

RAGUIARA PRIMO DA SILVA



**Modelagem numérica do comportamento mecânico do solo após preparo  
sob tráfego de veículos na cultura de cana-de-açúcar**

Recife, PE  
Outubro, 2016

RAGUIARA PRIMO DA SILVA

**Modelagem numérica do comportamento mecânico do solo após preparo  
sob tráfego de veículos na cultura de cana-de-açúcar**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal Rural de Pernambuco como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Agrícola

Orientador:

Prof. Dr. Mario Monteiro Rolim

Co-Orientador:

Prof. Dr. Igor Fernandes Gomes

**RAGUIARA PRIMO DA SILVA**

**Modelagem numérica do comportamento mecânico do solo após preparo sob  
tráfego de veículos na cultura de cana-de-açúcar**

Dissertação defendida em 20 de outubro de 2016 pela Banca Examinadora:

Orientador:

---

**Prof. Dr. Mario Monteiro Rolim**

**DEAGRI-UFRPE**

**Examinadores:**

---

**Prof. Dr. Igor Fernandes Gomes**

**CTG - UFPE**

---

**Prof. Dr. Romero Falcão Bezerra de Vasconcelos**

**DEAGRI-UFRPE**

---

**Prof. Dr. Djalma Eusébio Simões Neto**

**EECAC - UFRPE**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE  
Biblioteca Central, Recife-PE, Brasil

S586m Silva, Raguiera Primo da  
Modelagem numérica do comportamento mecânico do solo após preparo sob  
tráfego de veículos na cultura de cana-de-açúcar / Raguiera Primo da Silva. – 2016.  
77 f.: il.

Orientador: Mario Monteiro Rolim.  
Coorientador: Igor Fernandes Gomes  
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal Rural de Pernambuco,  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Recife, BR-PE, 2016.  
Inclui referências e apêndice(s).

1. Solos – Análise 2. Porosidade 3. Cana-de-açúcar 4. Solos I. Rolim, Mario  
Monteiro, orient. II. Gomes, Igor Fernandes, coorient. III. Título

CDD 631.4

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de dividir esta imensa alegria com pessoas muito especiais que não só fizeram parte deste trabalho, mas de toda minha jornada acadêmica e pessoal. Primeiramente a Deus e nossos mentores de luz e proteção.

Aos meus pais todo carinho, e seus imensos esforços para que eu sempre seguisse o caminho dos estudos Cintia Rosa Primo e José Carlos da Silva, que se sintam também parte deste trabalho.

O meu sincero agradecimento e carinho ao Professor Dr. Mário Monteiro Rolim, por me proporcionar a alegria de trabalhar com este assunto tão fascinante, pelo total apoio, orientação e amizade durante todos os momentos do curso de pós-graduação.

Agradecendo também as enormes colaborações dos Professores Romero Falcão Bezerra de Vasconcelos e Djalma Eusébio Simões Neto, que foram de extrema importância para aperfeiçoamento desta obra.

Ao corpo docente do Departamento de Engenharia Agrícola, da UFRPE e do Departamento de Engenharia Civil, da UFPE, pelos conhecimentos transmitidos. A Capes (Coordenação de pessoal de nível superior) pela concessão da bolsa durante o período de realização do mestrado.

Ao Professor Dr. Igor Gomes pela enorme paciência e dedicação em me apresentar um mundo numérico totalmente novo

As minhas amigas, que por muitas vezes desenvolveram o papel de irmãs Tiana Cibele Fagundes Ximenes e Raphaela Revorêdo Bezerra.

Ao meu amigo e companheiro Humberto da Silveira Correia, que entendeu e me apoiou em todas as minhas escolhas.

## RESUMO

A compactação dos solos agrícolas é um problema que tem se agravado nas últimas décadas pela maior necessidade de mecanização das culturas, impulsionada pela competitividade do mercado. A cana-de-açúcar é uma das principais culturas que sofrem como esse problema, devido, principalmente pela colheita mecanizada e preparação do solo para replantio. Para minimizar o fenômeno da compactação é necessário entender o comportamento mecânico do solo, como se propaga as tensões causadas pelos maquinários, e suas consequências na estrutura do solo. Os modelos matemáticos aplicados ao fenômeno é uma ótima alternativa para monitorar e entender esse processo de forma simplificada. Os modelos de compactação podem ser divididos em modelos pseudo-analíticos, os quais originam da equação de Boussinesq, e modelos numéricos que empregam métodos aproximados tais como método dos elementos finitos, das diferenças finitas, volumes finitos, e etc. Objetivou-se neste trabalho, avaliar o comportamento mecânico do solo após o preparo sob tráfego de veículos na cultura da cana-de-açúcar empregando o método de elementos finito em simulações numéricas considerando o modelo elástico-plástico, CamCley Modificado baseado na teoria dos estados críticos. As equações governantes do problema foram baseadas na mecânica dos meios contínuos. Foram avaliadas 5 configurações de eixo para cenários de três umidades distintas. As variáveis de saída foram: distribuição da tensão vertical, porosidade, tensão de pré-adensamento e deslocamento. Foi possível concluir que todos os veículos causam compactação adicional na camada de 0-20 cm. A umidade foi determinante para aumento do risco de compactação. Houve um aumento significativo da porosidade na região entre rodas, área de maior concentração radicular da cultura. O controle do tráfego de veículos dentro do talhão é uma ótima alternativa para controle do processo de compactação.

**Palavras-Chaves:** Tensão no solo, deslocamento, pré-adensamento, porosidade, solo.

## ABSTRACT

Agricultural soil compaction is an issue that has been intensified over the last decades due to crop systems mechanization, driven by market's competitiveness. Sugarcane is one of the main crops that is affected by this issue, mainly due to mechanized harvest and soil preparation for replanting. In order to mitigate soil compaction, it is essential to understand soil mechanical behavior, how machinery-based tension are spread through soil, and their consequences to soil structure. Mathematical models applied to this phenomenon are a great alternative and simply way to monitor and understand this process. Compaction models are divided into pseudo-analytical models, which come from Boussinesq equation, and numerical models, which use approximation methods such as finite element, finite difference, finite volume methods, etc. The aim of this study was to evaluate soil mechanical behavior after preparation under vehicle traffic in a sugarcane field, applying finite element method through numerical simulations assuming the elastic-plastic model, CamCley Modified based on soil critical states theory. Governing equations of the studied issue are based on continuous media mechanics. Five axle configurations were evaluated for three different soil water content scenarios. The output variables were as follows: vertical stress distribution, porosity, pre-compression stress and displacement. It was possible to conclude that all vehicles caused additional compaction to the 0-20 cm layer. Soil water content was a determining factor to increase compaction risk. There was a significant increase in porosity in the region between wheels, which is the same as the crop root system concentration area. Vehicle traffic control within a cultivation plot is a great alternative to control compaction processes.

**Key words:** soil stress, displacement, pre-compression, porosity, soil

## SUMARIO

1. INTRODUÇÃO .....	12
OBJETIVO GERAL .....	13
2. REVISÃO DE LITERATURA .....	13
CANA-DE-AÇÚCAR .....	13
PRÁTICAS AGRÍCOLAS, PREPARO E COLHEITA .....	14
COMPACTAÇÃO .....	15
UMIDADE.....	17
DENSIDADE.....	17
COMPRESSIBILIDADE.....	19
MODELOS DE COMPACTAÇÃO DO SOLO .....	20
FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DO PROBLEMA MECÂNICO .....	21
4. MATERIAIS E METODOS .....	36
ENSAIO DE COMPRESSIBILIDADE.....	37
CARGAS DOS VEÍCULOS UTILIZADOS NA SIMULAÇÃO .....	38
TENSÕES APLICADAS.....	38
PRÉ-PROCESSAMENTO DO PROBLEMA SIMULADO .....	41
DESCRIÇÃO DO PROGRAMA EM ELEMENTOS FINITOS CODE_BRIGHT .....	41
PÓS-PROCESSAMENTO DO PROBLEMA SIMULADO .....	42
VALIDAÇÃO DO MODELO .....	43
RESULTADOS E DISCUSSOES .....	45
VALIDAÇÃO DO MODELO CANCLEY MODIFICADO NO PROGRAMA CODE_BRIGHT.....	45
TENSÕES VERTICAIS .....	47
TENSÃO DE PRE-ADENSAMENTO .....	56
POROSIDADE.....	62
DESLOCAMENTOS.....	69
CONCLUSÕES.....	72
BIBLIOGRAFIA.....	73



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Variação do índice de vazios e pressão aplicada no ensaio edométrico. ....	19
Figura 2. Resposta tensão-deformação para ensaio de compressão uniaxial: (A) comportamento elástico; (B) comportamento elastoplástico.....	26
Figura 3. Estado inicial de tensões no modelo CamClay Modificado: (A) Superfície de Fluência; (B) Curva de Carga-Descarga do ensaio edométrico. Fonte: Gomes (2009). ....	32
Figura 4. Compressão elástica no modelo CamClay Modificado: (a) Superfície de Fluência; (b) Curva de Carga-Descarga do ensaio edométrico. Fonte: Gomes (2009). ....	33
Figura 5. Compressão plástica no modelo CamClay Modificado: (a) Superfície de Fluência; (b) Curva de Carga-Descarga do ensaio edométrico. Fonte: Gomes (2009). ....	33
Figura 6. Cargas por eixo de Trator (A); Caminhão (B) e Reboque canavieiro (C). ....	39
Figura 7. Malhas feitas com as mediadas de rodas e espaço entre rodas para (A) eixo traseiro do trator, (B) eixo dianteiro do trator, (C) eixo traseiro do caminhão, (D) eixo dianteiro do caminhão e (E) eixo do reboque.....	40
Figura 8. Fluxograma dos procedimentos da modelagem. ....	44
Figura 9. Comparativo de respostas experimental e numérica de ensaio edométrico nas umidades de 10%,15% e 20%. ....	46
Figura 10. Variação da tensão vertical no solo sob as rodas do eixo traseiro do trator para as umidades de 10% (A), 15% (B) e 20% (C) até 1,00 m de profundidade.....	48
Figura 11. Variação da tensão vertical no solo das rodas sob eixo dianteiro do trator para as umidades de 10% (A), 15% (B) e 20% (C) até 1,00 m de profundidade. ....	49
Figura 12. Variação da tensão vertical no solo das rodas do caminhão, eixo traseiro, para as umidades de 10% (A), 15% (B) e 20% (C) até 1,00 m de profundidade. ....	50
Figura 13. Variação da tensão vertical no solo do caminhão, eixo dianteiro, para as umidades de 10% (A), 15% (B) e 20% (C) até 1,00 m de profundidade. ....	51
Figura 14. Variação da tensão vertical no solo sob as rodas do eixo do Reboque para as umidades de 10% (A), 15% (B) e 20% (C) até 1,00 m de profundidade. ....	52
Figura 15. Tensões verticais transmitidas ao solo para a roda traseira do trator (tt), roda dianteira do trator (td), roda traseira do caminhão (ct), roda dianteira do caminhão (ct) e roda do reboque (rb) e nas umidades de 10% (A), 15% (B) e 20% (C) até 1,00 m de profundidade.....	55
Figura 16. Variação da tensão de pré-adensamento no solo eixo traseiro do trator, para as umidades de 10% (A), 15% (B) e 20% (C) até 1,00 m de profundidade. ....	56

Figura 17. Variação da tensão de pré-adensamento no solo do trator, eixo dianteiro, para as umidades de 10% (A), 15% (B) e 20% (C) até 1,00 m de profundidade. ....	57
Figura 18. Variação da tensão de pré-adensamento no solo do caminhão, eixo traseiro, para as umidades de 10% (A), 15% (B) e 20% (C) até 1,00 m de profundidade. ....	58
Figura 19. Variação da tensão de pré-adensamento no solo do caminhão, eixo dianteiro, para as umidades de 10% (A), 15% (B) e 20% (C) até 1,00 m de profundidade. ....	60
Figura 20. Variação da tensão de pré-adensamento no solo do reboque para as umidades de 10% (A), 15% (B) e 20% (C) até 1,00 m de profundidade. ....	61
Figura 21. Tensões de pré-adensamento transmitidas ao solo para a roda do caminhão traseiro (CT), do caminhão dianteiro (cd), traseiro do trator (tt), dianteira do trator (td) e eixo do reboque (Rb) para as umidades: 10% (A), 15% (B) e 20% (C). ....	62
Figura 22. Variação da porosidade do solo após a passagem dos pneus do traseiro trator para as umidades de 10% (A), 15% (B) e 20% (C) até 1,00 m de profundidade. ....	63
Figura 23. Variação da porosidade do solo após a passagem do pneu dianteiro do trator para as umidades de 10% (A), 15% (B) e 20% (C) até 1,00 m de profundidade. ....	64
Figura 24. Variação da porosidade do solo após a passagem dos pneus do eixo do traseiro do caminhão para as umidades de 10% (A), 15% (B) e 20% (C) até 1,00 m de profundidade. ....	65
Figura 25. Variação da porosidade do solo após a passagem dos pneus do eixo dianteiro do caminhão para as umidades de 10% (A), 15% (B) e 20% (C) até 1,00 m de profundidade. ....	66
Figura 26. Variação da porosidade do solo após a passagem dos pneus do Reboque para umidades de 10% (A), 15% (B) e 20% (C) até 1,00 m de profundidade. ....	67
Figura 27. Variação do deslocamento no solo sob o eixo traseiro do trator para as umidades de 10% (A), 15% (B) e 20% (C) até 1,00 m de profundidade. ....	69
Figura 28. Variação do deslocamento no solo sob o eixo dianteiro do trator para as umidades de 10% (A), 15% (B) e 20% (C) até 1,00 m de profundidade. ....	70
Figura 29. Variação do deslocamento no solo sob o eixo traseiro do Caminhão para as umidades de 10% (A), 15% (B) e 20% (C) até 1,00 m de profundidade. ....	70
Figura 30. Variação do deslocamento no solo sob o eixo dianteiro do Caminhão para as umidades de 10% (A), 15% (B) e 20% (C) até 1,00 m de profundidade. ....	71
Figura 31. Variação do deslocamento no solo sob o eixo do Reboque para as umidades de 10% (A), 15% (B) e 20% (C) até 1,00 m de profundidade. ....	72

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Caracterização física do Argissolo Amarelo distrocoeso sob cultivo de cana-de-açúcar (Tavares, 2016). .....	36
Tabela 2. Propriedades dos solos para INPUT do Modelo CamClay Modificado.....	37
Tabela 3. As tensões aplicadas nas umidades (A) 15 e 20% e B para 10% de umidade (Lozano et al., 2013).....	38
Tabela 4. Erros relativos médios dos resultados numéricos e experimentais.....	47

## 1. INTRODUÇÃO

Atualmente o Brasil apresenta a maior produção mundial de cana-de-açúcar, com uma área cultivada superior a 8,89 milhões de hectares (FAO, 2016), fornecendo aproximadamente 18,5% do total da produção mundial de açúcar. O Estado de Pernambuco sinalizou um aumento de apenas 1,7 % da produção de cana de açúcar na safra 2015/2016, comparado aos 10,75% do aumento da produção nacional do mesmo ano, ou até mesmo os 3,6% da safra pernambucana do ano anterior, é um percentual pequeno (Conab, 2016).

O decréscimo da produção de cana do estado de Pernambuco pode ser justificado pela falta do incremento de área, para renovação do canavial, o que não acontece com o estado de São Paulo por exemplo. Segundo dados da CONAB, 2016 houve um decréscimo de aproximadamente 8% da área de plantio no estado entre os anos de 2012 e 2013. Com a restrição da área de renovação do canavial, por motivos ambientais e econômicos e o aumento da utilização de máquinas nas últimas décadas, fica evidente a preocupação se manter o a qualidade na estrutura do solo, para manter níveis crescentes de produtividade.

O uso contínuo de maquinários agrícolas para facilitar a colheita da cultura está ocasionando danos irreversíveis na estrutura dos solos brasileiros. A colheita mecanizada da cana-de-açúcar é a principal causa da compactação dentro do canavial, cuja consequência é o aumento da densidade do solo, de sua resistência à penetração, reduzindo assim a porosidade total, limitando o espaço de crescimento das raízes. Com a dificuldade de crescimento das raízes, a extração de água, e nutrientes pela planta é seriamente comprometida, causando a queda da produtividade, e a perda de solo, em razão do aumento do processo erosivo.

Os métodos laboratoriais de acompanhamento do processo de compactação são lentos e onerosos, com isso, os modelos de compactação de solos agrícolas vêm ganhando força nas últimas décadas, pois permite uma praticidade do processo de compactação do solo. É preciso entender como se dá a propagação das tensões ao longo do perfil do solo.

Os modelos de compactação do solo podem-se dividir em dois tipos: Modelos pseudo-analíticos, e Modelos de elementos finitos (MEF). Um estudo detalhado dos diferentes modelos existentes pode-se encontrar em Defossez e Richard (2003). Dentre os diversos modelos propostos por elementos finitos, todos visam descrever o comportamento tensão-deformação do solo, os quais são baseados no conceito clássico da mecânica do solo os modelos elásticos linear, elástico não linear e elástico-plástico. Para o presente trabalho será utilizado o modelo elástico-plástico, o qual utiliza variáveis de condições de campo e

as principais características dos veículos, e simulam os efeitos que o tráfego gera nessas condições, fornecendo informações importantes para a tomada de decisão sobre o tipo de maquinário a ser utilizado em determinada condição de campo, visando minimizar o risco de compactação do solo.

## **OBJETIVO GERAL**

Avaliar o comportamento mecânico do solo após o preparo sob tráfego de veículos na cultura da cana-de-açúcar empregando o método de elementos finito em simulações numéricas considerando o modelo elástico plástico, CamCley Modificado baseado na teoria dos estados críticos.

### **Objetivos específicos**

- Validação do modelo através do ensaio endométrio de compressibilidade conforme MB-3336 da ABNT (1990).
- Avaliar a alteração da tensão de pré-adensamento com as novas cargas aplicadas ao solo, observando quais casos obteve compactação adicional.
- Avaliar a influência da umidade nas variáveis estudadas (tensão vertical, porosidade, tensão de pré-adensamento e deslocamento) do solo na passagem dos veículos.
- Indicar qual veículo representa o maior risco de compactação para o solo

## **2. REVISÃO DE LITERATURA**

### **Cana-de-açúcar**

A produção brasileira de cana-de-açúcar para a safra 2015/2016 foi de 665.586,3 t, sendo 11.359,0 t a parcela do nordeste brasileiro, que deixa o estado de Pernambuco o segundo maior produtor, contribuindo com 27,3% da produção da região (Conab, 2016). Em 2009 a cana-de-açúcar atingiu a maior participação na matriz energética brasileira desde o início do levantamento, em 1992. Dada a sua importância econômica, a cana-de-açúcar é considerada, atualmente, um *commodity* valorizado pelo potencial de gerar energia limpa e renovável e de substituir parte da matriz energética global centrada, hoje, na utilização de combustíveis hidrocarbonetos de origem fóssil (Farias et al., 2009).

A expectativa de expansão da área cultivada de cana-de-açúcar, de 8,5 milhões de hectares, em 2012, para cerca 14 milhões de hectares em 2030, para que isso ocorra, ocorrerá alterações significativas em todo o sistema de mecanização atualmente empregado para pôr a atividade em níveis adequados de sustentabilidade. A cana-de-açúcar é uma cultura semi-perene, cujo processo de produção prevê uma colheita por ano, produzindo em média 81 t/ha/ano, no território brasileiro, se as principais condições edafoclimáticas e de preparo e manejo de solo forem atendidas (Braunbeck e Magalhães, 2010).

O uso de maquinário cada vez mais pesado, trabalhando em condições desfavoráveis de umidade, geralmente devido às pressões econômicas do agronegócio, tem contribuído com o processo de compactação do solo; causando efeitos negativos nas propriedades física e ao meio ambiente. Isto tem convertido a compactação do solo num dos tópicos de maior importância dentro dos planos de manejo e conservação de solos agrícolas submetidos ao tráfego de veículos (Lozano et al., 2013).

### **Práticas Agrícolas, Preparo e Colheita**

O preparo do solo e o tráfego de veículos agem de forma antagônica sobre o solo. O preparo desagrega o solo para criar um ambiente propício para o desenvolvimento radicular (aumento da porosidade), já as rodas e esteiras dos equipamentos produzem o efeito contrário ao comprimirem a estrutura do solo, provocando seu adensamento, ou seja, a redução da sua porosidade. O ciclo de produção da cana-de-açúcar, identificar-se as fases de plantio, tratos culturais e colheita para essas fases são transportados fertilizantes, defensivos químicos, mudas, palhico e colmos para moagem, de maneira geral, em ordem crescente de intensidade de tráfego com grandes quantidades de massa movimentada. O tráfego intenso contribui para a compactação do solo, tornando necessárias na renovação do ciclo, onde se utiliza subsolagem, aração, gradagem e sulcagem para sua desagregação do solo (Magno Junior, 2012).

