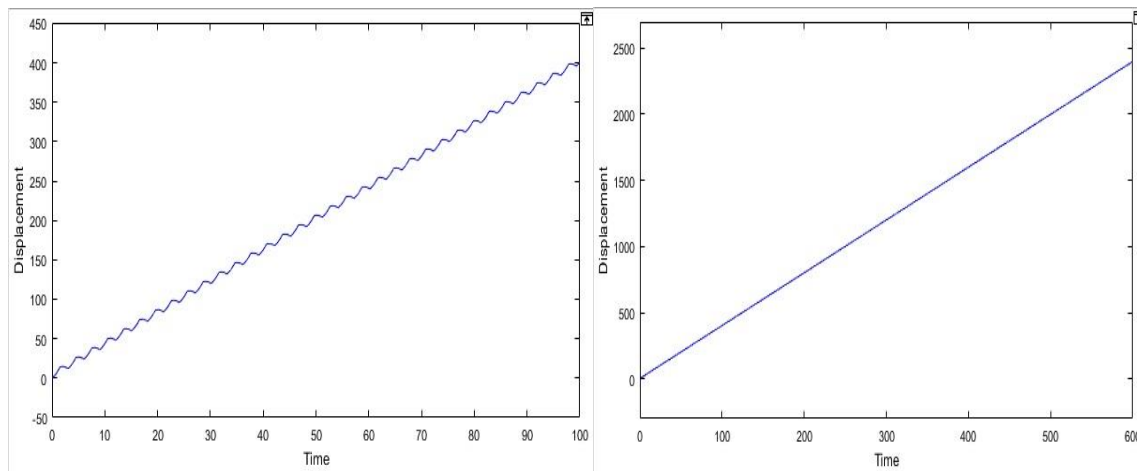


A figura mostra que no primeiro ciclo ocorreu a maior deformação e, em seguida, é possível visualizar uma acomodação do material e após essa acomodação, a deformação exibi crescimento monotônico. Analisando a curva de tendência (curva vermelha) é possível perceber um comportamento assintótico.

Usando a mesma entrada e as mesmas condições de contorno, foram investigados os comportamentos dos modelos de força de contato citados em 2.2.

Para o modelo de Maxwell, a resposta de deformação obtida para valores unitários dos parâmetros é exibida na Figura 18.

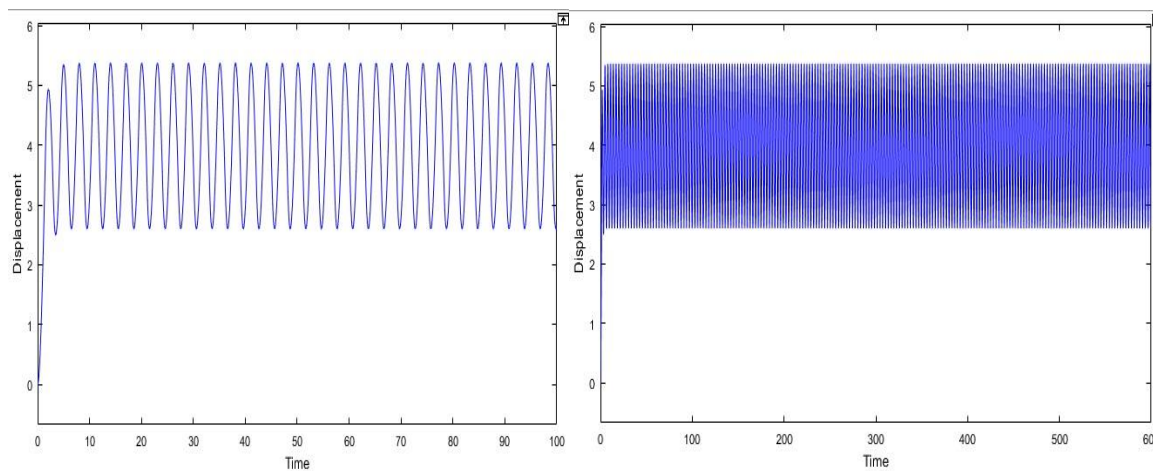
Figura 18. Resposta do modelo Maxwell a uma solicitação cíclica de força durante 100s (esquerda) e durante 600s (direita).



A curva obtida na resposta do modelo Maxwell apresenta uma tendência linear crescente, diferente da resposta do fruto que apresenta uma tendência assintótica. Também não é possível visualizar uma grande deformação inicial, como no comportamento do fruto. Desta forma, o modelo de Maxwell não demonstra ser adequado para representar o comportamento do fruto.

O comportamento do modelo de Kelvin-Voigt pode ser observado na Figura 19.

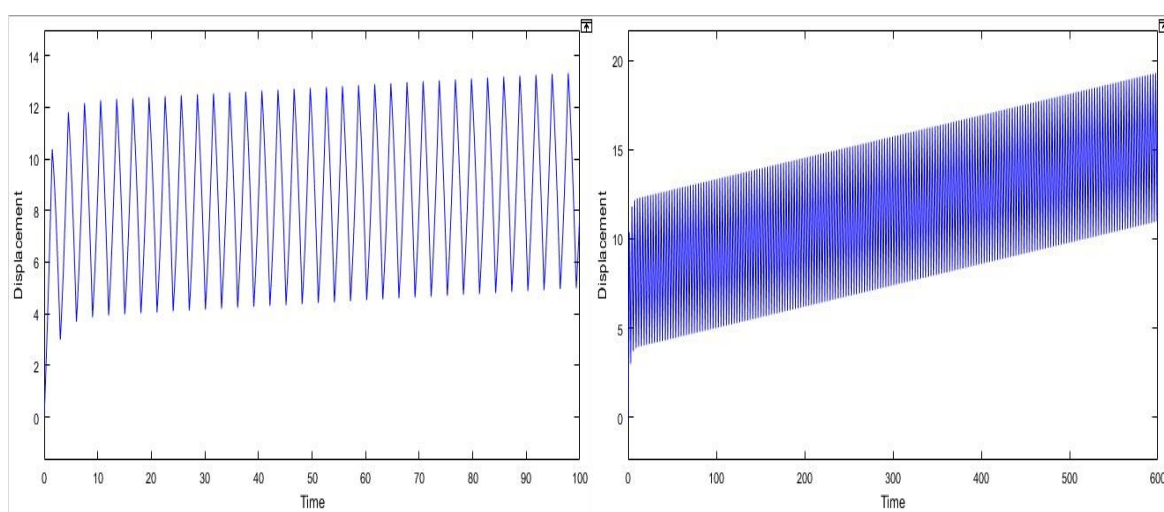
Figura 19. Resposta do modelo Kelvin-Voigt a uma solicitação cíclica de força durante 100s (esquerda) e durante 600s (direita).