Diversos implementos podem ser utilizados no preparo do solo, a grade aradora tem função de desestruturar o solo, além de destruir soqueiras e plantas daninhas, e nivelar a superfície. O sulcador tem por finalidade abrir sulco no solo, delimitar o espaçamento das linhas de cultivo, bem como a largura e profundidade do sulco, propiciando condições ideais de germinação e crescimento inicial das culturas (Vizzotto, 2014). O sulcador é bastante utilizado para culturas de grande importância econômica como o milho e a cana-de-açúcar. Para o caso da cana-de-açúcar, o sulco pode ter profundidade de 30 a 40 cm e o dobro da largura, que é obtido com o uso de asas metálicas

fixadas em cada lado da haste sulcadora, o que promove o deslocamento do solo para o lado, para cima e fora do sulco (Balastreire, 1987).

Existem três opções para o preparo do solo, na fase de plantio: Sistema Convencional, Sistema de Cultivo Mínimo e Sistema de Plantio Direto. No Cultivo Convencional, envolve operações de subsolagem e aração, combinadas por gradagens. O tráfego intenso de colhedoras e veículos de transporte são normalmente os agentes compactadores que justificam o uso da subsolagem e das gradagens.

No Cultivo Mínimo destaca-se por substituir as operações convencionais de preparo do solo por um preparo concentrado somente na linha de plantio, que consiste mais frequentemente em uma subsolagem, que pode ser complementada por uma desagregação mais intensa do solo por meio de enxada rotativa em uma faixa estreita vizinha à linha de subsolagem.

O Sistema de Plantio Direto é uma técnica de manejo do solo em que palhicho e restos vegetais (folhas, colmos, raízes) são deixados na superfície do solo. O solo é revolvido apenas no sulco onde são depositadas as mudas e fertilizantes e as plantas infestantes são controladas por herbicidas, evitando assim cultivos mecânicos que provocam a compactação. Não existe preparo do solo além da mobilização no sulco de plantio.

Por outro lado, a proposta de Estruturas de Tráfego Controlado (ETC's) tem ganhado força na última década, demonstra bom potencial de viabilidade técnica e econômica para permitir que o Plantio Direto se torne uma realidade em larga escala comercial, com possibilidade de viabilizar paralelamente a eliminação das queimadas e a disponibilidade do palhicho para aproveitamento energético. O controle de tráfego mantém trilhas compactadas permanentemente, evitando assim o custo associado ao círculo vicioso de compactação e descompactação praticado no sistema de Plantio Convencional. Na mecanização convencional, o tráfego, mesmo que controlado, atinge faixas com 0,80 m de largura, espaçadas de 1,50 m, ou seja, aproximadamente 50% da área é atingida pelos pneus ou esteiras dos equipamentos de colheita ou transporte.

### **Compactação**

A cultura da cana-de-açúcar é umas das culturas mais atingidas pelo processo de compactação do solo, devido ao uso de tratores, subsoladores, principalmente na colheita, que quase sempre é feita em condições inadequadas de umidade, causando a aproximação das partículas sólidas entre si, promovendo assim reduções superiores a 50% no volume de

macroporos do solo, levando ao aumento significativo na densidade do solo (Severino et al., 2010) com isso, o conteúdo volumétrico de água e a capacidade de campo são aumentados, enquanto a aeração, a taxa de infiltração de água e a condutividade hidráulica do solo saturado são reduzidas o espaço (Dias Junior e Pierce, 1996)

A compactação do solo pode então como o resultado dos esforços atuantes sobre o solo que por sua vez são consequência das forças aplicadas pelo maquinário na direção inferior, provenientes das cargas das rodas (esforço normal vertical), assim como também das forças de cisalhamento provenientes do deslizamento dos pneus, e das forças vibratórias que são transmitidas às rodas pelo motor. As forças verticais são as de maior importância nos estudos de compactação dos solos agrícolas, sendo o esforço máximo principal (normal) determinado pela divisão do valor de carga pela área de contato entre o solo e o pneu. Este esforço está diretamente relacionado com a pressão de insuflagem do pneu (Alakuko et al., 2003).

A degradação do solo causada pela sua compactação é um problema reconhecido mundialmente, cuja nocividade pode aumentar quando há ausência de matéria orgânica. Os sintomas apresentados por este problema ambiental, comum na agricultura convencional, nem sempre são claros para serem detectados em campo; pois geralmente não se manifestam marcas evidentes na superfície do solo; evidenciando a necessidade de monitoramento físico do fenômeno (Hamza, 2005). A compactação do solo apresenta-se como um problema que é melhor ser evitado, do que solucionado por meio de processos para descompactar a estrutura do solo, já que um dos principais problemas é a longevidade dos efeitos, pois podem perdurar por mais que cinco anos.

A resposta das principais culturas à compactação ainda não é completamente conhecida (Alguns estudos têm utilizado a resistência a penetração (RP) e a densidade do solo (Ds) para avaliar os efeitos dos sistemas de manejo do solo no sistema radicular (Collares et al., 2008). A compactação pode se dividir em dois grupos: os fatores que interferem na compactação e que são característicos do solo; tais como a resistência mecânica, que por sua vez depende do teor de C orgânico, do teor de umidade, e do tipo de solo (Larson et al., 1980), e por outra parte estão os fatores que são independentes do solo os quais são: a carga por roda e a carga por eixo (que dependem das características da máquina e das dimensões do pneu), a pressão de insuflação do pneu, a velocidade da máquina, e a interação solo-pneu (koolen e kuipers, 1983)



## **Umidade**

A umidade do solo é considerada o fator mais importante no processo de compactação, pois a resistência à penetração aumenta quando a umidade diminui, porém pode chegar a valores perto da capacidade de suporte do solo, incrementando o risco de compactar o solo (Lozano et al., 2013). A umidade de solo, somado a outros fatores, é um parâmetro indispensável na programação das operações com maquinário; pois o conhecimento do teor de água de um solo pode determinar se está apto para trânsito de máquinas sem correr o risco de compactá-lo. Diferentes estudos mostram que a deformação de um solo sob mesmas cargas aumenta com o teor de umidade, estando a umidade diretamente ligada à textura do solo. Este é o motivo pelo qual um mesmo valor de esforço transmitido ao solo pode compactar mais um subsolo com alto teor de umidade que quando o mesmo está mais seco. Trabalhar um solo com teor de umidade incorreto tende a acentuar o processo de compactação do solo (Hamza et al., 2005).

A umidade ótima de compactação pode ser determinada através do ensaio de Proctor (NBR 7182). No teor de umidade ótima o solo apresenta a sua massa específica aparente seca máxima. Na parte ascendente da curva, chamada ramo seco, a água funciona como lubrificante entre as partículas do solo, facilitando assim o arranjo destas, porém incrementando a massa específica seca do solo. Depois de atingido o teor de umidade ótima o solo começa a ter mais água do que sólidos, amortizando assim a compactação e decrescendo sua massa específica seca (Richard, 1965)

## **Densidade**

A densidade do solo é uma propriedade dinâmica que reproduz de forma imediata qualquer alteração estrutural no solo. Essa alteração é causada geralmente por ações antrópicas, como preparo do solo e colheita com máquinas agrícolas, por animais e condições ambientais em que se encontra o meio. Quando ocorre a degradação da sua estrutura, o efeito imediato é no aumento da densidade, acarretando a redução da macroporosidade. A porosidade e a densidade do solo têm sido utilizadas como indicadores da qualidade do solo, por tratar-se de propriedades dinâmicas, suscetíveis ao uso e de fácil determinação, estando relacionadas com a compactação (Schoenholtz et al., 2000).

A densidade do solo é influenciada diretamente pelo teor de umidade quando aplicadas cargas sobre o solo. Tem-se reportado que teores de umidade acima de 60% da capacidade de campo incrementam significativamente a densidade do solo, diminuindo sua

capacidade de infiltração ao reduzir a porosidade. Não obstante, a densidade do solo não apresenta variação até uma profundidade de 30 cm quando as lavouras com tratores leves são realizadas num solo com baixo teor de umidade. Em um solo seco, a sua densidade não é afetada pelas grandes cargas transmitidas pelo maquinário.

### **Porosidade**

Porosidade é a relação entre o volume de espaços vazios e o volume de total de solo. As partículas sólidas do solo formam um arranjo poroso, onde os espaços vazios, denominados de poros, têm a capacidade de armazenar líquidos e gases. É a porosidade que determina propriedades importantes, tais como a capacidade de reter e conduzir a água pelo solo (Santos, 2005)

Muitos conceitos têm surgido a fim de padronizar a classificação dos poros quanto ao tamanho. Embora não exista um consenso entre poros grandes e pequenos, várias classificações são citadas na literatura e uma das mais simples é a divisão entre micro e macroporos. Os microporos, também denominados poros capilares, representam os poros responsáveis pela retenção da água no solo, enquanto os macroporos representam os poros responsáveis pela drenagem e aeração do solo (Brady, 1979).

Os macroporos são poros não capilares com diâmetro igual ou maior a 0,05 mm. Já os microporos, consistem em poros capilares com diâmetro menor que 0,05 mm. Uma das diferenças entre estes está na manifestação do fenômeno de capilaridade (ascensão da água no solo entre espaços muito finos), onde somente os microporos apresentam esse fenômeno (Richards, 1965)

Para garantir o bom desenvolvimento das culturas deve-se ter uma relação entre quantidade de poros e variação de diâmetro dos mesmos para proporcionar boa infiltração, drenagem, aeração e manutenção de adequado teor de água, facilitando, assim, a penetração das raízes e as trocas gasosas com a atmosfera (Zienkiewicz e Morgan, 1984). O potencial (tensão) com que a água é retida pela matriz do solo está ligada ao diâmetro dos poros, ou seja, quanto maior o tamanho dos poros, menor será a tensão a ser aplicada para retirar a água e, quanto menor o tamanho dos poros, consideravelmente maior será a tensão necessária (Mesquita e Moraes, 2004).

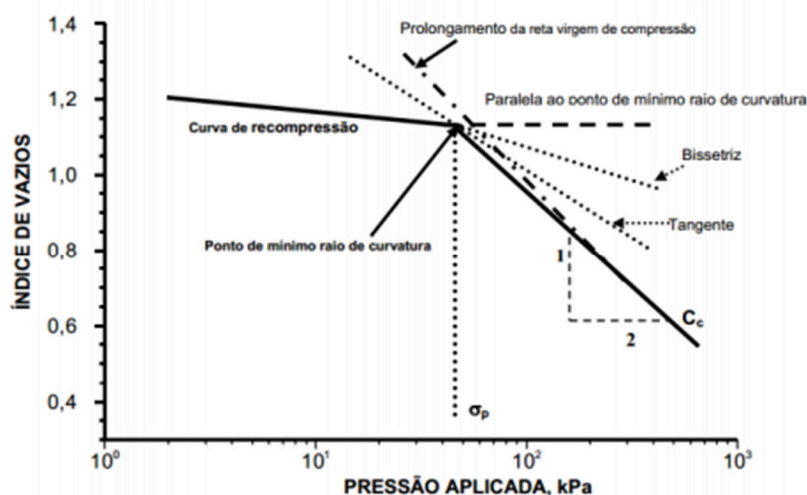
A distribuição do diâmetro dos poros no solo tem um papel preponderante em seu comportamento físico-hídrico. Textura, estrutura e teor de matéria orgânica relacionam-se com a porosidade do solo. Solos de textura argilosa possuem maior volume total de poros e seu alto volume de microporos confere boa retenção de água e menor drenagem. Apesar de

um solo arenoso apresentar porosidade total relativamente reduzida, a movimentação da água e do ar é mais rápida devido ao predomínio de macroporos, permitindo maior movimento da água e do ar (Buckman e Brady, 1989).

## Compressibilidade

Entender o comportamento de compressão dos solos é essencial para prever as alterações que podem ocorrer na sua estrutura quando submetido ao estresse causado por máquinas agrícolas. A curva de compressão do solo tem sido usada para compreender o processo de compactação. A tensão de pré-compactação ( $\sigma_{pc}$ ) ou pré-adensamento e índice de compressão são parâmetros importantes, que podem ser obtidos a partir da curva de compressão e são utilizadas no cálculo da capacidade de suporte de carga do solo e a sua susceptibilidade à compactação, respectivamente (Reinert, 2003).

Um parâmetro para caracterizar a resistência do solo à compactação é a tensão de pré - compactação ( $\sigma_{pc}$ ) ou tensão de pré adensamento, a qual é determinada a partir da curva de compressão (índice de vazios e comparada logarítmica da tensão normal aplicada,  $\sigma$ ) obtida por meio do ensaios endométricos (Figura 1). A tensão de pré-adensamento é a tensão máxima que um solo foi submetido no passado, nas umidades determinadas no ensaio. A deformação é elástica para as tensões a abaixo da tensão pré-adensamento  $\sigma_{pc}$  e plástica acima da mesma. A reta acima da  $\sigma_{pc}$  se chama "reta de compressão virgem (VCL)". A inclinação da parte interna da curva de compressão é o "índice de compressão" (Larson et al., 1980).



**Figura 1.** Variação do índice de vazios e pressão aplicada no ensaio endométrico.

## **Modelos de compactação do solo**

### **Modelos pseudo-analíticos**

Segundo Defossez et al. (2003) os modelos de compactação do solo podem ser divididos em dois tipos: modelos pseudo-analíticos e modelos numéricos aproximados como por exemplo o método dos elementos finitos (MEF). No primeiro, o solo é considerado como um meio semi-infinito e elástico-plástico, comportando-se de forma elástica quando submetido a determinado nível de esforços e de forma plástica acima desse ponto (Lamandé e Schjønning, 2010). Os modelos pseudo-analíticos se derivam de Sohne (1953) que consiste na modelagem da distribuição dos esforços na área de contato, além do cálculo de tensão -  $\sigma_1$  - (tensão vertical) no solo. Os cálculos da propagação de esforços no solo estão fundamentados nas formulas de Frohlich (1934), que foram adaptadas da solução analítica de Boussinesq (1885), nelas se estabelece que o solo é homogêneo, isotrópico e elástico. A propagação do esforço principal  $\sigma_1$  no modelo de Boussinesq, assume o solo como um meio semi-infinito com modulo de Young (E) e coeficiente de Poisson ( $\mu$ ), quando submetido a uma carga (Defossez et al., 2003).

Aplicações do modelo pseudo-analítico foram feitas por vários autores, destacam-se o COMPSOIL desenvolvido por O'Sullivan, et al. (1999), onde calcula o esforço principal quando aplicada uma carga sobre uma área de contato circular. O modelo foi desenvolvido para ter como dados de entrada os parâmetros principais obtidos diretamente dos veículos: pressão de insuflagem, dimensões e tipo de pneu e carga por roda, além de poder selecionar parâmetros do solo que sejam adequados para descrever as condições de umidade e tipo de solo. Os resultados de saída do modelo são a variação da densidade do solo e a profundidade da trilha de roda.

Uma simulação do modelo pseudo-analíticos mais conhecida é a apresentado por Keller et al. (2007) que desenvolveu o modelo SoilFlex, o modelo permite fazer comparações diretas entre as relações de tensão-deformação; além de permitir simular diferentes configurações de rodas, permite fazer, simulações com um estado completo dos esforços no solo, o que inclui cisalhamento. Os dados de entrada do modelo são a configuração das rodas, as características do pneu, pressão de insuflagem e a carga por roda. As saídas do programa são as tensões no solo e a deformação do solo. Podem ser obtidos no SoilFlex os gráficos da variação da densidade do solo, a profundidade da trilha de roda e o estado completo de esforços no solo. Um outro é o de Schjonning et al. (2008) que desenvolveram o modelo chamado FRIDA, modificando as equações implementadas por (Keller et al., 2007) no seu modelo. O modelo surgiu a partir da necessidade de

modelar a área de contato na interface solo-pneu em função da dureza do solo, já que essa informação é escassa.

Aplicação do modelo no SoilFlex foram desenvolvidas por Lozano et al. (2013) na qual avaliou o efeito de três veículos: trator, caminhão e reboque utilizados na colheita da cana-de-açúcar. De maneira geral os modelos pseudo-analíticos se apresentam como uma ferramenta eficaz na predição das tensões no solo sob diversas condições e compactação ou não. Assim, resultados obtidos utilizando modelos pseudo-analíticos tem oferecido resultados satisfatórios convertendo-se em ferramentas simples para o monitoramento da compactação do solo (Keller e Arvidsson, 2004).

### **Modelos matemáticos**

Por outro lado, os modelos analíticos são mais aplicáveis na engenharia quando o problema analisado apresenta geometria simplificada, homogeneidade e isotropia. Já os modelos numéricos permitem uma análise mais complexa, com uma abordagem física mais realista e com a possibilidade de se considerar geometrias, heterogeneidade e anisotropia, bem como diferentes situações de carregamento do solo. Geralmente esses modelos se baseiam na mecânica dos meios contínuos, que é a parte da mecânica dos materiais que captura com maestria as relações tensão-deformação de diversos materiais (Chissolucombe, 2001).

A mecânica do contínuo admite que o material pode ser representado como um conjunto contínuo de partículas e permite o estudo do comportamento mecânico do material ao definir o estado de tensões de um meio poroso, as deformações e a relação tensão-deformação. Além disso, é necessário um estudo a nível constitutivo do material para que haja uma melhor análise na direção de uma física mais realista (Lai et al., 1993)

### **Formulação matemática do problema mecânico**

Os solos são considerados como meios porosos deformáveis, cujos vazios ou poros são em geral preenchidos por água (se totalmente saturado) ou ar (se totalmente seco), ou ocupados por água e ar (condição não saturada). O fato é que o solo consiste em um meio multifásico com um arranjo de sua matriz sólida (grãos) e vazios preenchidos por fluido.

Ao sofrer ação de forças externas, esta estrutura tende a ser alterada na direção da expansão ou compactação caracterizadas, respectivamente, pelo aumento e pela redução dos poros. Neste processo há o aumento ou a dissipação da pressão de poros o que afeta o estado de tensões atual do solo.

Portanto, a aplicação de esforços externos no meio leva à uma mudança de sua configuração devido à alteração do estado inicial de tensões ao qual está submetido, sendo esta mudança configurada pela deformação sofrida.

Consiste então em um problema de análise tensão-deformação, cuja relação entre estas duas variáveis se dá através de uma constante de proporcionalidade que corresponde à rigidez do material.

Para as soluções aproximadas para problemas mecânicos não-lineares, é necessária a definição da relação entre tensões e deformações do material. Estas, chamadas de relações constitutivas, empregam propriedades mecânicas constitutivas do material as quais são aplicadas através da definição de tensores constitutivos elásticos ou inelásticos para problemas multidimensionais.

De uma forma geral, as relações constitutivas são baseadas em duas categorias de modelos (Gomes, 2006):

- Modelos independentes do tempo: elasticidade e plasticidade;
- Modelos dependentes do tempo: visco-elasticidade e visco-plasticidade.

A elasticidade é base para os estudos do comportamento mecânico dos materiais, relacionando as tensões com as deformações através de propriedades elásticas como o Módulo de Elasticidade ou de Young ( $E$ ) e o coeficiente de Poisson ( $\nu$ ). Em uma análise unidimensional, a tensão se relaciona com a deformação diretamente através do Módulo de Young (Lei de Hooke) sendo esta propriedade entendida como uma constante de proporcionalidade. O fato é que estas são propriedades intrínsecas do material, por isso dão o caráter constitutivo às relações tensão deformação.

No caso da elasticidade, o material deforma proporcionalmente com as tensões aplicadas. Ou seja, uma vez cessadas as tensões, as deformações voltam ao seu valor inicial implicando em total recuperação da forma original do material. Na elastoplasticidade a resposta corresponde a uma parcela do real comportamento tensão-deformação de um solo, havendo assim um limite de tensão a partir do qual as deformações totais assumem uma parcela recuperável (elástica) e outra irreversível (inelástica ou plástica).

Com isso, observa-se que os solos apresentam um comportamento elastoplástico sendo este um processo combinado no qual o material exibe inicialmente um comportamento elástico cujo limite é definido por uma tensão de escoamento ou fluência  $\sigma_y$ . Dado que a tensão atuante exceda este limite o material passa a apresentar uma resposta

mecânica plástica caracterizada por deformações permanentes quando cessado ou reduzida a tensão atuante. Este comportamento depende do nível de tensões e independe do tempo.

Desta forma os modelos constitutivos mecânicos baseados na Teoria da Plasticidade (Olivella e Bosch, 2002; Davis e Selvadurai, 2002; Prat e Gens, 2003; Borja, 2013) se mostram como potenciais para a aplicação aos solos na simulação de comportamentos independentes do tempo (Pedroso, 2002).

### **A mecânica do contínuo**

A mecânica do contínuo (Chadwick, 1977; Valliapan, 1981; Lai et al., 1993) admite que o material pode ser representado como um conjunto contínuo de partículas e permite o estudo do comportamento mecânico do material ao definir o estado de tensões de um meio poroso, as deformações e a relação tensão-deformação. Além disso, é necessário um estudo a nível constitutivo do material para que haja uma melhor análise na direção de uma física mais realista.

Os modelos numéricos permitem uma análise mais complexa, com uma abordagem física mais realista e com a possibilidade de se considerar geometrias, heterogeneidade e anisotropia, bem como diferentes situações de carregamento (estático ou dinâmico), etc. O acoplamento entre fenômenos é outra vantagem destes métodos, como por exemplo análises hidromecânicas, hidroquímicas, termomecânicas, etc.

Destaca-se também que os modelos constitutivos em solos têm sido formulados com base em ensaios laboratoriais e com seu avanço associado em parte com o desenvolvimento dos modelos aproximados e técnicas numéricas a exemplo da técnica dos elementos finitos.

Em uma análise de comportamento mecânico devem ser observadas as leis constitutivas que regem o comportamento do material durante o regime elástico, um nível de tensões relacionado com o limite de escoamento ou a adoção de um critério de escoamento (superfície de fluência) e por fim, modelos constitutivos para o regime plástico do material.

Em resumo, é necessário definir o problema de equilíbrio, pela equação de equilíbrio de tensões, de cinemática através da relação deformação-deslocamento e das equações de compatibilidade e, por fim, a relação tensão-deformação através das relações constitutivas nas quais o problema elastoplástico é considerado.

A seguir apresenta-se a formulação matemática que governa o problema mecânico e também do modelo constitutivo empregado.

### **Equilíbrio: Equação de Equilíbrio de Tensões**

Uma vez que se admite que o solo encontra-se em equilíbrio, deve-se empregar, como equação governante do problema mecânico, a equação de equilíbrio de tensões (Equação 3) que é definida pelo divergente do tensor de tensões totais  $\boldsymbol{\sigma}$  somado ao vetor de forças de corpo  $\mathbf{b}$ :

$$\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \mathbf{b} = \mathbf{0} \quad (1)$$

Para uma análise puramente mecânica, o tensor de tensões já é o efetivo, uma vez que numa ótica de acoplamento hidromecânico, é como se admitir uma condição totalmente drenada do material em uma análise sem contabilizar a poropressão. Neste caso não é necessária a adoção do Princípio das Tensões Efetivas de Terzaghi na equação de equilíbrio.

### **Cinemática: Relação Deformação-Deslocamento**

De uma forma geral, aplica-se aqui a formulação de cinemática do meio contínuo, abordando apenas pequenos deslocamentos os quais não levam a problemas de não-linearidade e instabilidade geométrica. Neste caso defini-se uma relação entre o vetor de deformações infinitesimais  $\boldsymbol{\varepsilon}$  com os deslocamentos  $\mathbf{u}$  através da seguinte relação:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \frac{1}{2}(\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T) \quad (2)$$

Em solos as variações no estado de tensões provocada pelos esforços externos levam à ocorrência de deformações, tal como definido na equação anterior, decomposta em uma parte volumétrica, associada à compressão (compactação) ou expansão do solo devido às tensões normais, e uma parte desviadora que consiste na distorção por cisalhamento. A deformação volumétrica do solo pode ser definida, em termos dos deslocamentos, por:

$$\varepsilon_v = \nabla \cdot \mathbf{u} \quad (3)$$

Este parâmetro é diretamente utilizado na determinação da porosidade para cada incremento de tensões efetivas.



Portanto, a variação da porosidade ( $n$ ) pode ser calculada a partir da equação de conservação de massa de sólido sendo esta função direta das deformações volumétricas onde:

$$\frac{\partial}{\partial t} [(1-n)\rho_s] + \nabla [(1-n)\rho_s \cdot \mathbf{\dot{u}}] = 0 \quad (4)$$

Sendo  $\mathbf{\dot{u}}$  o vetor de velocidade de deslocamento da fase sólida e  $\rho_s$  a densidade da fase sólida.

Ao se aplicar à equação acima o conceito de derivada material com relação à fase sólida obtém-se a equação de variação de porosidade como função da compressibilidade e da deformação volumétrica do meio. Logo:

$$\frac{Dn}{dt} = \frac{(1-n)}{\rho_s} \frac{D\rho_s}{dt} + (1-n) \frac{d\varepsilon_v}{dt} \quad (5)$$

### **Relação Constitutiva Tensão-Deformação**

Como em todo material utilizado na engenharia, o solo, ao sofrer solicitações, irá se deformar, modificando o seu volume e forma iniciais. A magnitude das deformações irá depender não só dos parâmetros de deformabilidade do material e da magnitude do carregamento imposto, mas também da faixa de tensões de trabalho.

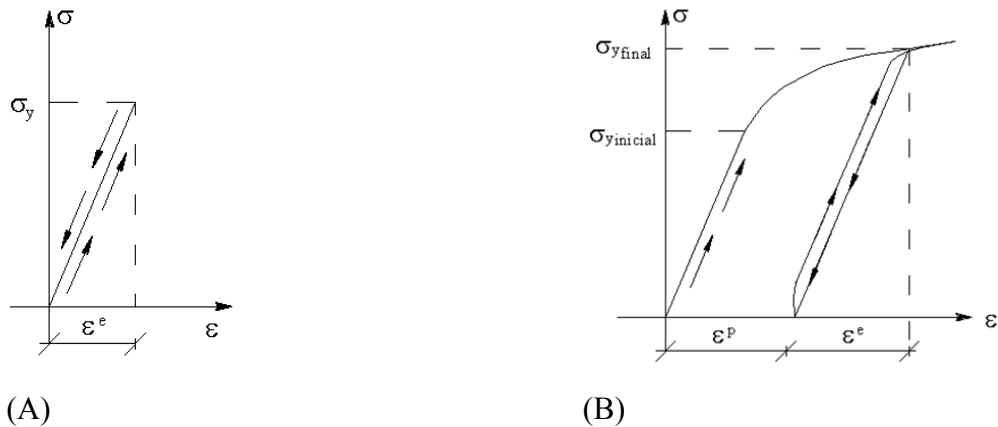
As relações constitutivas são particulares para cada material e servem para classificar os diversos materiais da engenharia conforme seu comportamento mecânico. Caracterizam as propriedades associadas à rigidez e à resistência dos materiais.

O comportamento tensão-deformação pode se apresentar como uma linha reta, tanto no carregamento quanto no descarregamento. Neste caso, o material é classificado como linear-elástico e seu comportamento é definido por duas constantes elásticas sendo estas o módulo de elasticidade  $E$  e o coeficiente de Poisson  $\nu$ .

No entanto, os solos apresentam um comportamento não linear, em que os módulos variam em função do nível de tensões. Isto se dá ao se atingir um nível de tensões que excede a máxima tensão que controla a resposta elástica. Neste caso, o material apresenta um maior incremento de deformações com uma menor variação de tensões. Ao se promover a descarga, o meio recupera apenas parte de sua forma original implicando assim na ocorrência de deformações irreversíveis ou também chamadas de plásticas.

Tem-se então uma resposta constitutiva elastoplástica, a qual leva a uma resposta mecânica mais realista do solo quanto à análise tensão-deformação.

A Figura 2 ilustra graficamente o comportamento elástico e elastoplástico de uma amostra de solo submetida a um ensaio de compressão uniaxial.



**Figura 2.** Resposta tensão-deformação para ensaio de compressão uniaxial: (A) comportamento elástico; (B) comportamento elastoplástico.

Verifica-se que o material apresenta uma resposta elástica linear enquanto a tensão não exceder o valor de limite elástico ( $\sigma_{y\text{inicial}}$ ). Uma vez que, o estado de tensões continue aumentando incrementalmente, este limite é superado e o material responde de forma não linear ou plástica. Ao descarregar-se haverá uma parcela de deformação residual ou plástica ( $\epsilon^p$ ) que é irreversível ou permanente, havendo apenas a recuperação parcial das deformações, ou seja, a deformação total ( $\epsilon$ ) será composta por uma parcela de deformação elástica ( $\epsilon^e$ ) e outra plástica ( $\epsilon^p$ ). A esta relação chama-se decomposição aditiva de deformações definida por:

$$\epsilon = \epsilon^e + \epsilon^p \quad (6)$$

As deformações plásticas são função da história de tensões do material e de suas propriedades de resistência ao cisalhamento, o que torna a teoria da elastoplasticidade mais complexa quando comparada à teoria da elasticidade.

Desta forma a composição de um modelo matemático elastoplástico envolve as definições dos itens listados a seguir:

- i. Relação tensão-deformação elástica
- ii. Domínio plástico
- iii. Lei de escoamento plástico e de endurecimento
- iv. Condições de complementaridade e consistência

### i.) Relação tensão-deformação elástica linear

A elasticidade linear é a lei que relaciona as tensões com as deformações de um material através de um parâmetro constitutivo, ou seja, de um parâmetro de proporcionalidade que envolve propriedades constitutivas ou intrínsecas de cada material. Em um caso unidimensional, esta constante consiste no módulo de elasticidade ou de Young ( $E$ ) através da Lei de Hooke.

Já para um estado multidimensional de tensões, na elasticidade linear relaciona-se um tensor de tensões  $\sigma$  com um tensor de deformações  $\epsilon^e$  através de um tensor constitutivo elástico  $\mathbf{D}_e$ .

$$\begin{aligned}\sigma &= \mathbf{D}_e \cdot \epsilon^e \\ \epsilon^e &= \mathbf{D}_e^{-1} \cdot \sigma\end{aligned}\tag{7}$$

O tensor elástico relaciona 9 componentes de tensão (normais e cisalhantes) com 9 componentes de deformação, sendo constituído então por 81 componentes.

Ao se admitir o material do contínuo como isotrópico e homogêneo, os tensores de tensão e deformação são simétricos e podem ser representados por meios de vetores de seis componentes sendo três normais e três cisalhantes:

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \sigma_{xy} \\ \sigma_{xz} \\ \sigma_{yz} \end{bmatrix} \quad \epsilon^e = \begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \\ \epsilon_{xy} \\ \epsilon_{xz} \\ \epsilon_{yz} \end{bmatrix}\tag{8}$$

Desta forma, o tensor  $\mathbf{D}_e$  é reduzido a 36 componentes. Este é definido em termos das duas propriedades constitutivas elásticas sendo estas o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson, ambas obtidas através dos ensaios mecânicos de laboratório. Logo, a relação tensão-deformação elástica linear fica expressa por:

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \sigma_{xy} \\ \sigma_{xz} \\ \sigma_{yz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2\mu + \lambda & \lambda & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & 2\mu + \lambda & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda & 2\mu + \lambda & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2\mu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2\mu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2\mu \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \varepsilon_{xy} \\ \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yz} \end{bmatrix} \quad (9)$$

Sendo as chamadas constantes de Lamé ( $\mu$  e  $\lambda$ ) definidas em termos de  $E$  e  $\nu$ , por:

$$\mu = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad \text{e} \quad \lambda = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (10)$$

Ao se considerar um estado plano de deformação, admite-se que a dimensão da estrutura (ou agente transmissor do carregamento externo) em uma direção (normal ao plano de análise) é muito grande em relação às demais dimensões nas outras direções normais ( $x$  e  $y$ ). Assim as forças são uniformemente distribuídas em relação à largura da estrutura e observa-se que  $\varepsilon_z = \varepsilon_{xz} = \varepsilon_{yz} = 0$  e  $\sigma_z = \nu(\sigma_x + \sigma_y)$ .

Portanto, com esta simplificação em relação à análise tridimensional, os tensores de tensões e de deformações apresentam apenas 3 componentes, e o tensor elástico  $\mathbf{D}_e$  9 componentes. A relação tensão deformação fica matematicamente expressa por:

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2\mu + \lambda & \lambda & 0 \\ \lambda & 2\mu + \lambda & 0 \\ 0 & 0 & 2\mu \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_{xy} \end{bmatrix} \quad (11)$$

## ii.) Domínio plástico

Em uma análise tensão-deformação de um ensaio de compressão, já discutido anteriormente, onde há uma tensão limite que dá a transição entre o limite elástico e o plástico para o material. Uma vez que a tensão atuante seja inferior a este valor, o material comporta-se de forma elástica. A partir do momento em que se atinge este valor, ocorre a plastificação.

Porém, na Teoria da Plasticidade multidimensional o limite elástico é representado, em um espaço de tensões principais, por meio de uma superfície de fluência (plastificação). Esta por sua vez é definida por meio de uma função de fluência  $F$  que

consiste em uma equação matemática formulada em termos o estado de tensões  $\sigma$  e de variáveis ou parâmetros plásticos  $\kappa$ . Os parâmetros plásticos são aqueles que podem sofrer variações em termos da alteração do estado de tensões e da ocorrência de deformações no regime plástico. Como exemplos podemos citar a tensão de pré-adensamento e índice de vazios do material, entre outros.

O critério de plastificação não permite que o estado de tensões assumam valores fora do espaço de tensões admissíveis, ou seja:

$$F(\sigma, \kappa) \leq 0 \quad (12)$$

A função de fluência é definida para diferentes modelos elastoplásticos, em função da formulação destes modelos que se baseiam em experimentos laboratoriais. Entre este pode-se citar os critérios clássicos de Tresca e Von Mises, bem como os modelos de Mohr Coulomb e Drucker-Prager, e também na teoria dos estados críticos o Modelo de CamClay Modificado, sendo este último o adotado no presente trabalho.

Logo, nos modelos elastoplásticos, quando  $F(\sigma, \kappa) < 0$ , o material apresenta um regime elástico e a relação entre as tensões  $\sigma$  e deformações  $\epsilon$  é dada pelo tensor elástico  $D_e$ . Se  $F(\sigma, \kappa) = 0$ , atinge-se a superfície de fluência e passam a ocorrer as deformações plásticas. Neste caso, os parâmetros plásticos sofrem variação ( $\kappa \neq 0$ ) ao contrário do que se observa em uma resposta elástica.

Portanto, ao se atingir a superfície de fluência, a relação do estado de tensões com as deformações totais se dá através de um tensor elastoplástico  $D_{ep}$  (Abbo, 1997; Potts e Zdravković, 1999).

Logo, considerando uma abordagem incremental, tem-se a relação constitutiva plástica dada por:

$$\dot{\sigma} = D_{ep} \dot{\epsilon} \quad (13)$$

Onde:  $\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}^e + \dot{\epsilon}^p$

### iii.) Lei de Escoamento Plástico (Regra de Fluxo) e Lei de Endurecimento

Denomina-se regra de fluxo ou Lei de escoamento plástico à uma equação evolutiva que determina o incremento de deformação plástica em termos do gradiente de uma função do potencial de plastificação  $P(\sigma, m)$  que define a direção do incremento de deformação no estado multiaxial de tensões (Potts e Zdravković, 1999).

A função de Potencial Plástico é equivalente à função de fluência, porém adota algum parâmetro de resistência do material como mais representativo do solo. Um exemplo é nos modelos de Mohr Coulomb, onde em relação à função de fluência o potencial plástico adota o ângulo de dilatância ao invés do ângulo de atrito interno do material.

A função de potencial plástico é, portanto, função das tensões e de um vetor de parâmetros de estado  $\mathbf{m}$ , e de um escalar chamado de multiplicador plástico  $\Lambda$ .

Portanto, a regra de Fluxo é caracterizada pela seguinte expressão:

$$\dot{\varepsilon}^p = \Lambda \frac{\partial P(\boldsymbol{\sigma}, \mathbf{m})}{\partial \boldsymbol{\sigma}} \quad (14)$$

Sendo  $\dot{\varepsilon}^p$  é o incremento de deformação plástica.

Através desta lei obtém-se a magnitude e a direção da deformação plástica onde está ocorre na direção paralela à do gradiente de potencial plástico. Assim, sua direção é dada pelo vetor normal à superfície  $P(\boldsymbol{\sigma}, \mathbf{m})$ .

A análise elastoplástica pode ser realizada considerando uma abordagem mais simplificada quanto à direção da deformação plástica. Neste caso, pode-se adotar que a função de fluência e a de potencial plástico  $F(\boldsymbol{\sigma}, \kappa) = P(\boldsymbol{\sigma}, m)$  sejam iguais e assim tem-se uma análise de plasticidade associada. Com isso há uma superestimação da deformação plástica e da variação volumétrica do material quando comparado ao que se observa na realidade em virtude de o ângulo de atrito ter seu valor sempre maior que o ângulo de dilatância. Já no caso contrário, tem-se a plasticidade não-associada.

#### iv.) Condições de complementaridade e consistência

Para completar o modelo matemático elastoplástico é necessário satisfazer as chamadas condições de condições de complementaridade e de consistência (persistência) de Kuhn-Tucker.

Tais condições são formuladas considerando os conceitos da regra de fluxo relacionando o multiplicador plástico (também chamado de parâmetro de consistência)  $\Lambda$  com a função de fluência (no caso da plasticidade associada) de forma que as equações abaixo devem ser satisfeitas:

$$\dot{\Lambda} \geq 0; F(\boldsymbol{\sigma}, \kappa) \leq 0 \rightarrow \dot{\Lambda} F(\boldsymbol{\sigma}, \kappa) = 0 \quad (15)$$

$$\dot{\Lambda} \cdot \dot{F}(\boldsymbol{\sigma}, \kappa) = 0 \quad (16)$$

Através destas equações e empregando algumas operações algébricas determina-se o multiplicador plástico  $\Lambda$ .

### Modelo constitutivo CamClay Modificado

Dentre os modelos constitutivos elástico-plásticos, o modelo de Camclay Modificado foi proposto por Roscoe e Burland (1968) e descreve três aspectos importantes relacionados com o comportamento mecânico dos solos sendo eles a resistência ao cisalhamento, a compressão (compactação) ou a dilatância (expansão por cisalhamento) e é formulado com base na Teoria do Estado Crítico. Tal modelo pode ser considerado como mais realista pelo fato de reproduzir uma resposta de deformação do solo para múltiplas trajetórias de tensão. É um modelo que permite analisar o solo em termos da tensão média, da desviadora e do volume específico do material.

O estado crítico consiste no comportamento do solo no qual este apresenta deformações plásticas cisalhantes (distorção) sem que haja variação de volume ou de tensões, ou seja, a variação das tensões média, desviadora e do volume específico em relação às deformações plásticas cisalhantes é nula.

O modelo elastoplástico de CamClay Modificado considera o endurecimento isotrópico do material e plasticidade associada. A função de fluência deste modelo pode ser expressa em termos de dois invariantes de tensão definidos como função da tensões efetivas principais  $(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$ , sendo estes a tensão média  $p$ , a tensão desviadora  $q$ , dados por:

$$p = \frac{I_1}{3} = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (17)$$

$$q = (\sigma_1 - \sigma_3) \quad (\textit{ensaio triaxial convencional}) \quad (18)$$

Potts e Zdravković (1999) discorrem que a tensão média representa o confinamento da amostra (compressão), a tensão desviadora representa o cisalhamento da amostra (comportamento cisalhante do material).

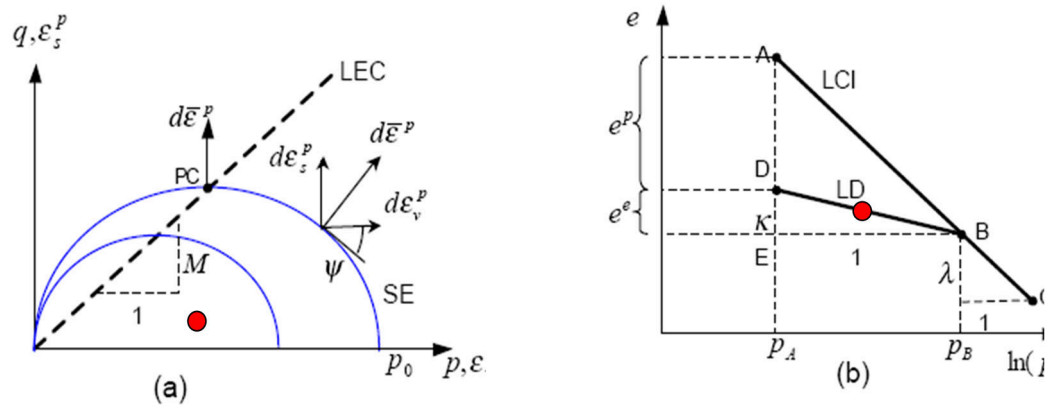
A função de fluência no plano  $p$ - $q$  caracteriza uma elipse limitada pela tensão de pré-adensamento  $p_0^*$ , dada por:

$$F(\boldsymbol{\sigma}, p_0^*) = \frac{q^2}{p^2} + M^2 \left( 1 - \frac{p_0^*}{p} \right) \quad (19)$$

O parâmetro  $M$  (constante de atrito ou fricção) consiste na declividade da LEC (Linha de Estados Críticos). Este é definido pela declividade de uma reta no espaço  $p$ - $q$  a qual é ajustada aos pontos de estado crítico obtidos em ensaios de laboratório. O parâmetro  $M$  pode ser determinado diretamente em função do ângulo de atrito interno  $\phi$  do material por:

$$M = \frac{6 \operatorname{sen} \phi}{3 - \operatorname{sen} \phi} \quad (\text{ensaio decompressão triaxial}) \quad (20)$$

A LEC intercepta a superfície de fluência, no espaço  $p$ - $q$ , no ponto de máximo de  $q$ . Admite-se neste modelo o comportamento mecânico de um material submetido a um carregamento de compressão drenada, isotrópico ( $\sigma'_1 = \sigma'_2 = \sigma'_3$ ), que se move ao longo da reta de compressão virgem ou linha de adensamento isotrópico (LCI), com inclinação  $\lambda$ , no espaço  $v$ - $p$ , sendo ( $v$ ) o volume específico definido em termos do índice de vazios ( $e$ ), onde  $v = 1 + e$ . Neste caso parte-se de um estado de tensões inicial elástico (Figura 3), ao longo de uma linha de descarga (LD).