A resposta do modelo apresenta uma resposta de deformação inicial grande e uma acomodação da deformação, tal qual no fruto. Porém, após a acomodação a

deformação nos ciclos não cresce, permanecendo constante, ou seja, não exibe comportamento assintótico. Porém, pensando em frutos transportados, o período de tempo em que estes são submetidos à vibração é muito maior que o analisado, sendo que existe a possibilidade de que este modelo possa representar o comportamento do fruto em períodos de tempo maiores. O modelo não aparenta ser ideal para representar o fruto, contudo, ainda não será descartado. A resposta do modelo de Burgers é apresentada na Figura 20.

Figura 20. Resposta do modelo Burguer a uma solicitação cíclica de força durante 100s (esquerda) e durante 600s (direita).



Analisando a curva do comportamento do modelo nota-se uma grande deformação inicial seguida de uma acomodação e a deformação alcançada nos próximos ciclos cresce a uma taxa constante. A resposta do modelo até $t=100$ apresenta o comportamento mais próximo ao comportamento do fruto obtido até o momento. Todavia a curva do modelo Burguer para $t=600$ não consegue representar o comportamento do fruto. Os ensaios preliminares não foram realizados aplicando os parâmetros reais nos modelos, assim o modelo de Burguer aparenta ser capaz de descrever a resposta do fruto se aplicado os parâmetros corretos.

Os modelos de Burguer e Kelvin-Voigt tem a capacidade de representar o comportamento inicial do fruto, grande deformação seguida de acomodação, sendo que o modelo de Burguer também representa a taxa de crescimento da deformação após a acomodação demonstrando ser viável para representar o fruto quando este crescimento é evidente, enquanto que o modelo de Kelvin-voigt pode ser capaz de representar o fruto

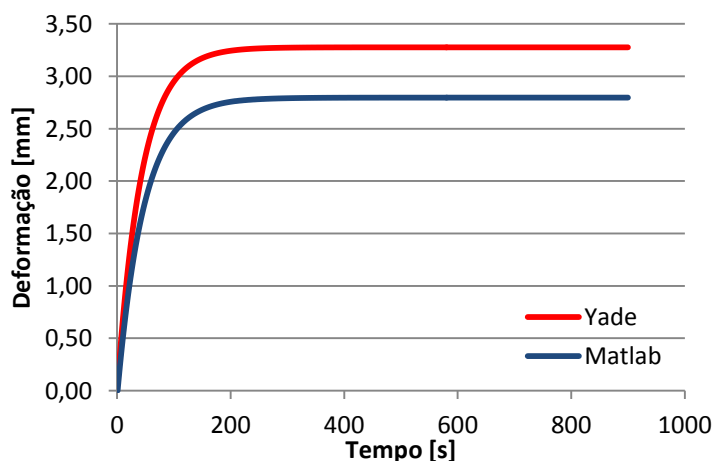
para intervalos de tempo muito grandes, onde o crescimento da deformação é menos evidente que o comportamento assintótico.

4.2 CALIBRAÇÃO DO MODELO

Para calibração, comparou-se a curva de fluência obtida no software YADE com a curva construída no MATLAB® com os dados do ensaio. Ponderando que ensaio de validação utiliza baixas amplitudes e baixas frequências, ou seja, pequenas acelerações e velocidades e como o material é visco-elástico e, portanto, a velocidade influencia na resposta do material, a utilização de impacto, grandes acelerações e velocidades, traria erros na determinação dos parâmetros. Baseados nessas considerações, optou-se pela utilização do ensaio de fluência que pode ser considerado quase estático e aplica pequenas acelerações e velocidades, tal qual a excitação utilizada na validação.

A Figura 21 apresenta a curva de fluência obtida utilizando simulação (Yade) e a curva construída no MATLAB® com os dados do ensaio. Os parâmetros utilizados inicialmente foram $k=894 \text{ kg.s}^{-2}$ e $c=38750 \text{ kg.s}^{-1}$.

Figura 21. Curvas de fluência.



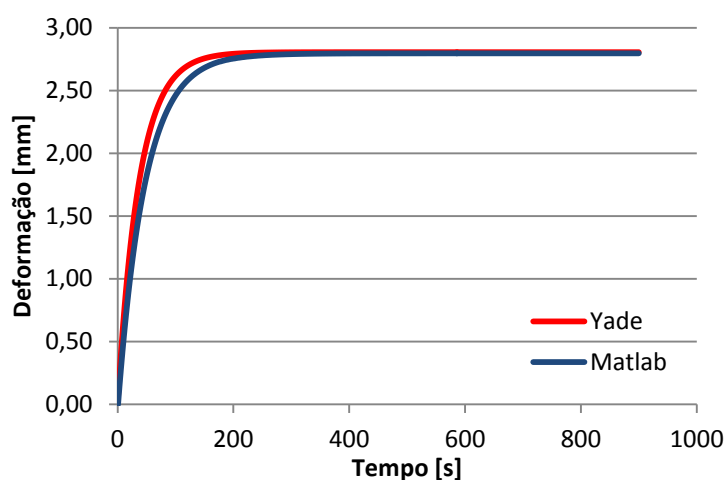
A curva de fluência do Yade e a curva de fluência do MATLAB®, apresentam na região de regime permanente uma diferença de 1mm. Considerando que os valores de deformação no fruto podem estar na casa de décimos de milímetro, as curvas de fluência apresentam um erro considerável.

No estudo do modelo, observou-se que o parâmetro de amortecimento é responsável pelo tempo que o modelo leva para estabilizar e o parâmetro de rigidez determina o valor no qual o modelo estabiliza, conforme o valor de k aumenta o material

alcança o regime permanente em um valor menor. Variando o valor de k no modelo calculado, encontrou-se o incremento necessário e, desta forma, realizou-se uma nova simulação no Yade utilizando $k=1044 \text{ kg.s}^{-2}$.

A Figura 22 apresenta a curva de fluência obtida no Yade com o novo valor de k e a curva calculada com os valores iniciais.

Figura 22. Curvas de fluência.



As curvas obtidas na segunda comparação possuem resultados próximos aceitáveis para utilização do modelo na comparação com o ensaio. Os valores calibrados para os parâmetros são 1044 kg.s^{-2} para o coeficiente de rigidez “ k ” e 38750 kg.s^{-1} para o coeficiente de amortecimento “ c ”.

4.3 VALIDAÇÃO DO MODELO

Para cada posição de contato, nas duas camadas, obteve-se um par de valores de deformação, um deles obtido experimentalmente e o valor obtido pela simulação.

Para cada posição de contato, nas duas camadas, obteve-se um par de valores de deformação, um deles obtido experimentalmente e o valor obtido pela simulação. Primeiramente, são apresentados os resultados para evidenciar quão próximos estão os valores simulados de deformação daqueles obtidos experimentalmente, independentemente da posição ocupada pelas esferas ou pêssegos na caixa. Assim, foram gerados gráficos com os 12 eventos, isto é, 12 pares experimental-simulado, obtidos para cada ponto de contato e para cada intervalo tempo, ordenados em valores crescentes de deformação obtida no ensaio laboratorial. Assim, os valores no eixo das abscissas não tem relação com

a posição dos pêssegos ou esferas na caixa. Dessa forma, os resultados para o ponto PCT1, para os intervalos de tempo de 60, 90 e 120 min, t_{60} , t_{90} e t_{120} , respectivamente, são mostrados nas Figuras 23 a 25.