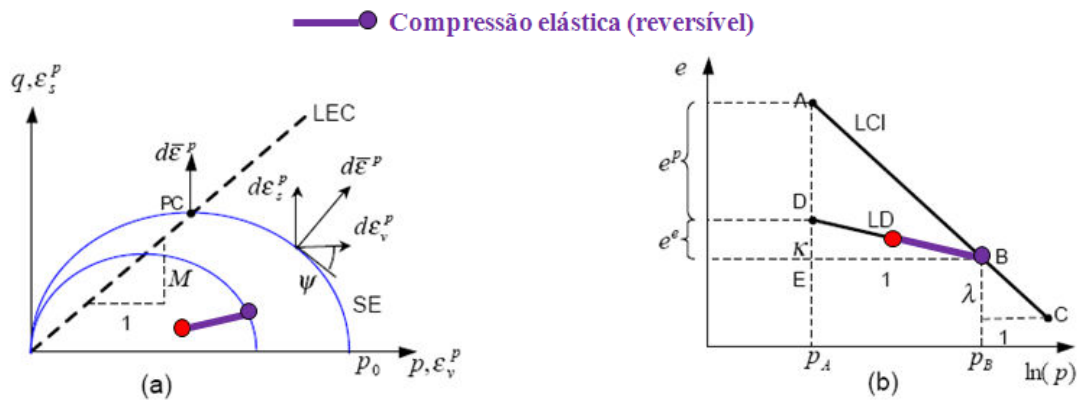


● Estado de tensões efetivas inicial

**Figura 3.** Estado inicial de tensões no modelo CamClay Modificado: (A) Superfície de Fluência; (B) Curva de Carga-Descarga do ensaio edométrico. Fonte: Gomes (2009).

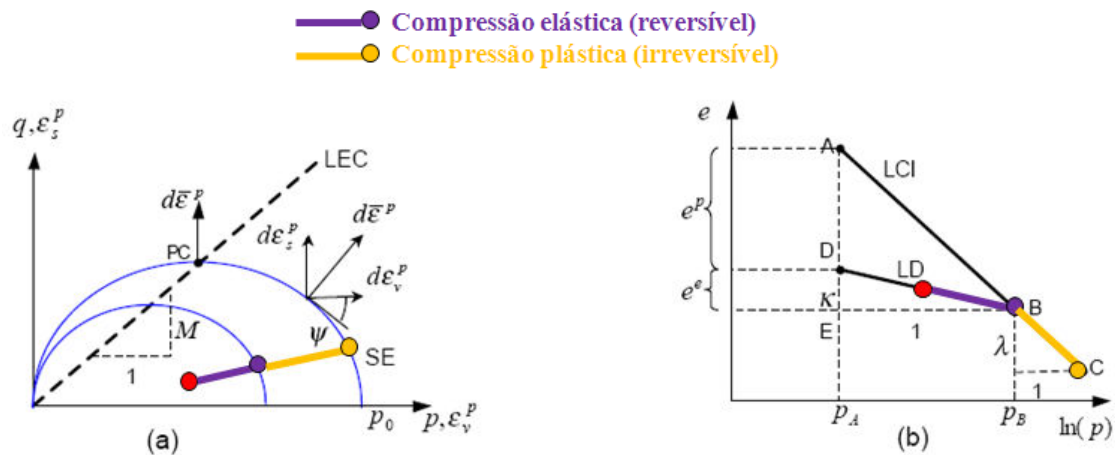
Ao se carregar o material o mesmo segue a trajetória da linha de decompressão (LD) de inclinação  $\kappa$ , desenvolvendo deformações elásticas  $\varepsilon^e$  estando o estado de tensões ainda no interior da superfície de fluência (Figura 4A) porém com uma trajetória seguindo na direção da fronteira (limite elástico). Neste caso, tem-se as tensões seguindo sua trajetória ao longo da LD, em uma compressão elástica, na direção da LCI (Figura 4b).





**Figura 4.** Compressão elástica no modelo CamClay Modificado: (a) Superfície de Fluência; (b) Curva de Carga-Descarga do ensaio edométrico. Fonte: Gomes (2009).

Ao se exceder o limite elástico do material, segue-se uma trajetória ao longo da LCI (Figura 5b). Neste caso a variação volumétrica é irreversível ou plástica. O material sob compressão sofre compactação e suas propriedades de resistência aumentam caracterizando-se assim um processo de endurecimento (*hardening*) isotrópico. Isto implica na expansão isotrópica da superfície de fluência definida pelo aumento da tensão de pré-adensamento em virtude do histórico de tensões (trajetória). A tensão de pré-adensamento é a máxima tensão média efetiva já sofrida pela rocha, sendo a variável de história do modelo CamClay Modificado que controla o tamanho da superfície de fluência.



**Figura 5.** Compressão plástica no modelo CamClay Modificado: (a) Superfície de Fluência; (b) Curva de Carga-Descarga do ensaio edométrico. Fonte: Gomes (2009).

O modelo pode capturar comportamentos distintos a partir do ponto PC (ponto no qual a LEC intercepta a superfície de fluência). Com relação a este ponto a deformação plástica pode ter sua direção e sentido alterados no espaço  $p$ - $q$ . Quanto a trajetória de

tensões toca a superfície à esquerda do ponto PC, observa-se a expansão do solo que consiste na **dilatância** do material, o que é caracterizado pela deformação plástica volumétrica  $\varepsilon_v^p$  negativa. Já se a trajetória de tensões toca a superfície à direita do ponto PC, observa-se a compressão plástica do solo com  $\varepsilon_v^p$  positivo (Gomes, 2009).

As linhas de compressão virgem e de descompressão são assumidas como retas no espaço  $e-\ln p$  sendo definidas por:

$$e + \lambda \ln(p) = e_1 \quad (21)$$

$$e + \kappa \ln(p) = e_2 \quad (22)$$

Onde, na Figura 5b,  $e_1$  é o índice de vazios específico para  $p=p_A$  e  $e_2$  para  $p=p_B$ .

Os parâmetros  $\kappa$  e  $\lambda$  que dão as declividades das retas de descompressão e de compressão virgem, respectivamente, podem ser obtidas em termos dos coeficiente de recompressão ( $C_s$ ) e de compressão ( $C_c$ ) obtidos em ensaios de adensamento. Estas relações são dadas por:

$$\lambda = C_c / 2,3 \quad (23)$$

$$\kappa = C_s / 2,3 \quad (24)$$

Ao longo da linha de descompressão, o comportamento elástico do solo leva à ocorrência de deformação volumétrica elástica  $\varepsilon_v^e$  definida por:

$$d\varepsilon_v^e = \frac{\kappa}{1+e} \frac{dp}{p} \quad (25)$$

Esta relação permite a determinação do módulo elástico volumétrico  $K$  que consiste em um parâmetro não-linear obtido por meio do ensaio edométrico. Logo:

$$K = \frac{1+e}{\kappa} p \quad (26)$$

Na resposta plástica, o comportamento de Endurecimento/Amolecimento é controlado pela tensão de pré-adensamento  $p_0^*$  como função da deformação volumétrica plástica  $\varepsilon_v^p$ , onde:

$$\frac{dp_0^*}{p_0^*} = d\varepsilon_v^p \cdot \frac{1+e}{\lambda - \kappa} \quad (27)$$

Como já discutido neste trabalho, a direção da deformação plástica  $\varepsilon^p$  é dada pela Regra de Fluxo Plástico por meio do produto entre o multiplicador plástico  $\Lambda$  com o gradiente do potencial plástico em relação à tensão. No caso de plasticidade associada tem-se:

$$\varepsilon^p = \Lambda \frac{\partial G(\boldsymbol{\sigma}, P_0^*)}{\partial \boldsymbol{\sigma}} = \Lambda \frac{\partial F(\boldsymbol{\sigma}, P_0^*)}{\partial \boldsymbol{\sigma}} \quad (28)$$

Por fim, completa-se a definição do modelo de CamClay Modificado ao se determinar a expressão do multiplicador plástico e do tensor elastoplástico. Segundo Potts e Zdravković (1999) estes parâmetros podem ser definidos por:

$$\Lambda = \frac{\mathbf{n}^T \mathbf{D}_e d\boldsymbol{\varepsilon}}{\mathbf{n}^T \mathbf{D}_e \mathbf{n}_G + H} \quad \rightarrow \quad H = -\lambda \frac{\partial F}{\partial P_0^*} \frac{(1+e)P_0^*}{\lambda - \kappa} \quad \text{e} \quad \mathbf{n}_G = \frac{\partial G}{\partial \boldsymbol{\sigma}} \quad (29)$$

$$d\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{D}_e (d\boldsymbol{\varepsilon} - d\varepsilon^p) = \mathbf{D}_e (d\boldsymbol{\varepsilon} - \lambda \mathbf{n}_G) \quad (30)$$

$$d\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{D}_e \left[ \mathbf{I} - \frac{1}{\mathbf{n}^T \mathbf{D}_e \mathbf{n}_G + H} \mathbf{n}_G \mathbf{n}^T \mathbf{D}_e \right] d\boldsymbol{\varepsilon} \quad \rightarrow \quad \mathbf{D}_{ep} = \mathbf{D}_e \left[ \mathbf{I} - \frac{1}{\mathbf{n}^T \mathbf{D}_e \mathbf{n}_G + H} \mathbf{n}_G \mathbf{n}^T \mathbf{D}_e \right] \quad (31)$$

### Método elementos finitos

Os desenvolvimentos da teoria da plasticidade empregando o Método dos Elementos Finitos é amplamente abordado em trabalhos como Hinton e Owen (1977), Zienkiewicz e Pande (1977), Bathe (1996), Abbo (1997), Simo e Hughes (1998), Potts e Zdravković (1999), Souza Neto et al. (2008) entre outros.

Dentre os modelos constitutivos elastoplásticos clássicos destacam-se os critérios de Tresca e Von Mises, sendo estes os pioneiros, bem como os critérios de Mohr Coulomb e Drucker Prager (Alonso et al., 1990; Abbo, 1997; Potts e Zdravković, 1999). Os dois últimos consistem em modelos mais realistas na representação do comportamento elastoplástico de solos uma vez que são definidos em termos das tensões efetivas e empregam propriedades mecânicas efetivas do material que podem ser obtidas diretamente através de experimentos laboratoriais como os ensaios triaxiais.

Porém, estes modelos são mais apropriados, em sua formulação clássica, a problemas envolvendo cisalhamento do material. Alguns problemas envolvendo o estudo do comportamento mecânico dos solos podem ser mais bem analisados ao se adotar um

modelo elastoplástico que consiga reproduzir o comportamento mecânico do meio sob qualquer trajetória tridimensional de tensão (tração, cisalhamento e compressão). Neste caso o modelo de CamClay Modificado é um que atende a esta situação. Este é descrito por Schofield e Wroth, (1968), Gens e Potts (1988) e Davis e Selvadurai (2002), entre outros.

#### 4. MATERIAIS E METODOS

##### Área de estudo e Amostragem

A área de estudo foi a zona da mata norte pernambucana, a qual possui uma expressiva produção de cana de açúcar em relação ao território nacional, onde está situada a Estação Experimental de Cana-de-açúcar de Carpina (EECAC) da UFRPE, onde predominam solos muito intemperizados, de diferentes composições físicas, químicas e mineralógicas. Estas áreas apresentam características edafoclimáticas distintas, quanto a solo, relevo e precipitação pluvial, conforme detalhadas por Koffler et al. (1986) que caracterizaram a Zona da Mata de Pernambuco em 5 regiões edafoclimáticas: Norte, Litoral Norte, Centro, Sul e Litoral Sul.

O solo foi o Argissolo Amarelo distrocoeso, caracterizado na Tabela 1, utilizadas 6 amostras coletadas por Tavares (2016) em setembro de 2014 na Estação Experimental de Cana-de-açúcar de Carpina (EECAC) da UFRPE após a renovação do canavial. Antes da renovação, a área havia sido cultivada com cana-de-açúcar por 5 anos. A renovação se deu com sulcagem e gradagem do solo.

**Tabela 1.** Caracterização física do Argissolo Amarelo distrocoeso sob cultivo de cana-de-açúcar (Tavares, 2016).

	Argila	Areia fina	Areia grossa	Silte	LP	LL	IP	$w_{prep}$
	g. kg <sup>-1</sup>	g. kg <sup>-1</sup>	g. kg <sup>-1</sup>	g. kg <sup>-1</sup>	%	%	%	%
0,00-0,20 m								
T1	127,50	216,14	516,13	139,20	16,3	20,4	4,0	
T2	133,33	212,80	506,00	142,50	16,245	20,49	4,245	13,74
0,20-0,40 m								
T1	129,33	219,60	504,93	143,63	16,03	20	3,97	
T2	146,25	206,13	530,50	117,13	16,18	21,595	5,42	

LP – limite de plasticidade; LL – limite de liquidez; IP – índice de plasticidade;  $w_{prep}$  – umidade do solo durante o preparo; T1 – antes do preparo; T2 – após o preparo

A gradagem foi realizada com trator Massey Ferguson 4292 com arado de disco acoplado fabricante Baldan, modelo bia, com 16 discos de 30 cm de diâmetro e a sulcagem com o trator John Deere 6405 com o implemento sulcador de cana de três linhas fabricante Baldan modelo bia, com espaçamentos de 1,10 m e profundidade de trabalho de 30-40 cm.

## Ensaio de compressibilidade

Após a coleta das amostras (Tavares, 2016) com uso de anéis metálicos de 0,025 m de altura e 0,065 de diâmetro. As amostras foram submetidas ao ensaio de compressão uniaxial, utilizando-se para tal, uma prensa de adensamento, tipo Bishop, da Solotest. Foram aplicadas cargas sucessivas e contínuas, equivalente às pressões de 12,5; 25; 50; 100; 200; 400; 800; e 1600 kPa, durante 2 min, momento em que foi realizada a leitura, para cada uma das cargas, conforme MB-3336 da ABNT (1990). Logo após, as amostras foram encaminhadas à estufa para secagem a 105 °C, durante 24 h e determinação da umidade da amostra. Para Obtenção dos parâmetros mecânicos após o ensaio de compressibilidade os dados foram utilizado o Compress (Reinert et al., 2003), onde foi obtido os tensão de pré adensamento  $p_0^*$ , porosidade ( $n$ ), índice de vazios inicial ( $e_0$ ), índice de compressão ( $C_c$ ) e índice de re-compressão ( $C_s$ ). Os parâmetros  $\kappa$  e  $\lambda$ , declividades das retas de descompressão e de compressão virgem, respectivamente, foram determinados a partir das medidas de  $C_s$  e  $C_{parâmetros}$  mecânicos, optando pelo método de Casagrande para determinação dos valores de tensão de pré-consolidação. As umidades volumétricas utilizadas para a simulação são referentes as umidades de capacidade de campo (CC) 10% e saturação 20%, como não foi possível utilizar o ponto de murcha permanente se utilizou uma umidade intermediaria de 15%.

Na Tabela 2 os parâmetros mecânicos fornecidos pelo software Compress (Reinert et al., 2003) que serviu de input para a simulação no programa CODE\_BRIGTH (Olivella et al., 1995 e Olivella et al.,1994).

**Tabela 2.** Propriedades dos solos para INPUT do Modelo CamClay Modificado.

Propriedades	Profundidade das camadas (cm)					
	0-20	20-40	0-20	20-40	0-20	20-40
	Umidade 10%		Umidade 15%		Umidade 20%	
Porosidade inicial ( $n$ )	0,436	0,372	0,410	0,386	0,466	0,390
Coefficiente de Poisson ( $\nu$ )	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
Tensão de pré-adensamento $p_0^*$ (MPa)	0,055	0,0581	0,0558	0,0635	0,032	0,037
Declividade da reta de descompressão ( $\kappa$ )	0,0310	0,0162	0,0240	0,0682	0,0682	0,0582
Declividade da reta virgem ( $\lambda$ )	0,0783	0,0565	0,0692	0,0435	0,1090	0,1090
Declividade da LEC ( $M$ )	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6
Índice de vazios inicial ( $e_0$ )	0,774	0,594	0,703	0,628	0,871	0,64

### **Cargas dos Veículos utilizados na simulação**

Os veículos escolhidos para simular situações reais dentro do canal correspondem aos utilizados pela Usina Santa Teresa durante as operações de colheita da cana-de-açúcar. Neste aspecto, foram escolhidos os equipamentos que transmitem as maiores cargas ao solo para posteriormente discutir seu manejo e influência no processo de compactação. Foram então para as simulações um Caminhão tipo cavalo mecânico extra-pesado, para transporte de cana com tração 6x4 (referência LS-2638 da Mercedes-Benz), o conjunto Trator Reboque (MF 650 4X4 TDA – Reboque Cana Inteira de 2 eixos sobre chassi canavieiro), assim como o conjunto Caminhão-Reboque. Estes veículos estão esquematizados, Figura 6, onde são indicadas as respectivas cargas por eixo.

Os pneus utilizados pelo Caminhão foram Goodyear da referência G677 MSD 11.00R22 152/149. A configuração de rodas tandem duplas do Caminhão tem uma distância entre rodas (espaço vazio entre as rodas) de 12 cm e uma distância entre os eixos tandem de 1,45 m. No caso do Trator utilizaram-se pneus Goodyear 14.9-26 10 Dyna Torq II no eixo dianteiro e da referência Goodyear 23.1-30 12 Dyna Torq II para o eixo traseiro. A referência de pneus utilizada pelo Reboque canavieiro foi a Goodyear PLG8 10.00-20 146/143, utilizando uma distância entre as rodas duplas de 10 cm.

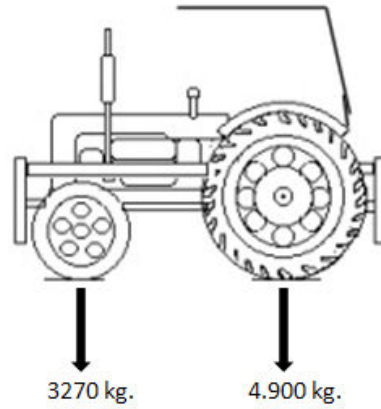
### **Tensões aplicadas**

Como o programa CODE\_BRIGHT (Olivella et al., 1995 e Olivella et al., 1994) utiliza a tensão final transmitida ao solo foi utilizado as tensões encontradas por Lozano et al. (2013), simuladas pelas cargas dos veículos (Tabela 3), utilizando o programa Soilflex (Keller et al., 2007), o qual utiliza o conceito da equação da superelipse e relaciona a pressão de insuflagem encontrada nos pneus, como descreve Keller et al. (2007).

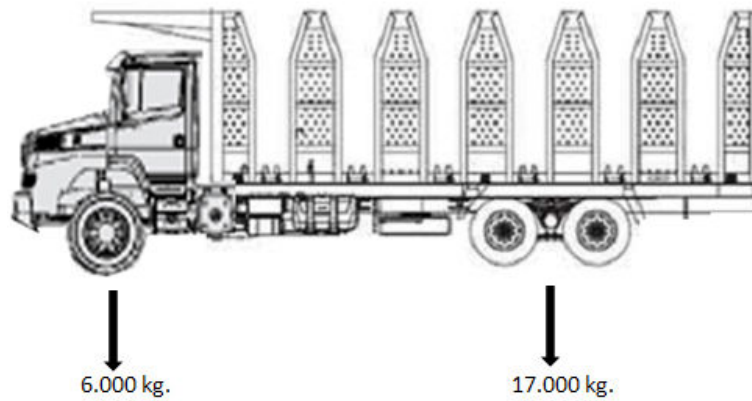
**Tabela 3.** As tensões aplicadas nas umidades (A) 15 e 20% e B para 10% de umidade (Lozano et al., 2013).