Figura 23. Deformação no ponto de contato entre fruto e fundo da caixa para 43.200 ciclos (PCT1 e t_{60}).

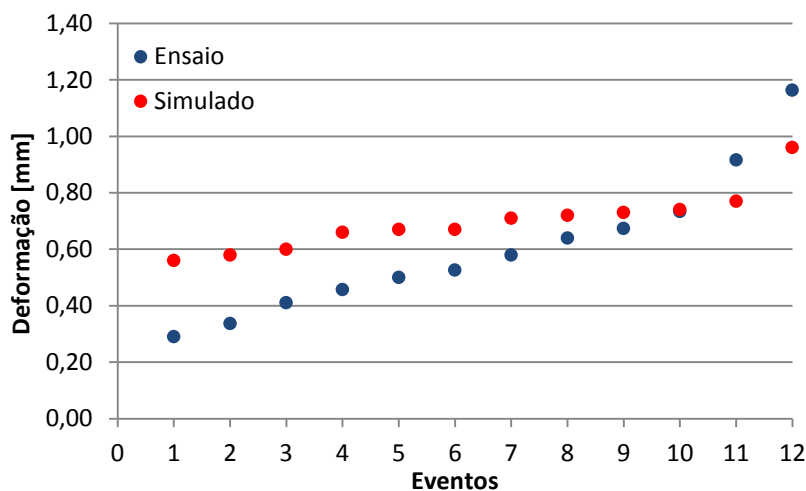


Figura 24. Deformação no ponto de contato entre fruto e fundo da caixa para 64.800 ciclos (PCT1 e t_{90}).

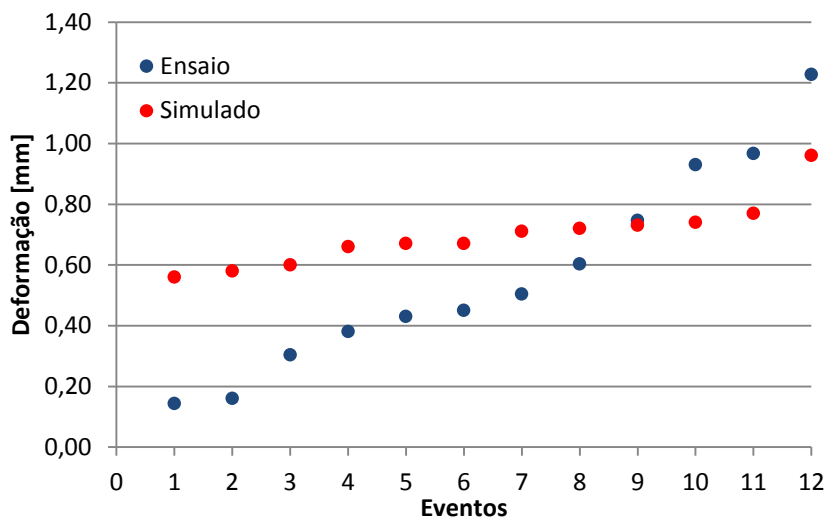
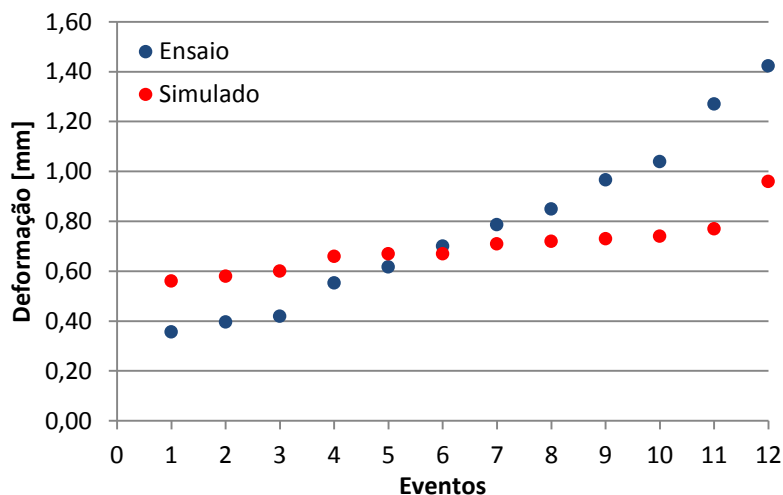


Figura 25. Deformação no ponto de contato entre fruto e fundo da caixa para 86.400 ciclos (PCT1 e t120).



Os valores de deformação para PCT1, tanto experimentais como simulados, apresentaram a mesma ordem de grandeza. Em t60 os valores experimentais de deformação variaram de 0,29mm a 1,16mm, em t90 de 0,14mm a 1,23mm e em t120 de 0,36mm a 1,42mm enquanto que na simulação essa variação foi à mesma, de 0,56mm a 0,96mm, para todos os intervalos de tempo considerados.

Nos pares que apresentaram os menores valores de deformação, eventos 0 a 6, a maior diferença entre o ensaio e simulado ocorreu para t90, foi de 0,42mm e para as maiores deformações, eventos de 7 a 12, a maior diferença, de 0,5mm, ocorreu em t120. Como a maior diferença obtida entre eles foi de 0,5mm e, considerando o diâmetro médio dos pêssegos da amostra de 59,11mm, essa diferença corresponde a 0,84% do diâmetro mostrando-se pequena e evidenciando que os valores de deformação preditos pelo modelo escolhido representou de maneira satisfatória os valores obtidos no ensaio para o PCT1. Enfatiza-se que diferenças percentuais nessa ordem de grandeza são irrelevantes quando se considera um material biológico e sua variabilidade intrínseca.

As Figuras 26,27 e 28 apresentam, semelhantemente os resultados para PCT2.

Figura 26. Deformação no ponto de contato superior de pêssegos da camada base para 43.200 ciclos (PCT2 e t60).

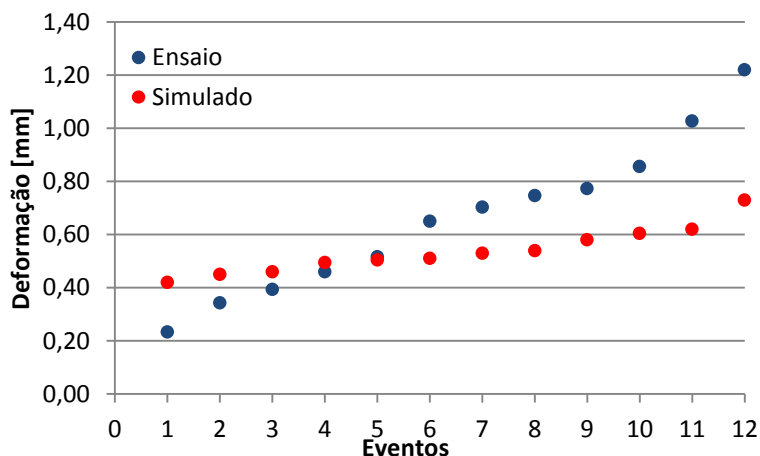


Figura 27. Deformação no ponto de contato superior de pêssegos da camada base para 64.800 ciclos (PCT2 e t90).

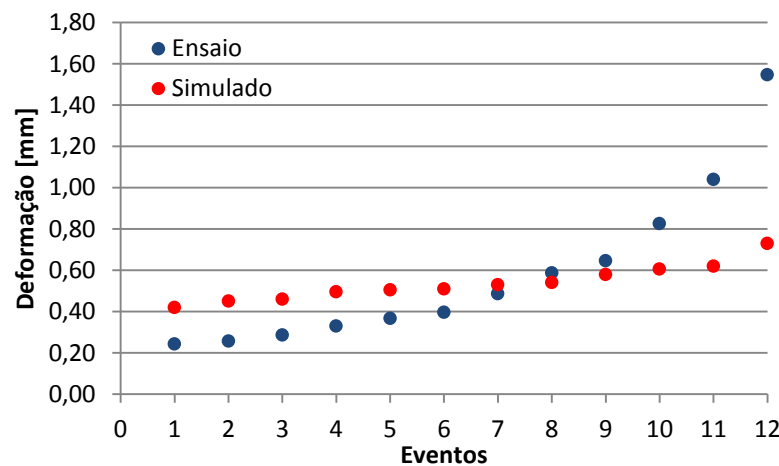
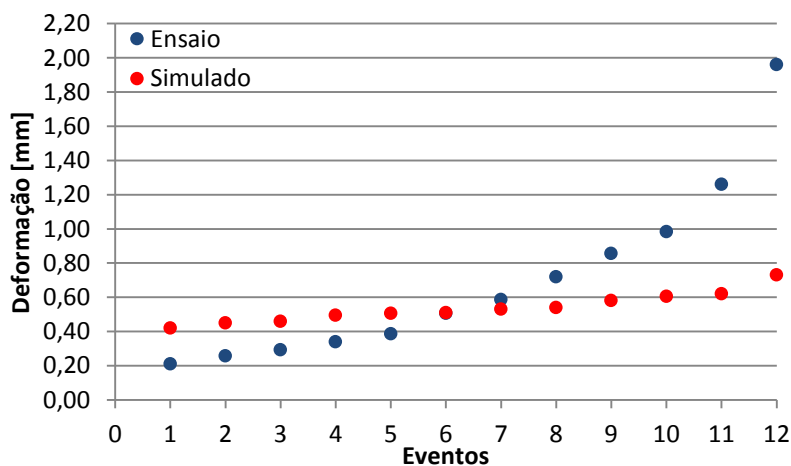


Figura 28. Deformação no ponto de contato superior de pêssegos da camada base para 86.400 ciclos (PCT2 e t120).



Neste caso os valores de ensaio variaram em t60 de 0,23mm a 1,22mm, em t90 de 0,24mm a 1,55mm e em t120 de 0,21mm a 1,96mm. No simulado obteve-se variação de 0,42mm a 0,73mm. Nos menores valores de deformação, a maior diferença foi de 0,21mm, dessa forma é possível considerar que para os menores valores o simulado conseguiu reproduzir o comportamento do ensaio. Analisando os eventos de 7 a 12, três pontos obtiveram diferenças maiores que 0,59mm (0,82mm em t90, 0,64mm e 1,23mm em t120) ultrapassando 1% do diâmetro médio e pode ser considerado erro, porem ainda é menor que a variação de 3% do diâmetro da amostra. O PCT2 apresentou maiores diferença nos eventos 7 a 12 em relação ao PCT1, todavia, os eventos 0 a 6 tiveram valores mais próximos em PCT2 se comparado com PCT1 e considerando que somente três pontos ultrapassaram 1% do diâmetro, pode-se dizer o modelo conseguiu predizer de maneira satisfatória os ensaios em PCT2.

Finalmente, para a camada superior, os resultados das deformações são mostrados nas Figuras 29,30 e 31.

Figura 29. Deformação no ponto de contato do pêssgo da camada superior para 43.200 ciclos (PCT3 e t60).

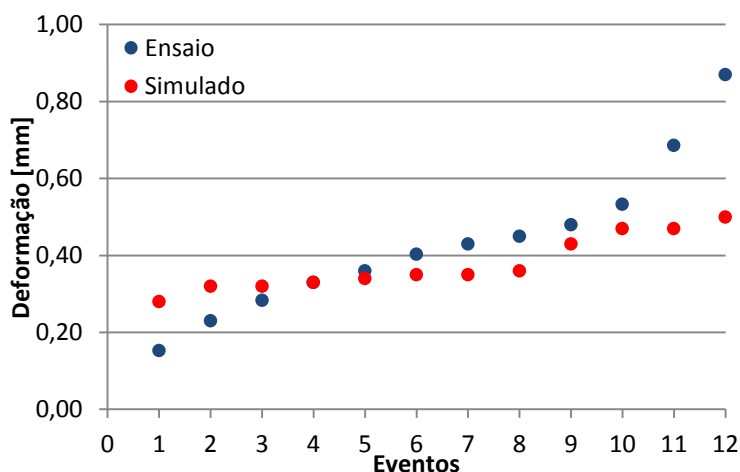


Figura 30. Deformação no ponto de contato do pêssgo da camada superior para 64.800 ciclos (PCT3 e t90).

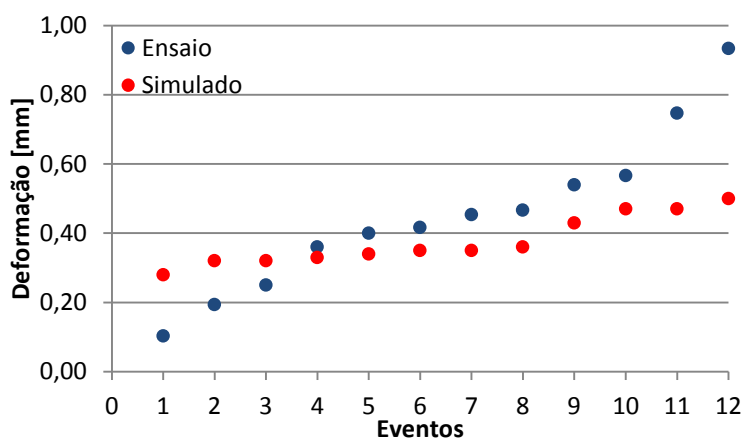
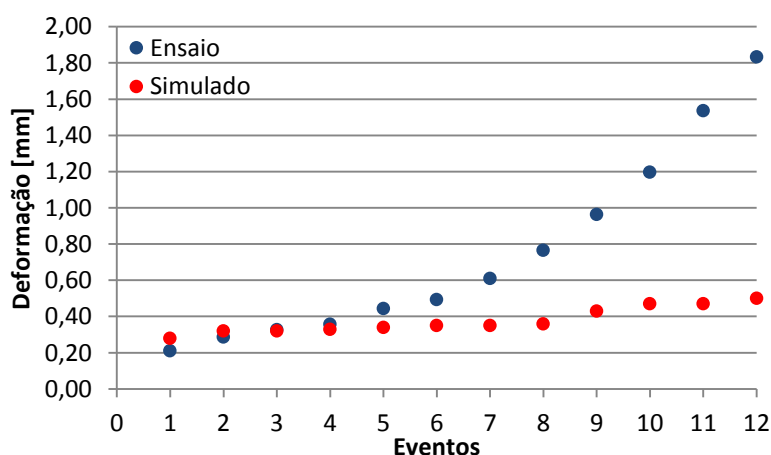


Figura 31. Deformação no ponto de contato do pêssgo da camada superior para 86.400 ciclos (PCT3 e t120).