Veículos utilizados	Tensão kPa	
	A	B
Roda dianteira trator	175	190
Roda traseira do trator	145	150
Roda dianteira caminhão	520	600
Roda traseira caminhão	445	530
Roda reboque	630	750

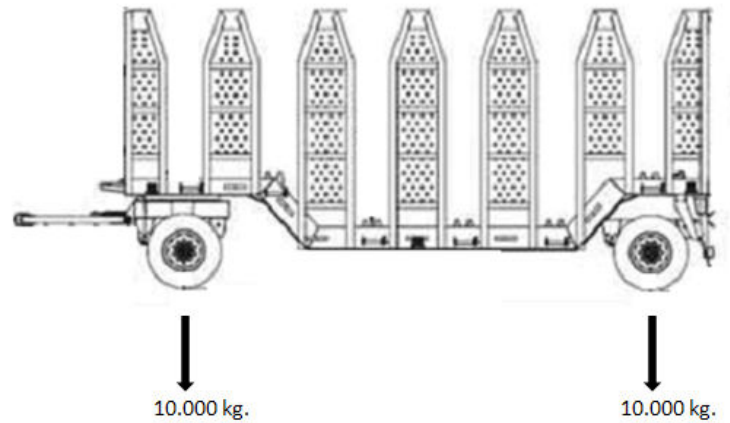
A.



B.



C.



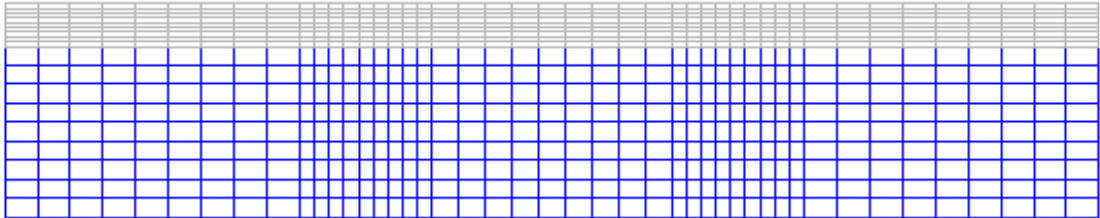
**Figura 6.** Cargas por eixo de Trator (A); Caminhão (B) e Reboque canaveiro (C).

### Malhas utilizadas

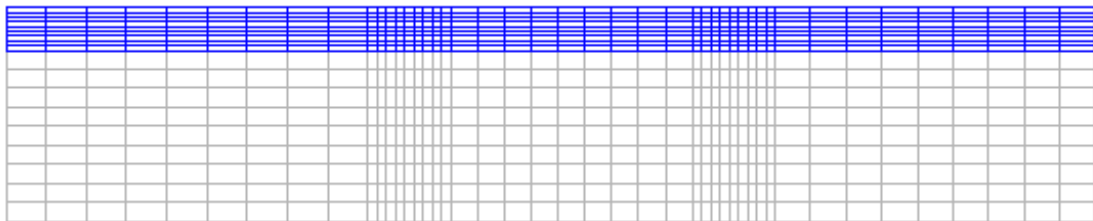
As malhas foram feitas utilizando o Programa GID 2009, com uso de malhas estruturadas com elemento retangular para todos os tipos de configuração de eixo, respeitando a distância entre rodas e o tamanho da mesma (Figura 7). Para a camada de 0-20 e 20-100 foram utilizadas as porosidades e demais parâmetros mecânicos obtidos nos ensaios de compressibilidade descrito a cima, por isso a diferença de cores nas duas

camadas geradas pelo programa (Figura 7); havendo uma discretização maior na região até 20 cm, a baixo da roda.

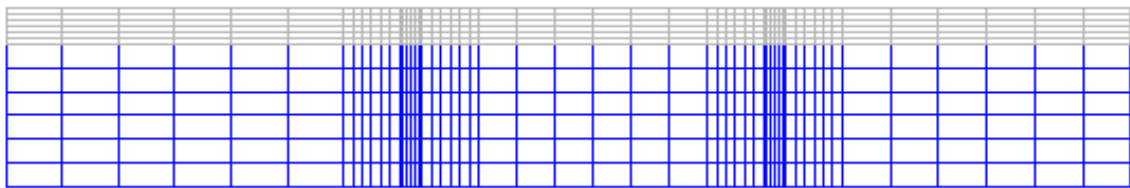
A.



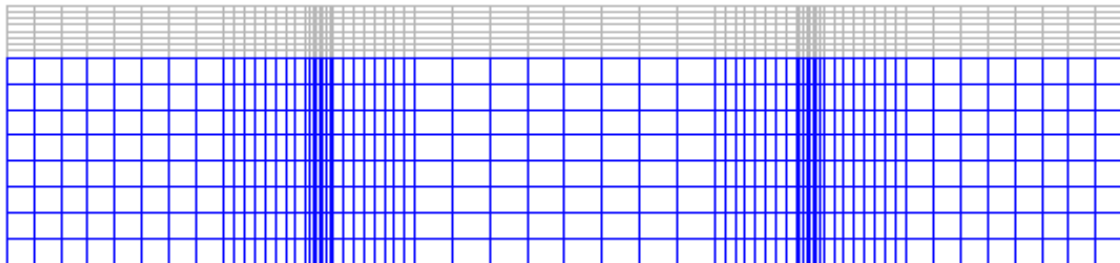
B.



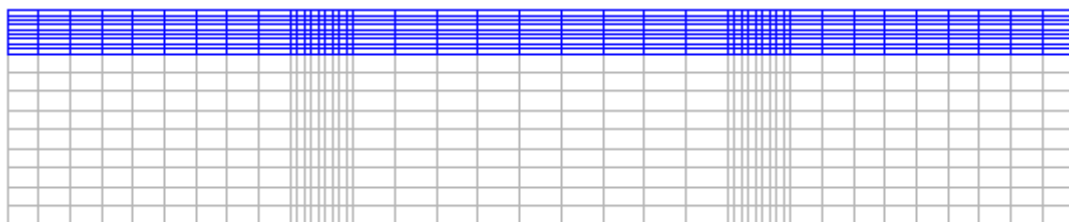
C.



D.



E.



**Figura 7.** Malhas feitas com as mediadas de rodas e espaço entre rodas para (A) eixo traseiro do trator, (B) eixo dianteiro do trator, (C) eixo traseiro do caminhão, (D) eixo dianteiro do caminhão e (E) eixo do reboque.



Por fim, para se completar o modelo foram prescritas as condições de contorno que consistem basicamente na restrição de deslocamentos nos contornos que delimitam a região analisada com o resto do solo da região (ex: laterais e base do domínio), uma vez que é tomada uma região representativa de toda a extensão de solo agrícola do campo. Outra condição de contorno prescrita está relacionada com a tensão transmitida pelos pneus à superfície do solo. Neste caso, para cada máquina analisada foram aplicadas tensões correspondentes em contatos definidos pela largura dos pneus.

### **Pré-processamento do problema simulado**

Com todo este processo realizado, foi gerado um arquivo de saída do programa GID com a compilação de todas estas informações, ou seja, a numeração e coordenadas dos nós e elementos e condições de contorno existente. Através de sub-rotina construída via programa MATLAB, lê-se o arquivo de saída e o converte nos três arquivos de entrada (*inputs*) do programa CODE\_BRIGHT, sendo eles os arquivos root\_gen.dat, root\_gri.dat e root.dat.

Cada um destes três arquivos contém, dentro de um formato fixo, todas as informações necessárias para serem processadas pelo programa em elementos finito adotado. Estas informações consistem em informações da geometria e da malha de elementos finitos, propriedades dos materiais e condições de contorno, tolerâncias de Newton Raphson e códigos de seleção de tipos de análises.

### **Descrição do programa em elementos finitos CODE\_BRIGHT**

Assim concluídos, os três programas para input estes estão prontos para serem processados; foi aplicado o código numérico *in house* CODE\_BRIGHT (***CO*upled *DE*formation *BR*ine *Gas* and *Heat* *T*ransport**) descrito por Olivella et al. (1994) e Olivella et al. (1995), que consiste em um programa em elementos finitos desenvolvido para a simulação de análises de problemas geotécnicos e ambientais. Esta ferramenta permite soluções considerando diferentes níveis de acoplamento (análises termo-hidro-mecânicas e geoquímicas) em uma abordagem multifísica (Gens et al., 2002; Guimarães, 2002).

No programa o solo é tratado como um meio poroso, composto de uma fase sólida, uma fase aquosa (água) e uma fase não aquosa (ar). Em uma análise acoplada hidromecânica, todas as fases podem coexistir quando em uma análise de fluxo multifásico (água-ar), como por exemplo para análises envolvendo solos não saturados, ou apenas a fase sólida e a líquida, como no caso de solo saturado. Porém no presente trabalho, os

estudos realizados envolvem apenas uma análise puramente mecânica, onde apenas as equações governantes do problema mecânico são resolvidas, ou seja, não se analisa condições de água no solo.

A formulação matemática multifísica encontra-se implementada num código computacional em elementos finitos, onde o seu módulo geomecânico compreende uma biblioteca de modelos constitutivos para solos e rochas, sendo estes: modelos elasto-plásticos clássicos como os modelos de Mohr-Coulomb, Tresca, Drucker Prager e Von Mises (Alonso et al., 1990; Sousa, 2004; Gomes, 2006), bem como baseados na teoria de estados críticos como os modelos de CamClay Modificado (para solos saturados) e o Barcelona Basic Model *BBM*, para solos não saturados (Gens e Potts, 1988; Gens e Nova, 1993).

O `CODE_BRIGHT` permite a realização de análises unidimensionais, bidimensionais (deformação plana ou com simetria axial) e tridimensionais utilizando elementos finitos de vários tipos como triângulo linear (3 nós) e quadrático (6 nós), quadriláteros, hexaedros e tetraedros, para malhas estruturadas e não estruturadas. Nele, todas as equações acopladas, quando discretizadas, são resolvidas simultaneamente pelo método de Newton-Raphson.

Adotou-se uma análise puramente mecânica em elastoplasticidade, considerando um modelo constitutivo baseado na teoria dos estados críticos sendo este o modelo de CamClay Modificado. As simulações são feitas para cenários bidimensionais, em análise de deformação plana, adotando-se elemento do tipo quadrilátero de 4 nós.

### **Pós-Processamento do problema simulado**

Após a conclusão da simulação numérica, são gerados arquivos de saída (*outputs*) pelo programa `CODE_BRIGHT` os quais contém as informações de evolução de cada variável com o tempo, para cada interação numérica. Entre as variáveis destaca-se aqui o campo de deslocamentos, o tensor de tensões, os invariantes de tensões, o índice de vazios, porosidade, a tensão de pré-adensamento, entre outras.

Com isso passa-se à etapa de Pós Processo que consiste basicamente em tratar os resultados para se proceder com a análise.

As distribuições das variáveis ao longo do domínio, considerando uma configuração deformada ou não, foram executadas no programa `GID`. Neste também foram obtidos gráficos evolutivos de variáveis para a construção de curvas que relacionem variáveis de interesse. A partir destes os pontos dos gráficos foram exportados e lidos em sub-rotinas

executadas em MATLAB para a geração das Figuras a serem apresentados nos resultados e para os quais os comentários e discussões foram realizados. Na Figura 8, o fluxograma detalha todo o processo.

### Validação do modelo

A partir dos dados de laboratório foram obtidos os parâmetros do solo importantes para o Modelo CamClay Modificado (Tabela 2), utilizando o software Compress (Reinert et al., 2003). Para a tensão de pré-adensamento optando-se pelo método de Casagrande. Para simulação de diversos cenários foram utilizados parâmetros mecânicos para umidade volumétricas de capacidade de campo (CC) 10% e saturação 20%, como não foi possível utilizar o ponto de murcha permanente se utilizou uma umidade intermediária de 15%.

Duas propriedades foram estimadas para os materiais em virtude de não se ter neste trabalho ensaios que quantificassem o ângulo de atrito e o módulo cisalhante do solo. Foram estas o parâmetro  $M$ , que é função direta do ângulo de atrito interno, e o coeficiente de Poisson que pode ser empregado em substituição do módulo cisalhante do material. As propriedades empregadas nas análises são as apresentadas na Tabela 2.

Para quantificar a aproximação do código numérico empregado através da comparação entre os resultados numéricos e os experimentais, empregou-se o cálculo de erro relativo, uma vez que se apresenta mais adequado a este tipo de verificação que meramente o erro absoluto. O erro relativo consiste na relação entre o erro absoluto (diferença absoluta entre eles).

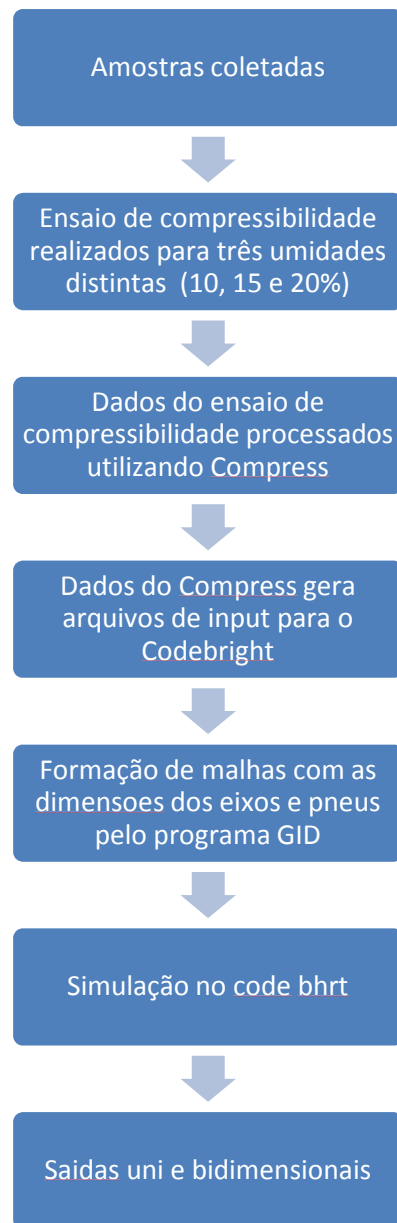
O erro relativo  $E_{rel}$  é função do erro absoluto  $E_{abs}$  em cada ponto de análise ao longo da curva  $e$ - $\log \sigma$ , sendo estes dados por:

$$E_{rel} = \frac{|P - \tilde{P}|}{|P|} \quad (32)$$

$$E_{abs} = |P - \tilde{P}| \quad (33)$$

O erro considerado nas análises é o erro médio calculado pela média aritmética do erro relativo em termos no número de medidas  $N$  de cada ensaio. Logo:

$$\bar{E} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N E_{rel,j} \quad (34)$$



**Figura 8.** Fluxograma dos procedimentos da modelagem.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

### Validação do modelo CanCley Modificado no programa CODE\_BRIGTH

Na Figura 10, os resultados das simulações numéricas do ensaio edométrico, para as amostras de solo nas camadas de 0-20 e 20-40 cm, para as umidades 10%, 15% e 20%. Observa-se que há uma boa aproximação dos resultados numéricos em relação aos obtidos nos ensaios experimentais, com erros médios inferiores a 5% (Tabela 4).

A diferença entre as curvas, que levam aos erros calculados, se deve ao fato de não se empregar uma análise acoplada hidromecânica, ou seja não se contabiliza a sucção do solo. Com isso, a tendência será de que os resultados experimentais apresentem menor variação do índice de vazios com as tensões em relação ao numérico, uma vez que estes contemplam o incremento de resistência pela sucção.

Quanto maior o valor da umidade, menor a sucção do material e melhor deverá ser o ajuste entre as curvas. Outro aspecto importante é que ao se estimar o ângulo de atrito interno e o coeficiente de Poisson do material, empregados no cálculo de  $M$  e do módulo cisalhante  $G$ , podem levar a resultados com certa diferença (Tabela 2).

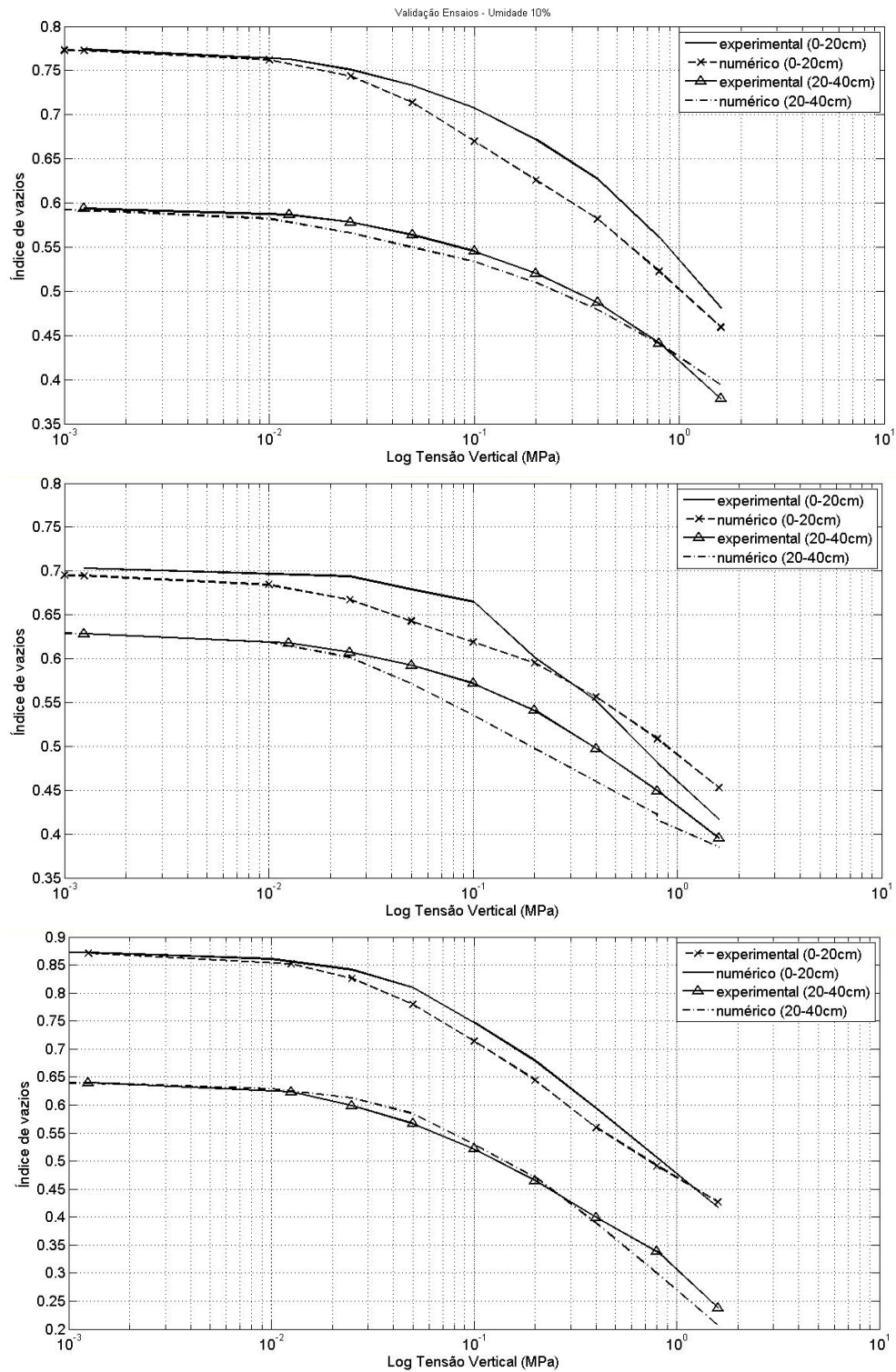
Verifica-se que o programa CODE\_BRIGTH, com a adoção de uma análise puramente mecânica empregando o modelo constitutivo de CamClay Modificado, apresentou resultado satisfatório se mostrando como uma ferramenta apta a ser aplicada a cenários em escala de campo.

Vale destacar que a qualidade e quantidade de resultados experimentais é bastante importante para uma melhor validação do modelo numérico, uma vez que permitem a obtenção mais realista das propriedades do solo a serem empregadas no modelo constitutivo mecânico. A influência disto pode ser observada, Figura 10, para os resultados com umidade de 15%, onde a qualidade dos dados experimentais para o solo da camada de 0-20 cm não foi adequada levando a parâmetros deficientes e com uma resposta numérica um pouco mais divergente que nos demais resultados.

Dois parâmetros que sofrem muita influência, em sua obtenção, é o índice de descompressão/re-compressão  $C_s$  e a tensão de pré-adensamento. Estes mandam diretamente na resposta elastoplástica do material e controlam o regime e o limite elástico.

De uma forma geral este modelo se mostra capaz de reproduzir o fenômeno de compactação dos solos em função da sua superfície de fluência fechada limitar os estados de compressão. Neste caso, quando a trajetória de tensões atinge a superfície de fluência, o material começa a deformar-se plasticamente. Isto pode ser visto pelas curvas apresentadas onde se sai de uma reta de compressão elástica de baixa inclinação para uma de

compressão plástica, de maior declividade, quando a tensão média excede a tensão de pré-adensamento do material.