Em PCT3 os valores obtidos no ensaio variaram de 0,15mm a 0,87mm em t60, de 0,10mm a 0,93mm em t90, de 0,21mm a 1,83mm em t120 e, na simulação, de 0,28mm a 0,5mm. Assim como PCT2, em PCT3, para os eventos 0 a 6 o modelo previu o comportamento observado experimentalmente de maneira satisfatória, uma vez que o valor da maior diferença entre ensaio e simulado foi de 0,18mm. Para os eventos de 7 a 12, em t60 e t90, não houve diferenças entre ensaio e simulado maiores que 0,5mm, porem, em t120, as diferenças nos eventos 10 a 12 alcançaram a faixa de 1% a 2,5% do diâmetro médio (0,73mm, 1,07mm e 1,33mm), porem são menores que a variação do diâmetro, ou seja, são diferenças pequenas considerando que para materiais biológicos variações de 15% a 25% são consideradas aceitáveis. Desta forma, assim como os pontos anteriores, o modelo conseguiu reproduzir adequadamente a resposta de deformação atingida no ensaio.

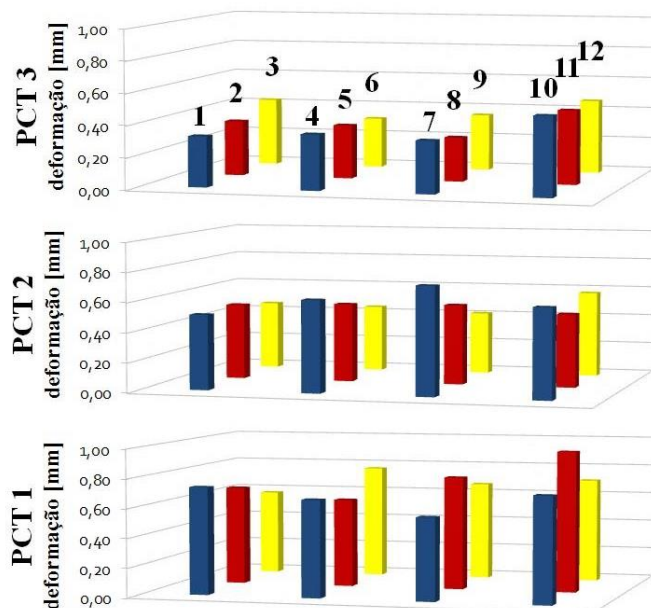
Considerando os eventos das Figuras 4 a 12 é possível afirmar que 67,6% apresentaram diferença nos valores de deformação entre experimental e simulado de até 0,2mm, valor considerado dentro do aceitável uma vez que dificilmente serão percebidos danos em frutos com deformações nessa ordem de grandeza. Isto somado as variações naturais do material biológico, nesse caso a polpa do pêssego, leva a conclusão de que a simulação, no geral, obteve um bom resultado, com valores dentro do esperado e próximos aos valores de deformação do ensaio, validando o modelo.

Estipulando diferenças entre os valores de deformação do ensaio e do simulado maiores que 0,2mm como subestimadas e superestimadas, o modelo linear utilizado apresentou, de modo geral, o modelo superestimou 9,3% dos eventos e subestimou 23% dos eventos, sendo que o evento 12 da Figura 12 foi subestimado em 72,7% ou 1,33mm. Em nível de comparação, Van Zeebroeck (2007), utilizou o modelo de Kuwabara-Kono, mais complexo, e obteve valores superestimados em 2,5mm, o que equivale a variações de 100 a 300%.

Considerando que o modelo é um preditor adequado, apresenta-se a seguir a distribuição espacial das deformações, isto é, considerando a posição das esferas e pêssegos dentro da caixa, para o tempo de 7200s.

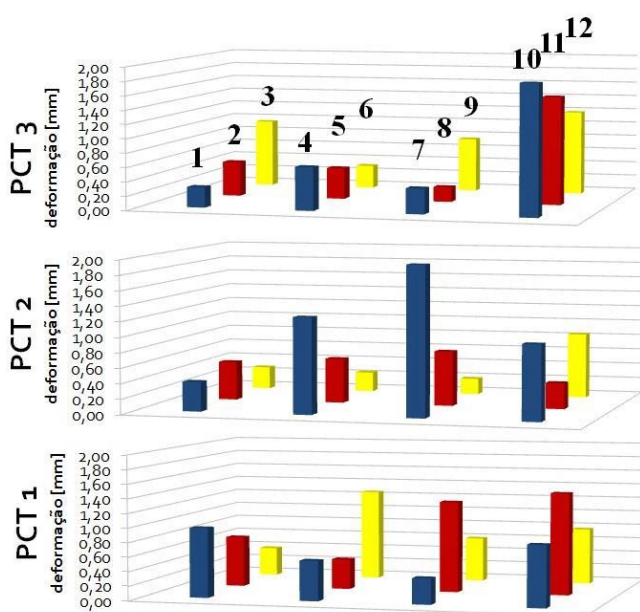
Devido as diferentes solicitações nos os pontos de contato considerados, espera-se que PCT1 apresente as maiores deformações por estar sujeito à massa das duas camadas de frutos; PCT2 valores menores devido à solicitação de uma única camada e, finalmente, em PCT3 valores ainda menores devido à movimentação vertical livre da camada superior. Tal expectativa se confirma pelos resultados da simulação, mostrada na Figura 32, que representa o mesmo arranjo mostrado na Figura 13 e numerado de 1 a 12 na Figura 32.

Figura 32. Distribuição das deformações obtidas na simulação para t120.



A Figura 33 apresenta a mesma distribuição espacial da resposta de deformação, porém obtida no ensaio experimental para o mesmo tempo de 7200s. Observa-se que os resultados apresentados nas Figuras 32 e 33 não evidenciaram nenhuma tendência nos valores da deformação quanto às possíveis interações entre pêssegos ou esferas entre si ou com as laterais da caixa. Isto pode ser atribuído à pequena influência das forças horizontais e atrito nos níveis de solicitação utilizados.

Figura 33 Distribuição das deformações obtida no ensaio para t120.



Considerando-se o modelo adequado, analisou-se o comportamento dos frutos do ponto de vista da força resultante nas esferas, na direção de cada eixo e as rotações captadas na simulação. No instante mostrado nas imagens a caixa está mudando a direção do movimento, iniciando o movimento de ascensão decorrente da oscilação vertical. A direção dos eixos na simulação pode ser visualizada na Figura 34 e a resposta de força nas duas camadas no eixo Z, na Figura 35.

Figura 34. Direção dos eixos.

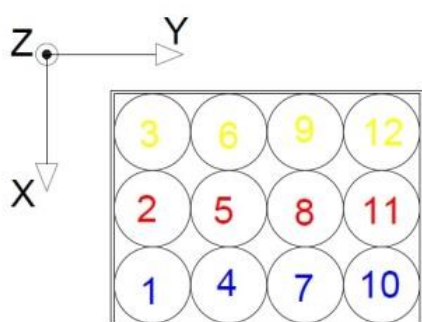
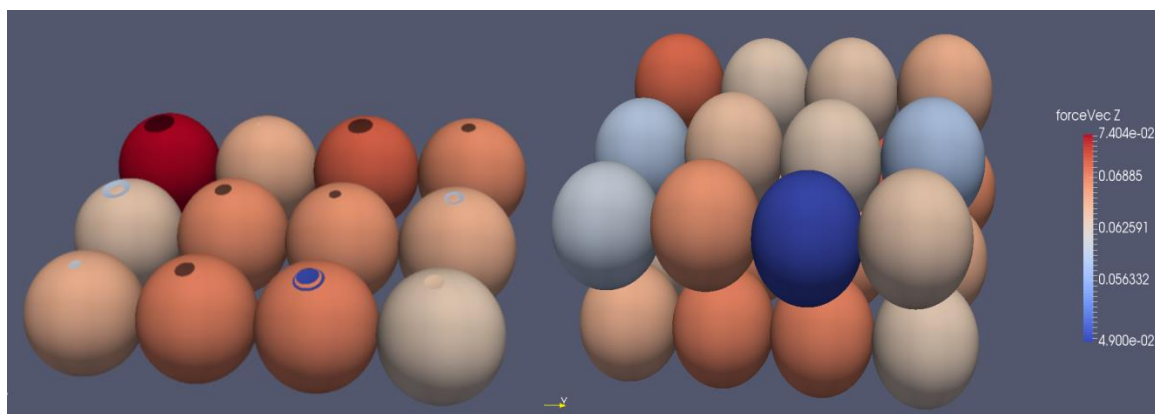
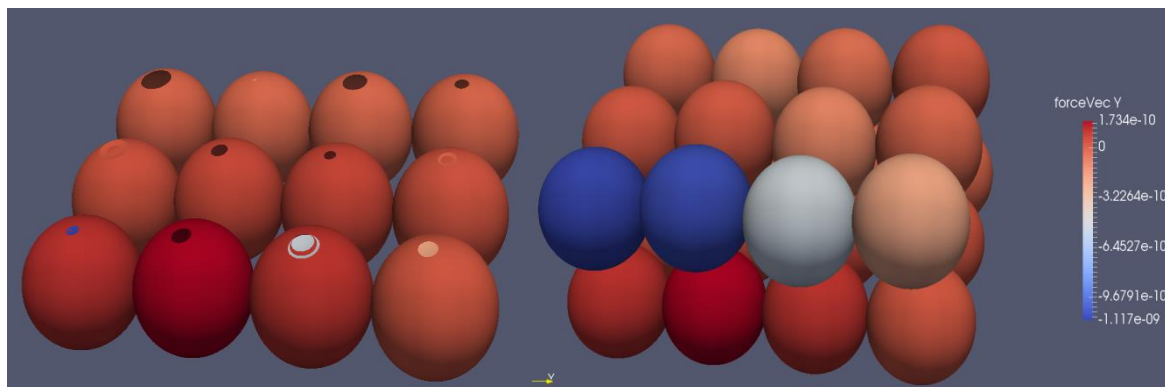


Figura 35. Resposta de força no eixo Z para camada 1 (inferior) e camada 2 (superior)



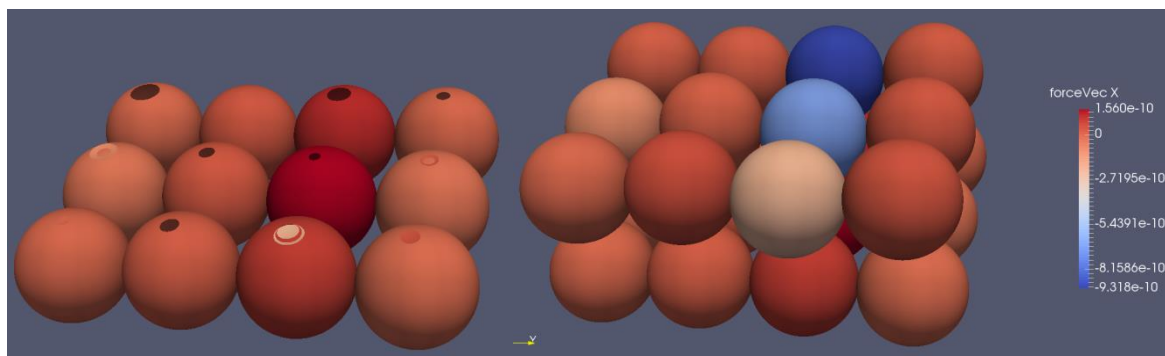
Observando a figura percebe-se que as maiores forças estão localizadas na camada 1 com a maior força na esfera do vértice da caixa e algumas esferas da camada superior quase sem solicitação devido as esferas da camadas superior estarem livres para movimentação vertical. A maioria das esferas receberam força na ordem de 0,06N, valor insuficiente para destruição do fruto. A Figura 36 apresenta os valores de forças para o eixo Y.

Figura 36. Resposta de força no eixo Y para camada 1 (inferior) e camada 2 (superior)



Com exceção de 3 esferas da camada superior, todas as esferas apresentam valores de força semelhantes e positivos em relação ao sentido do eixo. A variação de força nas esferas da camada superior ocorre devido a variação dos diâmetros das esferas que cria contatos desalinhados com o centro de gravidade, gerando forças em sentidos opostos. Os valores de força obtidos neste eixo estão em torno de 1.10^{-10} N, e por isso podem ser considerados desprezíveis. A Figura 37 apresenta os valores de forças para o eixo X.