**Figura 9.** Comparativo de respostas experimental e numérica de ensaio edométrico nas umidades de 10%,15% e 20%.

**Tabela 4.** Erros relativos médios dos resultados numéricos e experimentais

Profundidade	Umidades		
	h = 10%	h = 15%	h = 20%
0-20cm	4,9237%	2,9548%	2,4573%
20-40cm	1,7429%	3,8698%	2,2493%

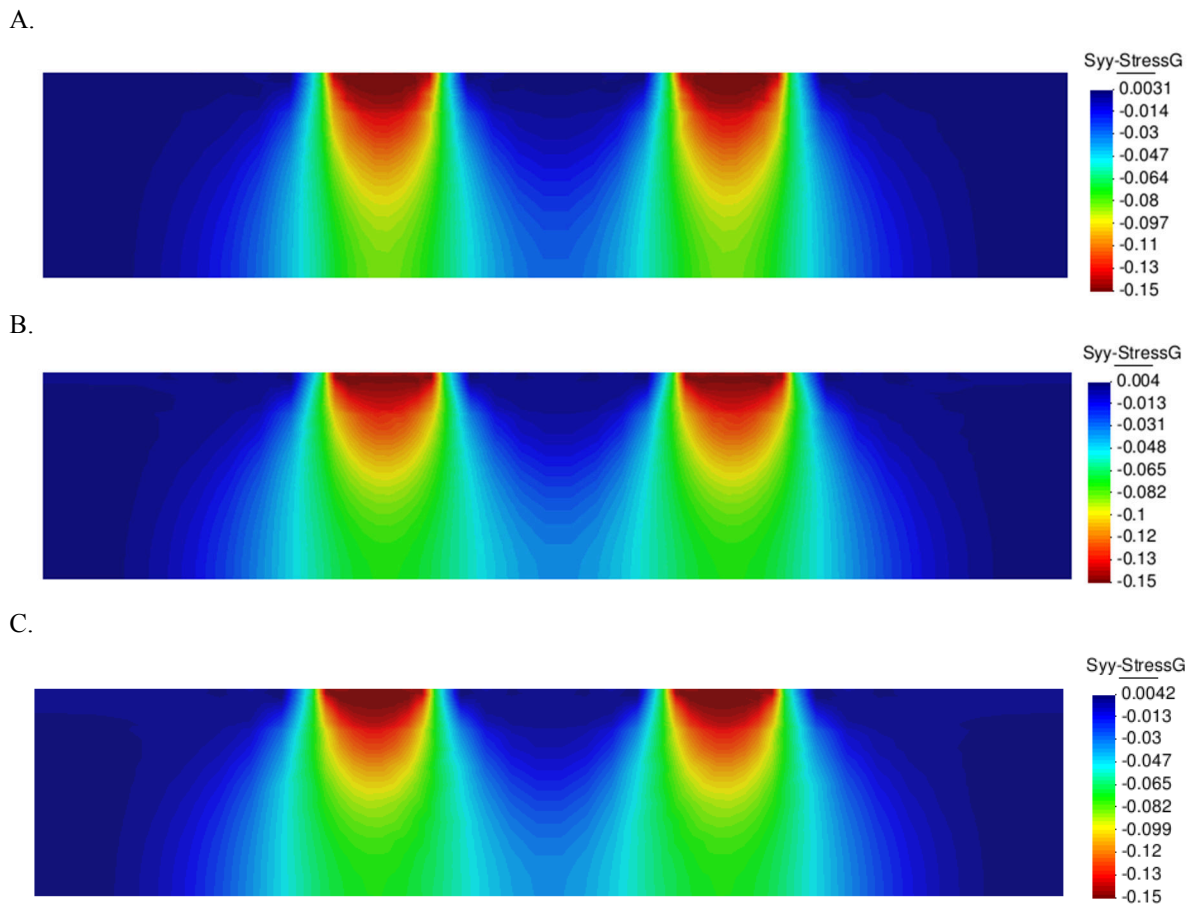
A vantagem de se adotar o modelo de CamClay Modificado, conforme já discutido, é que poderá representar respostas de trajetórias de tensões no sentido da expansão (soerguimento do solo) e cisalhamento.

### **Tensões verticais**

A apresentação dos resultados obtidos após simulação no CODE\_BRIGTH será realizada do veículo mais leve no caso o eixo traseiro do trator, seguido pelo eixo dianteiro do mesmo, logo após, o eixo traseiro e o eixo dianteiro do caminhão e por último, o eixo do reboque canavieiro. A ordem nas umidades se dará da mesma maneira, 10, 15 e 20% respectivamente.

A região onde se concentra as maiores tensões para o eixo traseiro do trator (Figura 10), estão abaixo das rodas do pneu onde os valores chegam a 150 kPa para todas as umidades. No caso específico da região entre rodas até os 40 cm de profundidade não ocorreu propagação de tensões independentemente da umidade (10, 15 e 20%) modelada (Figura 10A, B e C). Já na mesma região entre rodas a baixo de 40 cm já é possível observar uma pequena propagação de tensão na ordem de 40 kPa. Mesmo embaixo dos pneus (região crítica) após 40 cm de profundidade os valores de tensão caem significativamente e ficam em torno de 60 a 80 kPa.

Valores de tensões verticais obtidas por Lozano et al. (2013) para as rodas do mesmo veículo, na camada superficial, atingiram tensões máximas de 205 e 152 kPa, em baixo das rodas, e a partir de 26 cm de profundidade tensões inferiores aos 80 kPa. Vale ressaltar que Lozano et al. (2013) utilizou método pseudo-analítico, usando o do SoilFlex (Keller et al., 2007), e encontrou valores diferentes do método aproximado (MEF), aqui apresentados. De maneira geral, o comportamento de ambos os estudos foi semelhante, caracterizado pela concentração das tensões embaixo dos pneus com maiores tensões em torno 40 cm de profundidade.



**Figura 10.** Variação da tensão vertical no solo sob as rodas do eixo traseiro do trator para as umidades de 10% (A), 15% (B) e 20% (C) até 1,00 m de profundidade.

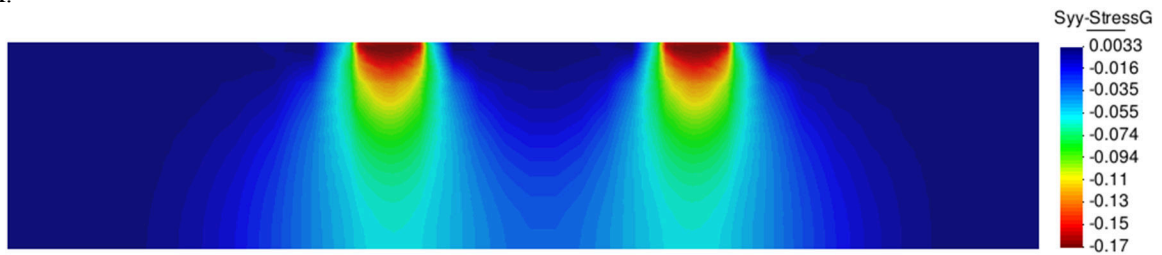
Para o cenário do eixo dianteiro do trator (Figura 11), observa-se também que a região de maiores concentrações dos valores de tensões verticais foi em baixo das rodas; com valores que variaram de 170 a 200 kPa, concentrando nas camadas mais superficiais. De forma semelhante, da região entre rodas não ocorre propagação de tensões independentemente da umidade (10, 15 e 20%) modelada até 30 m aproximadamente. Foram encontradas tensões significativas embaixo da roda do pneu traseiro até 1 metro de profundidade (Figura 12), também de acordo com Keller et al. (2014) que usando MEF encontrou tensões relativamente altas com a profundidade.

Mion et al. (2016), em estudo de propagação de tensão em um solo provocada pela passagem de um pneu de trator agrícola obteve valores na ordem de 190 kPa, utilizando o MEF, assemelhando-se a tensão aqui encontrada para a roda do trator dianteiro. A distribuição dos deslocamentos e das tensões atuantes, os resultados obtidos, verificaram que as tensões verticais encontradas na superfície do solo foram aproximadamente iguais às pressões de inflação dos pneus; e que esta mesma tensão de 190 kPa, em Mion et al,

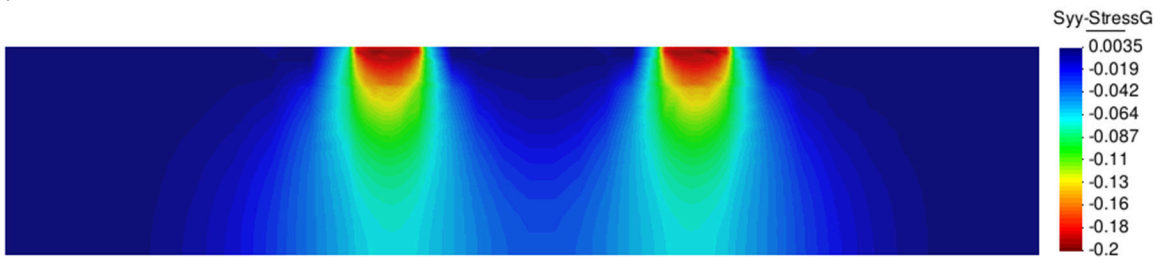


(2016) demonstrando semelhança no solo até a profundidades de 0,30 m, após essa profundidade, tendendo a zero.

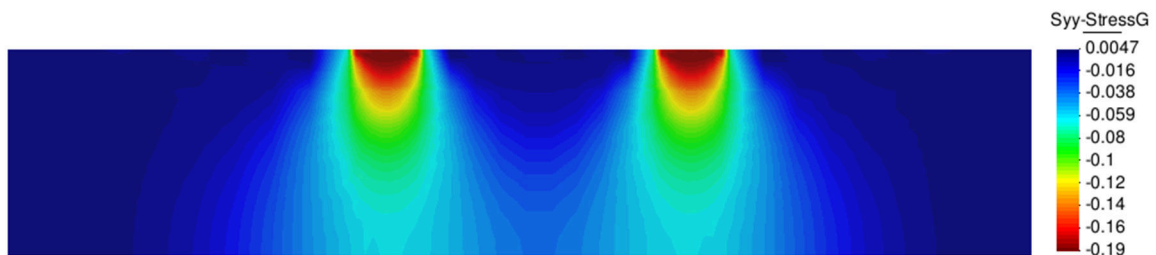
A.



B.



C.



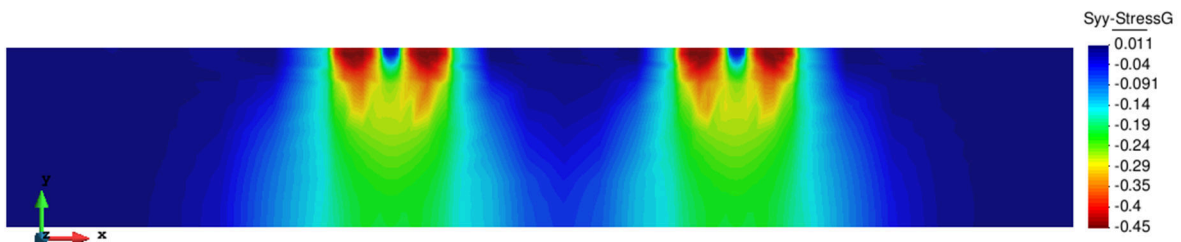
**Figura 11.** Variação da tensão vertical no solo das rodas sob eixo dianteiro do trator para as umidades de 10% (A), 15% (B) e 20% (C) até 1,00 m de profundidade.

A carga individual do pneu traseiro em que foi medida a área de contato do pneu com o solo foi de 17,1 kN. Nas análises numéricas, baseadas no método dos elementos finitos (MEF), foram considerados diferentes valores da pressão interna do pneu (96,5 kPa, 124,0 kPa, 151,0 kPa e 179,0 kPa); observa-se que a partir dos 40 cm independentemente da pressão interna do pneu as tensões verticais se igualaram-se chegando a valores de 15 kPa (Mion et al., 2016).

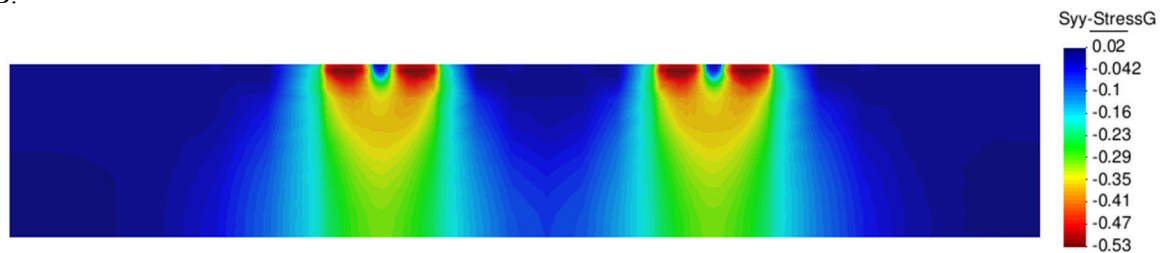
O detalhamento das tensões em baixo do pneu (Figura 10A), onde se verifica que para o pneu traseiro do trator, até os 0,20 m, não diferiu, independentemente da umidade (10, 15 e 20%); aos 0,60 m as tensões estão abaixo dos 100 kPa. Para o caso do pneu dianteiro do trator na umidade 15% (Figura 11B), houve uma ligeira diferenciação entre as umidades, com tensões da ordem de 130 kPa até os 0,20 m e também inferiores a 100 kPa até 1,00 m de profundidade.

Para o eixo traseiro do caminhão, Figura 12, observa-se que a região de maiores concentrações dos valores de tensões verticais, estão abaixo das rodas; os valores variaram 450; 530 e 530 kPa para as umidades de 10, 15 e 20% respectivamente em baixo das rodas, decaindo ao longo da profundidade. No caso específico da região entre rodas até 30 cm de profundidade, centro do eixo, não ocorre propagação de tensões independentemente da umidade (10, 15 e 20%) modelada. Observa-se que abaixo da roda do pneu traseiro do caminhão, a 1,00 m de profundidade (Figura 12) tem-se tensões da ordem de 180 kPa a 200 kPa, podendo ser observado melhor na Figura 15.

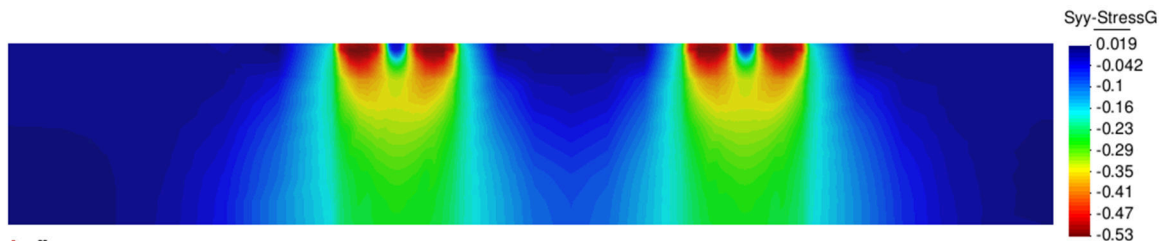
A.



B.



C.



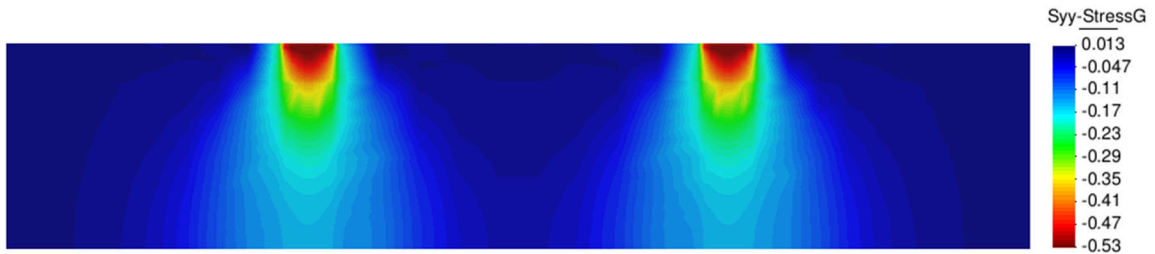
**Figura 12.** Variação da tensão vertical no solo das rodas do caminhão, eixo traseiro, para as umidades de 10% (A), 15% (B) e 20% (C) até 1,00 m de profundidade.

Com relação a propagação de tensões no centro do eixo (região do sistema radicular) dos pneus traseiro do caminhão (Figura 12), mostra-se que as rodas duplas não interagem negativamente até a camada de 40 cm aproximadamente, ou seja, as rodas duplas trazem efeitos negativos a partir de 40 cm de profundidade, formando bulbos mais densos de tensões verticais.

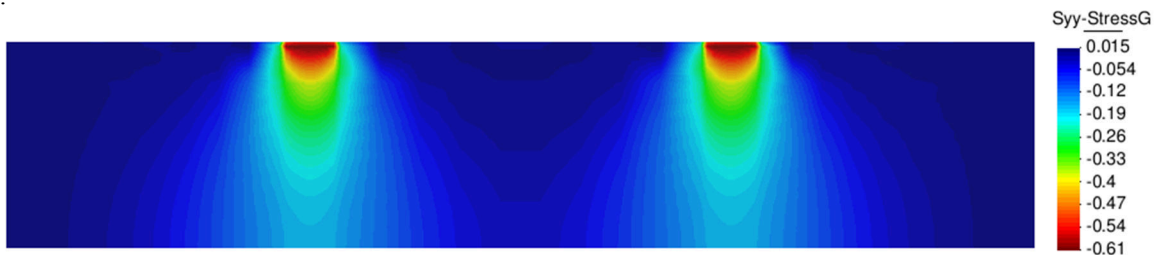
Para os pneus do eixo dianteiro do caminhão, que transmite ao solo tensões de 550 a 600 kPa depende da densidade, observa-se que a região de maiores concentrações dos valores de tensões verticais, como mostra a Figura 13, estão abaixo da roda em

concordância com outros veículos já simulados, com valores variando de 530; 610 e 610 kPa, respectivamente para umidades de 10, 15 e 20%, em baixo da roda se propagando em profundidade, ou seja, a umidade atua positivamente na propagação de tensões.

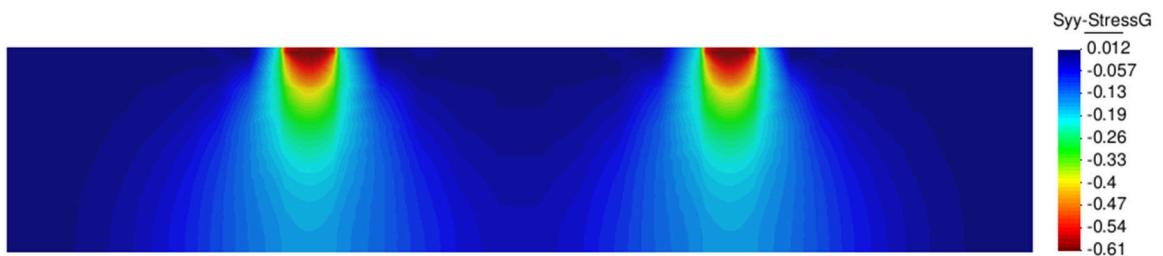
A.



B.



C.



**Figura 13.** Variação da tensão vertical no solo do caminhão, eixo dianteiro, para as umidades de 10% (A), 15% (B) e 20% (C) até 1,00 m de profundidade.

Para a região entre rodas só ocorre propagação de tensões independentemente da umidade (10, 15 e 20%) a partir dos 20 cm de profundidade, ficando na ordem de 12 kPa, valor de tensão também considerada desprezível para o desenvolvimento do sistema radicular. Observa-se que abaixo da roda do pneu dianteiro do caminhão, a 1,00 m de profundidade (Figura 13) temos tensões da ordem de 150; 160 e 170 kPa, respectivamente para umidade de 10, 15 e 20%. Para o pneu do caminhão dianteiro, a propagação de tensões abaixo da roda ainda é considerada pequena.

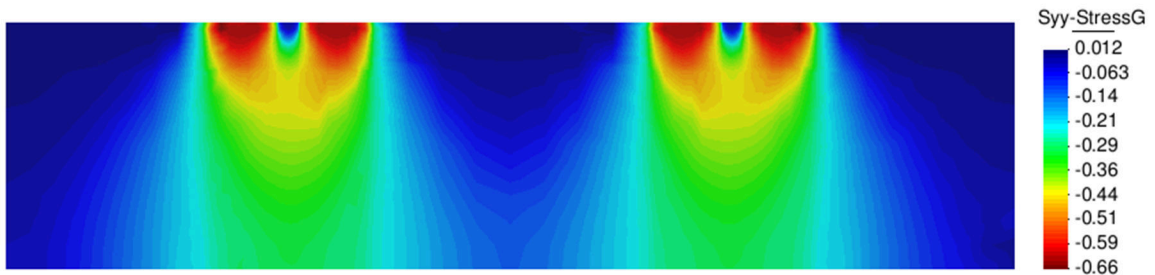
Keller & Arvidsson (2004) concluíram que o benefício de utilizar rodas duplas recai na possibilidade de diminuir as cargas por roda, o que permite também diminuir as pressões de insuflagem levando assim a um menor risco de compactar o solo. Porém, a área potencialmente compactada é maior do que quando utilizadas rodas simples (Figura 16) devido a que a área trafegada aumenta quando utilizadas rodas duplas.