Figura 37. Resposta de força no eixo X para camada 1 (inferior) e camada 2 (superior)

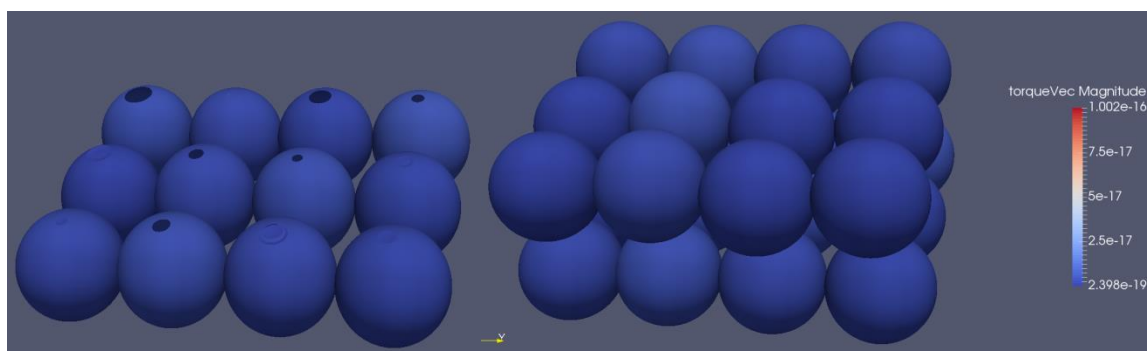


O mesmo comportamento evidenciado para direção Y pode ser observado para a direção X. Com exceção de duas esferas da camada superior, todas apresentam valores de força positivos em relação ao eixo X e as duas esferas da camada superior apresentam valores negativos em função da variação do diâmetro das esferas dentro da caixa que produz contatos desalinhados com o centro de gravidade. O valor das forças no eixo X também se encontra na faixa de 1.10^{-10} N e, assim como no eixo Y, podem ser consideradas desprezíveis.

Os valores de força obtidos na simulação vão de encontro as suposições feitas no momento de definição do modelo, valores de forças normais mais expressivos e valores de forças tangenciais pequenos e podendo ser desconsiderados.

Tendo observado o comportamento das forças translacionais, os torques obtidos na simulação são apresentados na Figura 38.

Figura 38. Forças rotacionais



Diferente dos outros gráficos de forças, no caso das forças rotacionais todas as esferas possuem valores de torque semelhantes, na faixa de 1.10^{-19} N.m. Estes valores de torque são inexpressivos e podem ser desprezados, concordando com outra observação realizada no início do trabalho onde o estudo das rotações causadas pela solicitação cíclica foram desprezados, mostrando que o modelo utilizado na simulação vai de encontro as observações laboratoriais, fortalecendo a ideia do modelo ser adequado para descrever o comportamento de frutos submetidos a solicitação cíclica.

5. CONCLUSÃO

O modelo linear de contato de Kelvin-Voigt, apesar de sua simplicidade em representar o comportamento visco-elástico, estimou adequadamente a deformação final em pêssegos submetidos à solicitação cíclica.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHMADI, E. *et al.* The effect of impact and fruit properties on the bruising peach. **Journal of Food Engineering**. v. 97, p. 110-117, 2010.

ASAF, Z.; RUBINSTEIN, D.; SHMULEVICH, I. Determination of discrete element method parameters required for soil tillage. **Soil & Tillage Research**. v. 92, p. 227-242, Jan. 2007.

BARCHI, G. L. *et al.* Damage to loquats by vibration-simulating intra-state transport. **Biosystems Engineering**. v. 82, n. 3, p. 305-312, 2002.

BERARDINELLI, A. *et al.* Damage to pears caused by simulated transport. **Journal of Food Engineering**. v. 66, p. 219-226, 2005.

BRILLIANTOV, N. V. *et al.* The collision of particles in granular systems. **Physical A: Statistical Mechanics and its Applications**. v. 231, n. 4, p. 417-424, 1996a. In: VAN ZEEBROECK. The discrete element method (DEM) to simulate fruit impact damage during transport and handling. Tese (Doutorado). Leuven, Bélgica. 2007.

BRILLIANTOV, N. V. *et al.* Model for collisions in granular gases. **Physical Review E**. v. 53, p. 5382-5392, 1996b. In: VAN ZEEBROECK. The discrete element method (DEM) to simulate fruit impact damage during transport and handling. Tese (Doutorado). Leuven, Bélgica. 2007.

COSTA, F. B. Injúria mecânica e qualidade pós-colheita da banana prata anã produzida no norte de minas gerais. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Viçosa. Viçosa. 2005.

CUNDALL, P. A.; STRACK, O. D. L. A discrete numerical model for granular assemblies. **Géotechnique**. v.29, n. 1, p. 47-65, Mar. 1979.

FREITAS FILHO, P. J. Introdução à Modelagem e Simulação Discreta de Sistemas. Capítulo 1 – modelagem e simulação de sistemas, 2010. Disponível em <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAet0AL/capitulo-1-modelagem-simulacao-sistemas>>. Acesso em set. 2014.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION – ONU, 2013. Disponível em <<https://www.fao.org.br/daccatb.asp>>. Acesso em set. 2014.

GREENSPAN, D. Discrete Models. Londres: Addison-Wesley, 1973. In: ZHANG, D.; WHITEN, W.J. A new calculation method for particle motion in tangential direction in discrete element simulations. **Powder Technology**. Austrália. v. 102, p. 235-243, 1999.

GRIGIO, M. L. et al. Danos mecânicos de queda e de compressão em goiabas “palumas” e a aplicação de tecnologias em pós-colheita, 2010. Disponível em <<https://www.embrapa.br/roraima/busca-de-publicacoes/-/publicacao/878338/danos-mecanicos-de-queda-e-de-compressao-em-goiabas-palumas-e-a-aplicacao-de-tecnologias-em-pos-colheita>>. Acesso em set. 2014.

GODOY, A.E. Injúrias mecânicas e seus efeitos na fisiologia e na qualidade de mamões “Golden”. Dissertação (Mestrado). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Piracicaba. 2008.

HINSCH, R. T. *et al.* Vibration of fresh fruits and vegetables during refrigerated truck transport. **Transactions of the ASAE**. v. 36, n.4, p. 1039-1042, 1993.

HOU, Q. F.; DONG, K. J.; YU, A. B. DEM study of the flow of cohesive particles in screw feeder. **Powder Technology**. v. 256, p. 529-239, 2014.

KIMMEL, E.; PELEG, K.; HINGA, S. Vibration modes of spheroidal fruits. **Journal of Agricultural Engineering Research**. v. 52, p. 201-213, 1992.

KUWABARA, G.; KONO, K. Restitution coefficient in a collision between two spheres. **Japanese Journal of Applied Physics**. v. 26, n. 8, p. 1230-1233, 1987. In: VAN ZEEBROECK. The discrete element method (DEM) to simulate fruit impact damage during transport and handling. Tese (Doutorado). Leuven, Bélgica. 2007.

LICHTENSTEIGER, M, J. *et al.* Evaluation of Kelvin model coefficients for viscoelastic spheres. **Transactions of ASAE**. v. 31, n. 1, p. 288-292, 1988.

LU, Z.; NEGI, S. C.; JOFRIET, J. C. A numerical model for flow of granular materials in silos. Part 1: model development. **Journal of Agricultural Engineering Research**. v. 68, n. 3, p.223-229, Nov. 1997.

LUDING, S. Introduction to Discrete Element Methods. **Discrete modeling of geomaterials**. p. 785-826. Dez. 2008.

LUENGO, R.F.A. *et al.* Avaliação da compressão em hortaliças e frutas e seu emprego na determinação do limite físico da altura da embalagem de comercialização. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 21, n. 4, p. 704-707, outubro/dezembro 2003.