Por outro lado, em ambos os casos, eixo traseiro e dianteiro (Figura 12 e Figura 13) na região radicular da cultura da cana-de-açúcar, não sofre influência das grandes tensões aplicadas pelo veículo em estudo.

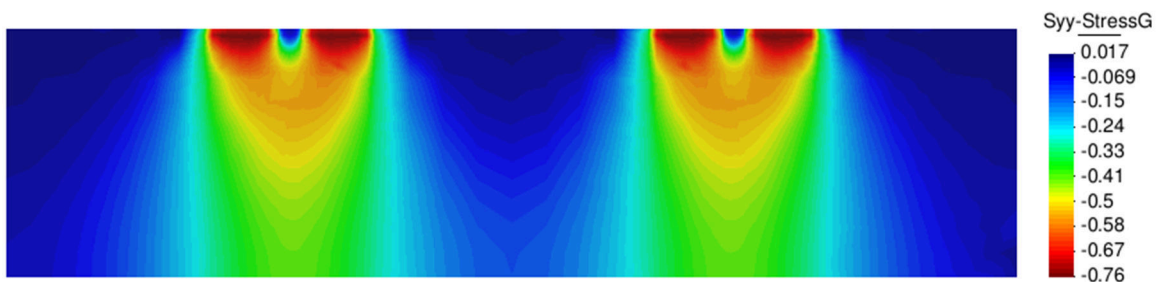
As maiores tensões verticais para os pneus do eixo traseiro e dianteiro do caminhão estão concentradas logo a baixo dos pneus (Figura 12 e 13), assim como no caso do trator (Figura 10 e 11). Observa-se que em baixo dos pneus do reboque canavieiro (Figura 14) estão as maiores concentrações de tensões da ordem de 750 kPa, se propagando, formando um bulbo único, entre os dois pneus a partir dos 20 cm, com tensões de 500 kPa, reduzindo a partir dos 40 cm. A partir dos 40 cm a tensão se estabiliza aos 300 kPa até os 100 cm.

Com relação as tensões abaixo das rodas do Reboque, Figura 14, com valores de 660 760 e 750 kPa para as umidades 10%, 15% e 20%, respectivamente; até a camada de 0-20 cm na umidade 10%, distribui tensões a valores de 530 kPa e para 15% e 20% próximos a 600 kPa.

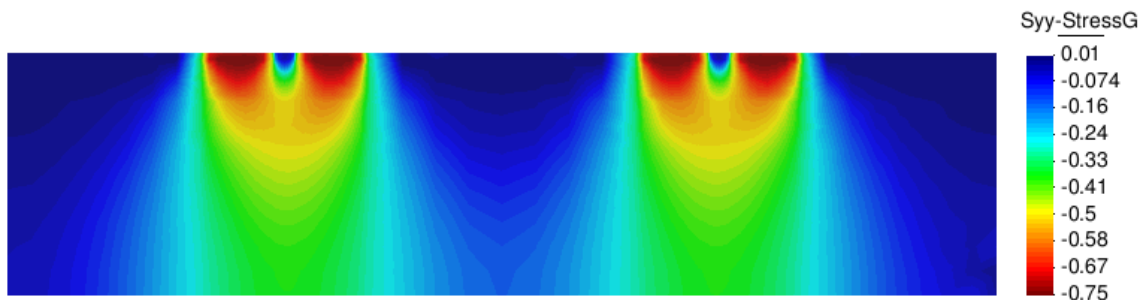
A.



B.



C.



**Figura 14.** Variação da tensão vertical no solo sob as rodas do eixo do Reboque para as umidades de 10% (A), 15% (B) e 20% (C) até 1,00 m de profundidade.

Com a redução da profundidade da camada até 100 cm com valores de 280, 340 e 360 kPa, respectivamente para umidades 10, 20 e 15%. Observa-se que para todos os cenários de umidades modelados as rodas duplas do Reboque são as que transmitem as maiores tensões verticais ao solo, seguidas pelas rodas simples e duplas em tandem do Caminhão. As menores tensões nessa camada foram transmitidas pelas rodas simples dos eixos dianteiro e traseiro do Trator.

Nos três cenários de umidades modelados, 10, 15 e 20%, as tensões entre rodas do eixo do Reboque (Figura 14) estão na ordem de 12 kPa até 40cm, praticamente nulas. A influência das cargas transmitidas pelos pneus do Reboque é nula na linha de plantio, ou seja, não causara compactação adicional ao sistema radicular da cultura da cana-de-açúcar. Esses valores se propagam até os 50 cm de profundidade e, se estendendo até 100 cm com tensões próximas de 100 kPa.

Vale diferenciar que para o Reboque (Figura 14) as maiores tensões estão abaixo das rodas duplas, em concordância dos encontrados por Lozano et al. (2013), Keller (2005) e Keller e Arvidsson (2004) que obteve as maiores tensões abaixo do centro de cada uma das rodas duplas. Vale salientar que o método aplicado para avaliar as tensões transmitidas no solo dos autores foi o semi-analítico, baseado nos modelos de compactação que utilizam a aproximação de Söhne (1953), baseada nas equações analíticas de transmissão de tensões verticais ao solo, desenvolvidas por Boussinesq (1885) e Fröhlich (1934); ao contrário do método aproximado utilizando MEF.

Com relação às umidades modelada as maiores tensões abaixo do centro dos pneus foi obtida para 15% de umidade, com o bulbo de tensões da ordem de 500 kPa se propagando até próximo dos 60 cm, 35 cm para 10% de umidade correspondendo a tensão da ordem de 440 kPa e; para a umidade de 20% o bulbo se propagando até os 40 cm com tensões de 480 kPa. Desse modo na pior umidade do solo, maior compactação do solo, si dará com a passagem do Reboque na umidade de 15%.

Dos três veículos analisados, Trator (eixo dianteiro e traseiro) e o caminhão (eixo dianteiro e traseiro), o Reboque foi o que transmite as maiores tensões no solo (Figuras 15). Em concordância com essa afirmação, Lozano et al. (2013) em que com os mesmos veículos modelados com uso do SoilFlex, método semi-analítico, obteve as mesmas conclusões.

Independentemente do veículo utilizado, o aumento das tensões verticais transmitidas à medida que aumenta a umidade do solo, exceto para o Reboque em que os

valores obtidos para 10 e 15% foram superiores a 20%, indicando que em solo mais secos transmite menores tensões verticais do que e em solos mais úmidos. Alakukku et al, 2003 explica que para solos muito duros ou secos a distribuição das tensões verticais acontece de forma mais horizontal no perfil do solo, enquanto que para solos mais soltos e úmidos as tensões verticais são transmitidas até maiores profundidades.

As maiores tensões transmitidas pelas rodas do caminhão e Reboque estão de acordo com Lozano et al. (2013) que afirma que, as elevadas tensões verticais transmitidas pelo Caminhão e o Reboque nos primeiros 30 cm de profundidade podem ser atribuídas aos maiores carregamentos (Lamandé e Schjønning, 2011)

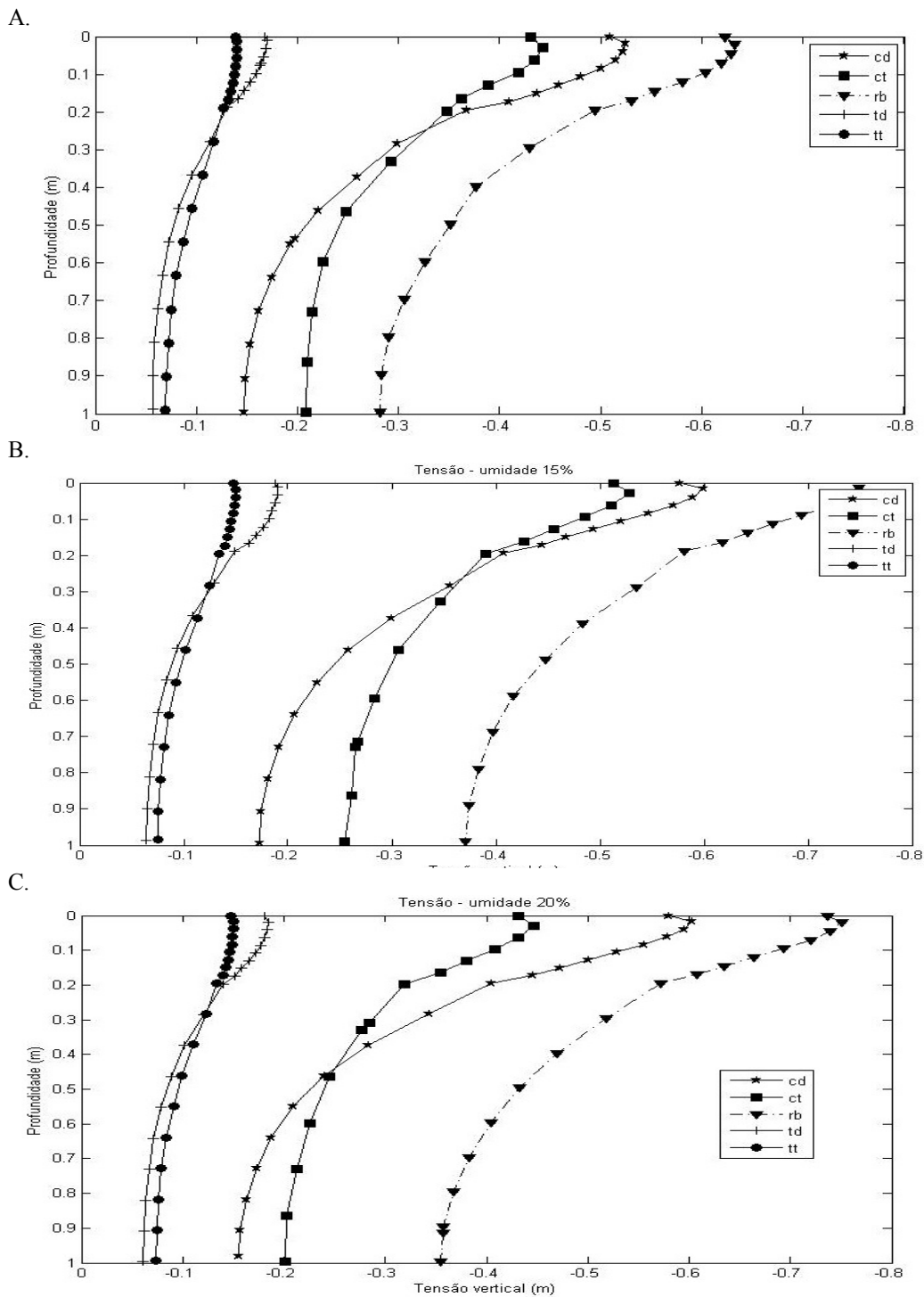
Observa-se que na faixa entre rodas, a linha de plantio da cana, na soqueira, e na entrelinha da cultura (linha de rodado), ou faixa de tráfego, região de maiores tensões; para minimizar esse acúmulo de tensões nessa região, de maiores problemas de compactação do solo sob canaviais temos alternativas como o manejo com controle de tráfego agrícola (Roque et al., 2010), que segundo os autores preserva, as regiões não trafegadas, as propriedades do solo e favorece o desenvolvimento do sistema radicular e consequentemente, o desenvolvimento das culturas (Vermeulen e Mosquera, 2009).

Em linha gerais, o controle de tráfego separa as zonas de tráfego e as zonas de crescimento das plantas, concentrando a passagem de pneus em linhas permanentes, com diminuição da área submetida ao tráfego agrícola (Braunack et al., 2006).

Um outro aspecto relevante é que a região onde há concentração de cargas, que na cultura da cana-de-açúcar ocorre na entrelinha do plantio; assim se for obedecido a faixa para o tráfego de tratores, caminhões, transbordo e reboque, trará muitos benefícios, pois a linha de plantio estar em uma zona de tensões de tração, com garantia de não compactação

Um outro aspecto a zona radicular é difícil extrair conclusões gerais da literatura sobre a morfologia radicular em condições de compactação do solo. Isso se deve as diferenças entre espécies de plantas, classe e idade de raízes. A existência de camada de impedimento físico provoca alterações morfológicas nas raízes que podem ser utilizadas como indicativo de compactada. Mediante elevada resistência do solo a penetração as raízes apresentam-se com menor comprimento, grossas e com forma irregular.

Na literatura estima-se que o sistema radicular para a cultura da cana-de-açúcar estar distribuído entre as camadas de 0,00-20 e 20-40 cm, onde temos de 68,7% para a variedade SP80-1846; 77,6% para a RB72454 até 84,3% para a variedade RB855536. Ou seja, independentemente da variedade um grande percentual do sistema radicular estar concentrado na camada de 0,0-40 cm, região não compactada.



**Figura 15.** Tensões verticais transmitidas ao solo para a roda traseira do trator (tt), roda dianteira do trator (td), roda traseira do caminhão (ct), roda dianteira do caminhão (ct) e roda do reboque (rb) e nas umidades de 10% (A), 15% (B) e 20% (C) até 1,00 m de profundidade.

Assim desde que os veículos trafeguem na entrelinha da cana-de-açúcar, fazendo uso da trilha, linha da cana-de-açúcar, minimizara os efeitos da compactação. O aumento

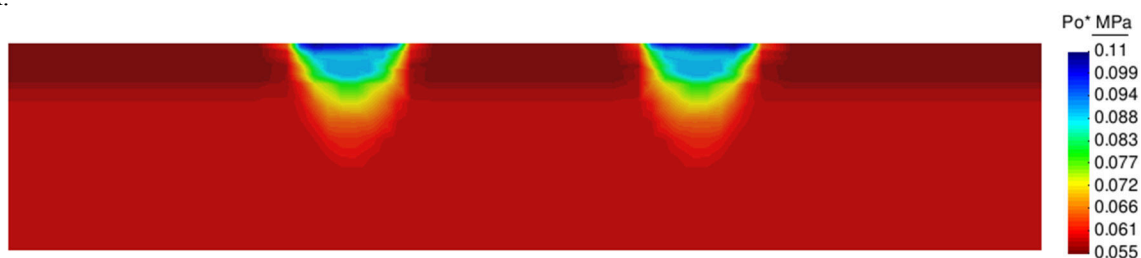
das cargas por roda e repetidas passagens resulta em aumento da degradação estrutural do subsolo, como também no sistema do solo como todo.

Para cargas aplicadas em baixo dos pneus, Lozano et al. (2013) encontrou tensões da ordem de 20 a 40 kPa, mostrando a precisão do modelo onde se tem apenas dados de campo até a camada de 40 cm, mostrando também que a região radicular da cultura não sofre influência das grandes tensões aplicadas pelo veículo em estudo que na camada de 0-20 cm com 500 kPa e 385 kPa, de tensão vertical, maiores que os valores encontrados por Lozano et al. (2013) para esta mesma densidade que ficaram entre 200 e 300 kPa. O valor máximo de tensão vertical encontrado na região radicular (até 30 cm) foi de 6 kPa.

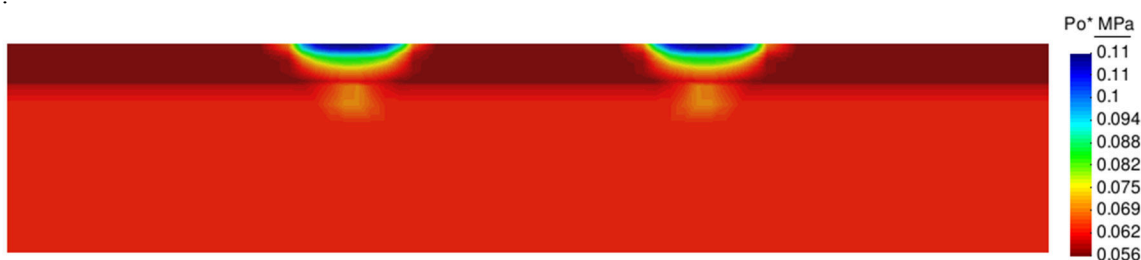
### Tensão de Pre-adsensamento

Como já era esperado após o preparo do solo, o qual teve um aumento significativo de porosidade gerado pelos implementos, as tensões de pré-adsensamento, provocadas pelo carregamento mais leves no o caso do eixo traseiro do trator (Figura 16), mostrou variação em relação a inicial, na camada de 0 a 20 cm em todas as umidades, podendo chegar na profundidade de 1 metro na umidade de 20%.

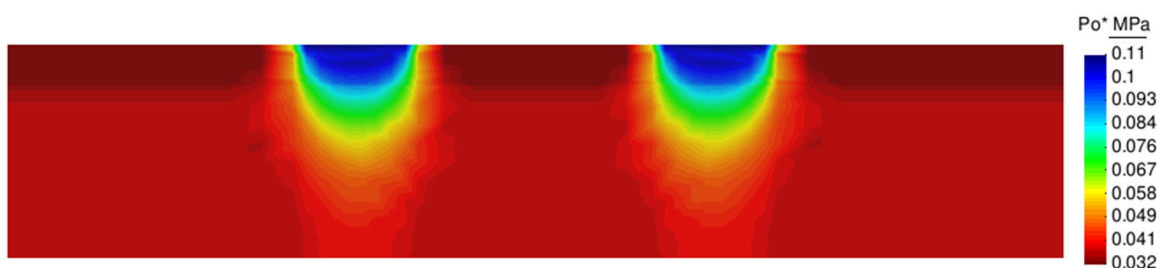
A.



B.



C.



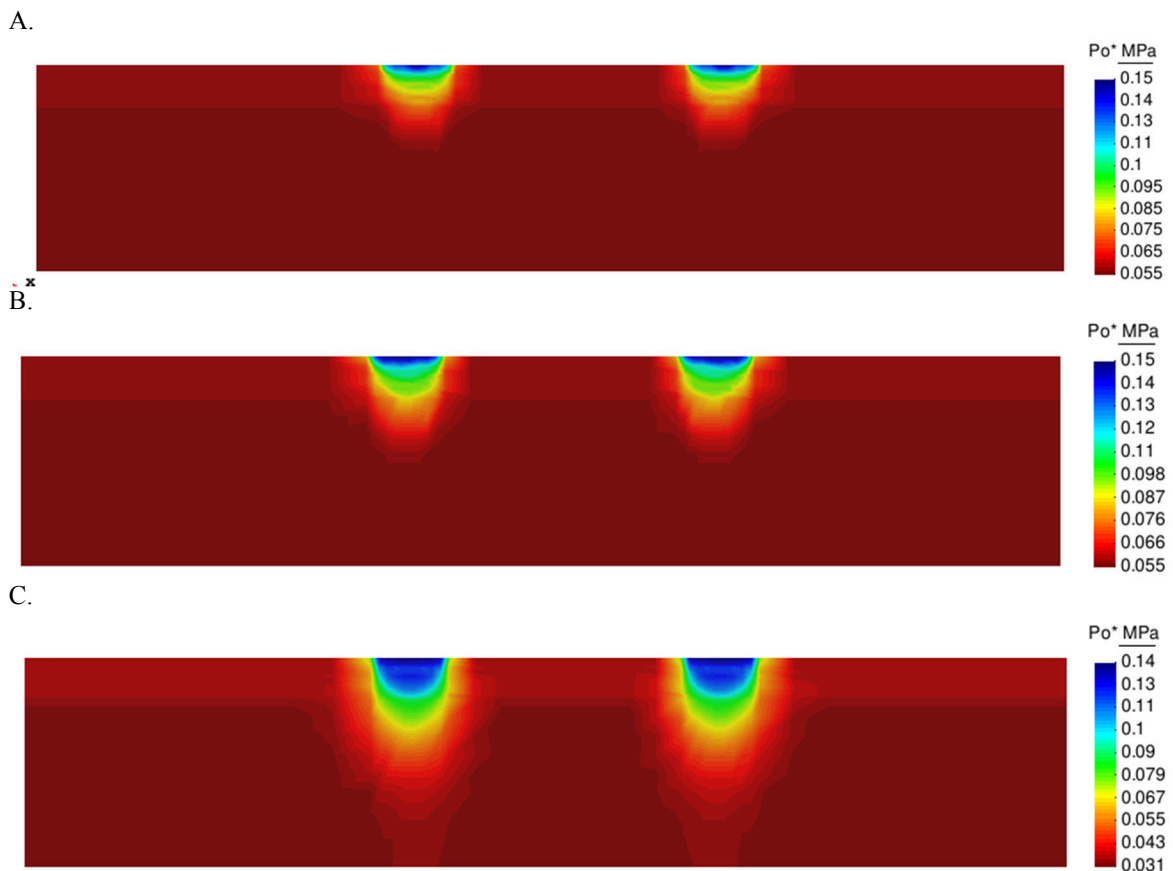
**Figura 16.** Variação da tensão de pré-adsensamento no solo eixo traseiro do trator, para as umidades de 10% (A), 15% (B) e 20% (C) até 1,00 m de profundidade.