MARQUES, R.W.C.; CAIXETA FILHO, J.V. Análise das operações de transporte de frutas e hortaliças no estado de São Paulo: um estudo comparativo (Compact disc). **XXXVIII Congresso Brasileiro de Economia e Sociologia Rural**. Rio de Janeiro, ago. 2001.

MOHSENIN, N. N. **Physical Properties of Plant and Animal Materials**. New York: Gordon and Breach Science Publishers, 1986.

MONTERO, C.R.S. *et al.* Influência do dano mecânico de impacto e compressão sobre a respiração de maçãs cultivares Fuji Suprema e Royal Gala. **Ciências Agrárias**, Londrina, v. 31, n. 4, p. 967-974, Out./Dez. 2010.

OWEN, P.J.; CLEARLY P.W. Prediction of screw conveyor performance using the discrete element method (DEM). **Powder Technology**. v. 193, p. 274-288, 2009.

POURNIN, L.; LIEBLING, TH. M.; MOCELLIN, A. Molecular-dynamics force model for better control of energy dissipation in numerical simulations of dense granular media. **Physical review E**. v. 65, 2001.

RAJI, A. O.; FAVIER, J. F. Model for the deformation in agricultural and food particulate materials under bulk compressive loading using discrete element method. II: Compression of oilseeds. **Journal of Food Engineering**. v. 64, p. 373-380, 2004.

REMOND, S.; PIZETTE, P. A DEM hard-core soft-shell model for simulation of concrete flow. **Cement and Concrete Research**. v. 58, p.169-178, Abr. 2014.

RONG, G.H., NEGI, S.C., JOFRIET, J.C. DEM simulation of in-transit fruit damage. **ASAE**. 1993. In: VAN ZEEBROECK. The discrete element method (DEM) to simulate fruit impact damage during transport and handling. Tese (Doutorado). Leuven, Bélgica. 2007.

SAKAGUCHI, E.; FAVIER, J. F. Analysis of the shear behavior of a grain assembly using DEM simulation. **International Agrophysics**. v. 14, n. 2, p.241-248, 2000

SAKAGUCHI, E. *et al.* Numerical simulation of the shaking separation of paddy and brown rice using de discrete element method. **Journal of Agricultural Engineering Research**. v. 79, n. 3, p. 307-315, Jul. 2001.

SANCHES, J. et al. Avaliação de danos mecânicos causados em banana “nanicão” durante as etapas de beneficiamento, transporte e embalagem. **Engenharia Agrícola**. Jaboticabal, v.24, n.1, p.195-201, jan./abr. 2004.

SANCHES, J.; DURIGAN, J.F.; DURIGAN, M.F.B. Aplicação de danos mecânicos em abacates e seus efeitos na qualidade dos frutos. **Engenharia Agrícola**. Jaboticabal, v.28, n.1, p.164-175, jan./mar. 2008.

SCHOORL, D.; HOLT, J. E. Verification and application of a model for predicting damage of horticultural produce during transport. **Agricultural Systems**. v. 16, p. 67-83, 1985.

SCHULTE-PASON, N. L. *et al.* Apple damage assessment during intrastate transportation. **Applied Engineering Agriculture**. v. 6, n. 6, p. 753-758, 1990.

SKARZYNSKI, L.; NITKA, M.; TEJCHMAN, J. Modeling of concrete fracture at aggregate level using FEM and DEM based on X-ray μ CT images of internal structure. **Engineering Fracture Mechanics**. v. 147, p. 13-35, Out. 2015.

SLAUGHTER, D. C.; HINSCH, R. T.; THOMPSON, J. F. Assessment of vibration injury to Bartlett pears. **Transactions of the ASAE**. v. 6, n. 4, p. 1043-1047, 1993.

SOLEIMANI, B.; AHMADI, E. Measurements and analysis of truck vibration levels as a function of packages location in truck bed and suspension. **Computers and Electronics in Agriculture**. v. 109, p. 141-147, 2014.

TEZOTTO, J.V. *et al.* Efeito do corte como dano mecânico na qualidade e na fisiologia de mamões “Golden”. **Revista Brasileira de Fruticultura**. Jaboticabal - SP, Volume Especial, E. 241-247, Outubro 2011.

TIMM, E. J. *et al.* Apple damage and compressive forces in bulk bins during orchard transport. **Applied Engineering in Agriculture**. v. 14, n. 2, p. 165-172, 1998.

TRIVINO, L. F.; MOHANTY, B. Assessment of crack initiation and propagation in rock from explosion-induced stress waves and gas expansion by cross-hole seismometry and FEM-DEM method. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**. v. 77, p. 287-299, Jul. 2015.

VAN ZEEBROECK *et al.* Determination of the dynamical behavior of biological materials during impact using a pendulum device. **Journal of Sound and Vibration**. v. 266, p. 465-480, 2003.

VAN ZEEBROECK *et al.* The discrete element method (DEM) to simulate fruit impact damage during transport and handling: Model building and validation of DEM to predict bruise damage on apples. **Postharvest Biology and Technology**. v. 41, n. 1, p. 85-91, 2006a.

VAN ZEEBROECK *et al.* The discrete element method (DEM) to simulate fruit impact damage during transport and handling: case study of vibration damage apple bulk transport. **Postharvest Biology and Technology**. v. 41, p. 92-100, 2006b.

VAN ZEEBROECK. The discrete element method (DEM) to simulate fruit impact damage during transport and handling. Tese (Doutorado). Leuven, Bélgica. 2007.

VAN ZEEBROECK *et al.* The discrete element method (DEM) to simulate fruit impact damage during transport and handling: Model building and validation of DEM to predict bruise damage of apples. **Postharvest Biology and Technology**. v. 41, n. 1, p. 85-91, 2008.

VU-QUOC, L.; ZHANG, X.; WALTON, O. R. A 3-D discrete element method for dry granular flows of ellipsoidal particles. **Computer Method in Applied Mechanics and Engineering**. v. 187, p. 483-528, 2000.

WALTON, O. R.; BRAUN, R. L. Viscosity, granular-temperature, and stress calculations for shearing assemblies of inelastic, frictional disks. **Journal of Rheology**. v. 30, n. 5, p. 949-980, 1986.

WU, G.; WANG, C. Investigating the effects of simulated transport vibration on tomato tissue damage based on vis/NIR spectroscopy. **Postharvest Biology and Technology**. v. 98, p. 41-47, 2014.

YADE. Disponível em <<https://yade-dem.org/doc/>>. Acesso em 10/02/2016.

ZHANG, D.; WHITEN, W. J. A new calculation method for particle motion in tangential direction in discrete element simulations. **Powder Technology**. v. 102, p. 235-243, 1999.

ZHOU, R. *et al.* Effect of transport vibrations levels on mechanical damage and physiological responses of Huanghua pears (*Pyrus pyrifolia* Nakai, cv. Huanghua). **Postharvest Biology and Technology**. v. 46, p. 20-28, 2007.