A umidade de 10% saiu dos 55 kPa iniciais aferidos no ensaio para 110 kPa na região mais crítica a baixo da roda, seguindo as umidades de 15 (Figura 16B) e 20% (Figura 16 C) saíram dos 56 e 32 kPa para os mesmos 110 kPa respectivamente.

As tensões de pré-adensamento na passagem do eixo traseiro do trator atingiram os maiores valores nas umidades de 15% e 20% ao longo de todo o perfil. As tensões de Pré-adensamento originais (Tabela 2), encontradas no ensaio endométrio apresentam valores baixos, com relação as obtidas por Tavares (2011) em área de canavial pernambucano, onde foi encontrado valores em torno de 100 kPa. Este fato ocorrido pode ser explicado, pois o solo deste estudo sofreu alteração após o preparo com o processo de gradagem, baixando assim suas tensões de pré-adensamento.

Já as alterações ocorridas na tensão de pré-adensamento após a simulação da passagem do eixo dianteiro do trator, Figura 17, apresentou o mesmo comportamento do eixo traseiro do veículo (Figura 16), onde se ver as maiores alterações logo a baixo da roda. Com o carregamento mais pesado as tensões de pré-adensamento chegaram a valores de 150 kPa e 140 kPa na região a baixo das rodas como mostra a Figura 17.

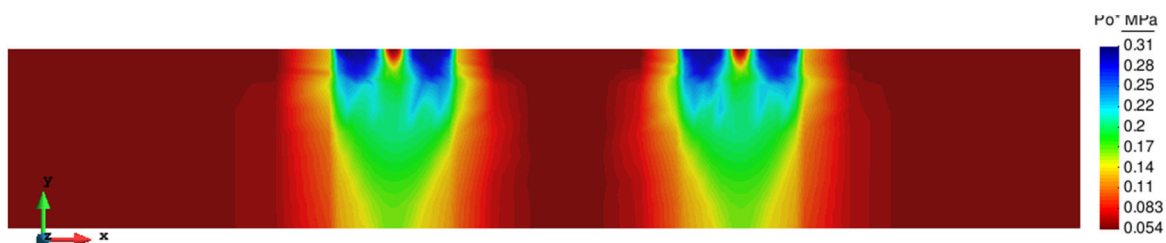


**Figura 17.** Variação da tensão de pré-adensamento no solo do trator, eixo dianteiro, para as umidades de 10% (A), 15% (B) e 20% (C) até 1,00 m de profundidade.

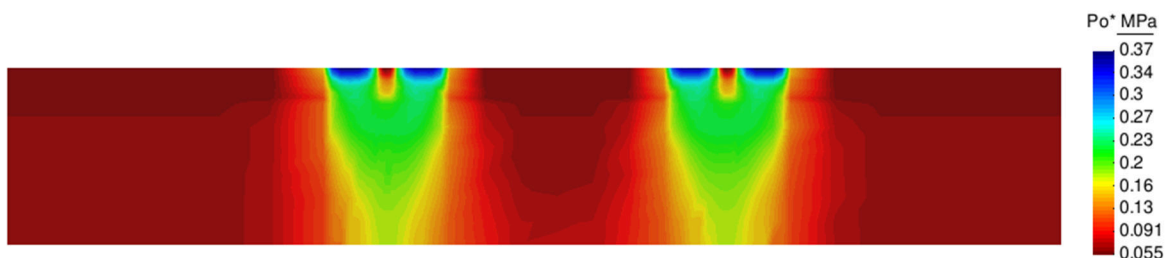
Na umidade de 10 e 15% (Figura 17A e B) o trator não atinge as tensões de pré-adensamento iniciais embaixo da camada de 30 cm, com pode ser observado pela alteração da cor. Para todos os cenários de umidades modelados no eixo traseiro do trator, a que transmitem as maiores tensões de pré-adensamento ao solo na camada de 0-40 cm foi a umidade de 20%. Poodt et al. (2003) usando modelagem em elementos finitos com o modelo de Mor-Colomb não encontrou camadas plásticas para camadas inferiores há 30 cm para tensões menores que 190 kPa.

Na Figura 18, as novas tensões de pré-adensamento no momento da aplicação das cargas correspondente ao eixo traseiro do caminhão canavieiro chegaram a níveis de 31, 37 e 41 kPa para as umidades de 10, 15 e 20 % respectivamente, encontrando uma alteração visivelmente maior na umidade de 20%.

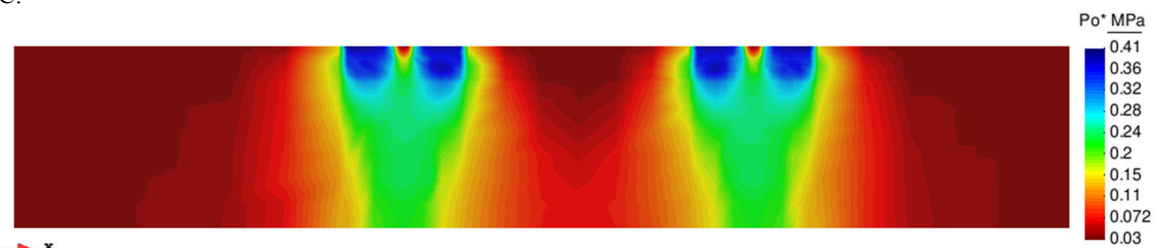
A.



B.



C.



**Figura 18.** Variação da tensão de pré-adensamento no solo do caminhão, eixo traseiro, para as umidades de 10% (A), 15% (B) e 20% (C) até 1,00 m de profundidade.

Na Figura 18, as novas tensões de pré-adensamento do eixo traseiro do caminhão variam em relação a inicial há maiores profundidades, se comparadas ao veículo anteriores como trator traseiro (figura 16) e trator dianteiro (figura 17). Variação das novas tensões de

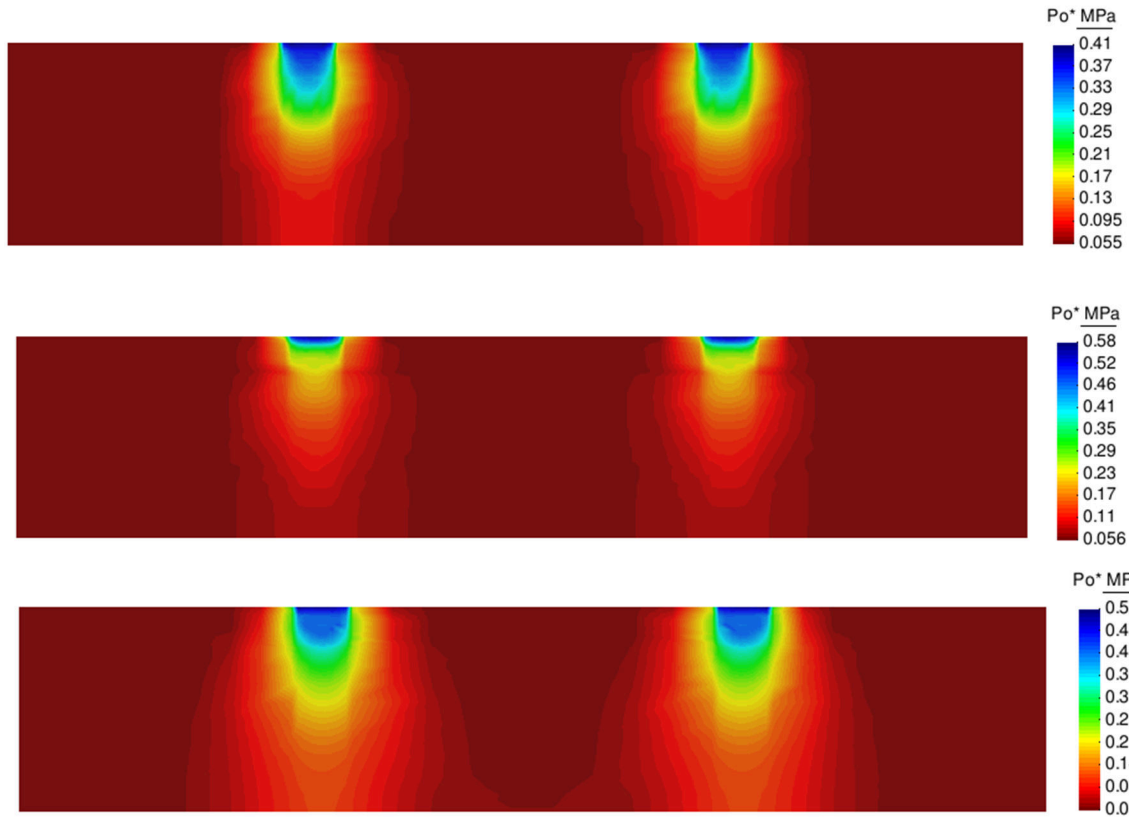
pré-adensamento no momento da aplicação das cargas foram praticamente as mesmas em todas as umidades na camada de 0-20. Na camada de 20-100, embora tivesse uma alteração pequena em comparação a estrutura inicial, houve uma alteração visivelmente maior na umidade de 20%.

Na Figura 18 as maiores tensões foram obtidas na superfície do solo, abaixo do centro da área de contato (Lozano et al., 2009). As novas tensões de pré-adensamento do eixo traseiro do caminhão variam em relação a inicial há maiores profundidades, se comparadas aos veículos anteriores como trator traseiro (Figura 16) e trator dianteiro (Figura 17). Variação das novas tensões de pré-adensamento no momento da aplicação das cargas foram praticamente as mesmas em todas as umidades na camada de 0-20 m. Na camada de 20-100, embora tivesse uma alteração pequena em comparação a estrutura inicial, houve uma alteração visivelmente maior na umidade de 20%.

Na Figura 19, as tensões de pré-adensamento no solo após a passagem do eixo dianteiro do caminhão canavieiro, já varia em relação a inicial, nas maiores profundidades, se comparadas aos veículos anteriores como trator traseiro (Figura 16) e trator dianteiro (Figura 17), podendo chegar na profundidade de 1 metro a 130 kPa (A), 111 kPa (B) e 86 kPa (C). As tensões de pré-adensamento atingiram.

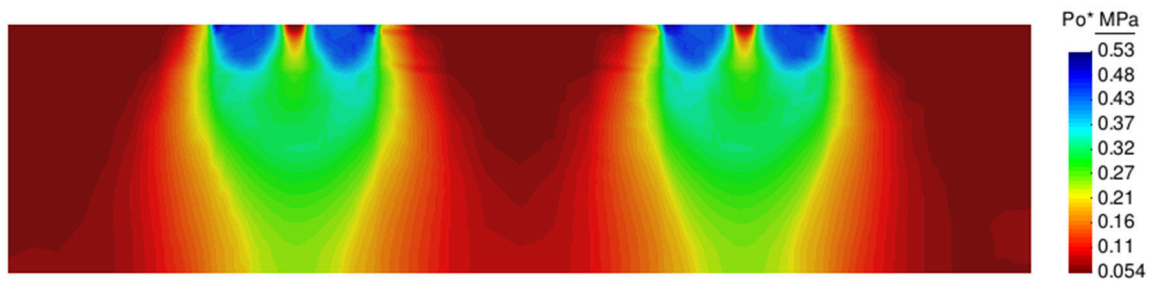
Só há encontros de bulbos de tensões de pré-adensamento na região entre rodas a do eixo traseiro do caminhão e no eixo do reboque como mostra as Figuras 18 e 20 respectivamente, os únicos eixos com rodas duplas, isso pode ser explicado que mesmo com menores carregamentos o programa entende as rodas duplas como uma única roda larga, e sua aproximação atinge a estrutura da região entre rodas.

Dias Junior & Pierce (1996) e Keller et al. (2004) exaltam a importância de conhecer o valor de tensão de pré-adensamento, que consiste em conhecer que o ponto que separa a deformação elástica (recuperável) da plástica (não recuperável) deve-se evitar aplicar tensões maiores do que a maior tensão previamente aplicada, pode-se dizer que: o tráfego com todos os veículos em estudo geram compactação adicional na camada 0-20 cm em todas as condições de umidade simuladas. Já na camada de 20-40 cm. Só as umidades de 10 e 15% no eixo traseiro e dianteiro do trator não geram compactação adicional nas camadas a baixo de 20 cm (Figura 16A e B e Figura 17A e B)

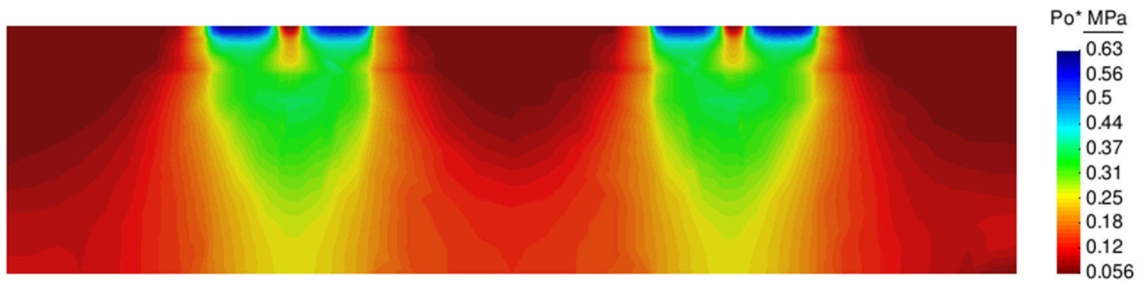


**Figura 19.** Variação da tensão de pré-adensamento no solo do caminhão, eixo dianteiro, para as umidades de 10% (A), 15% (B) e 20% (C) até 1,00 m de profundidade.

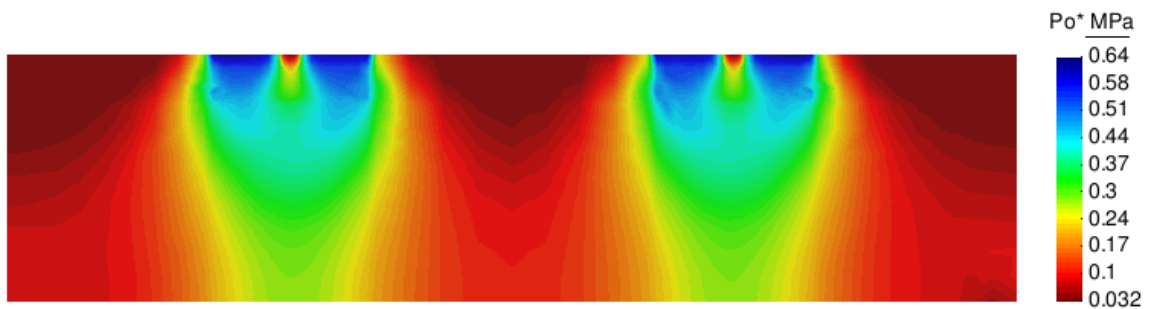
A.



B.

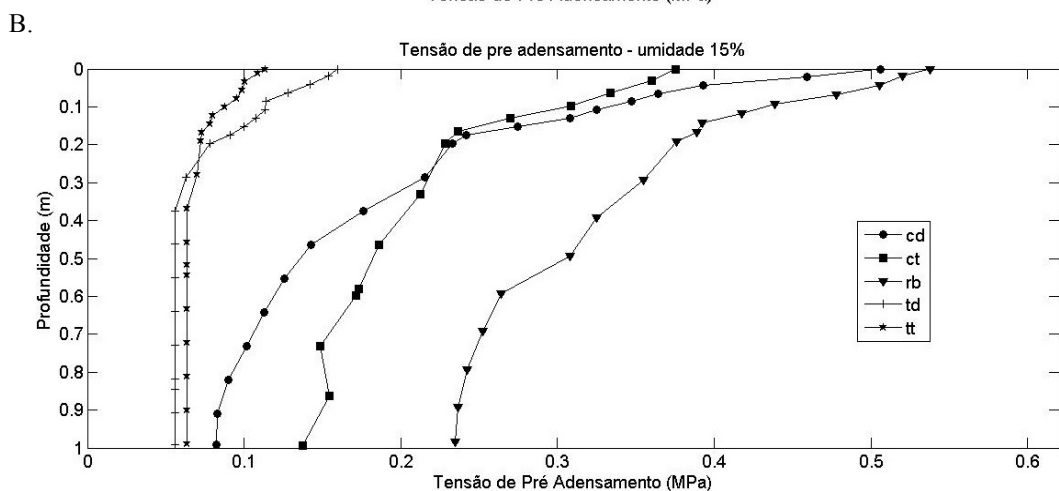
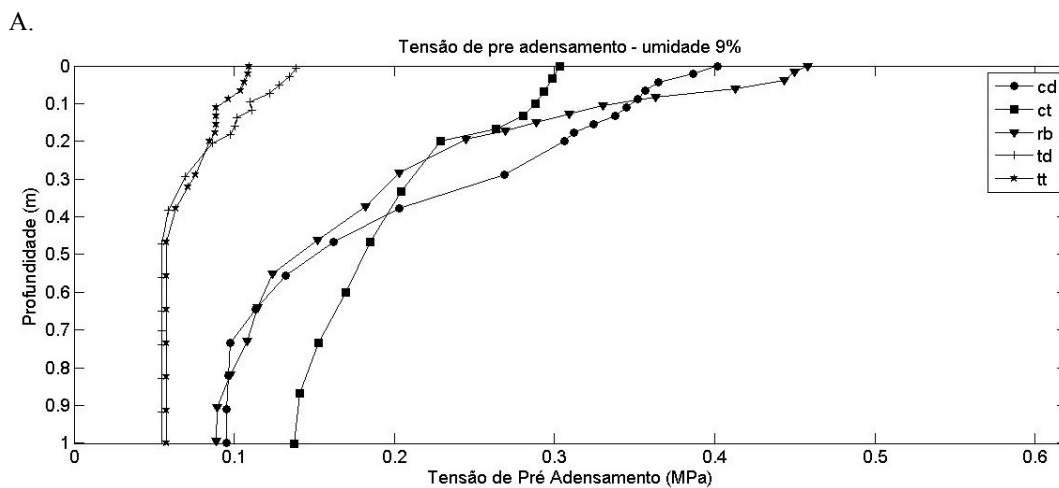


C.

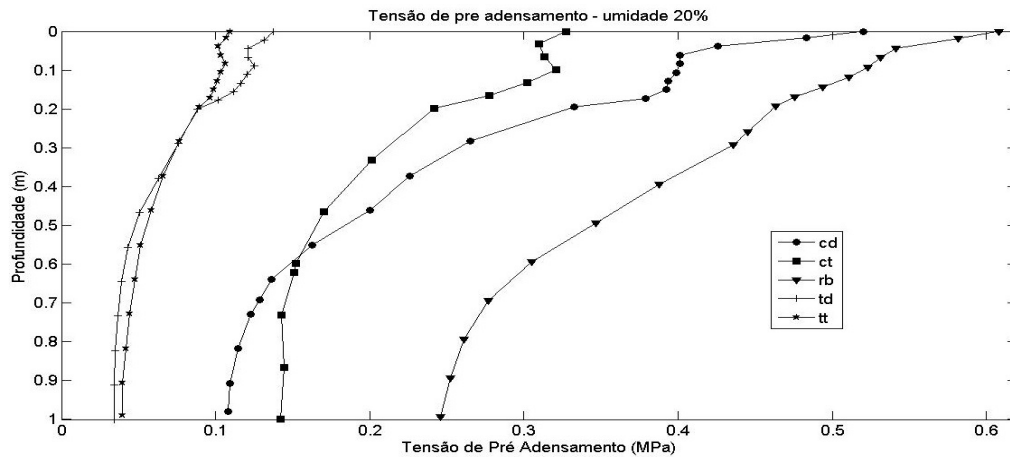


**Figura 20.** Variação da tensão de pré-adensamento no solo do reboque para as umidades de 10% (A), 15% (B) e 20% (C) até 1,00 m de profundidade.

É possível observar que somente os eixos do trato na umidade de 10 e 15% não alterou a tensão de pré-adensamento original a partir de 40 cm. Todos os veículos e carregamentos estudados alteraram a tensão de pré-adensamento original na camada de 0-20 cm, ou seja, ocasionando compactação adicional ao solo. O reboque canavieiro foi o veículo que mais causou compactação.



C



**Figura 21.** Tensões de pré-adensamento transmitidas ao solo para a roda do caminhão traseiro (CT), do caminhão dianteiro (cd), traseiro do trator (tt), dianteira do trator (td) e eixo do reboque (Rb) para as umidades: 10% (A), 15% (B) e 20% (C).

Os resultados obtidos nas tensões de pré-adensamento estão de acordo com Lozano et al. (2013) e Oliveira et al. (2011), que ao estudarem a tensão de pré-consolidação sob diferentes condições de manejo e umidade de Argissolos, detectaram que há um decréscimo na capacidade de suporte do solo com o acréscimo de umidade, o que tornou o solo mais susceptível a compactação em umidades mais elevadas.

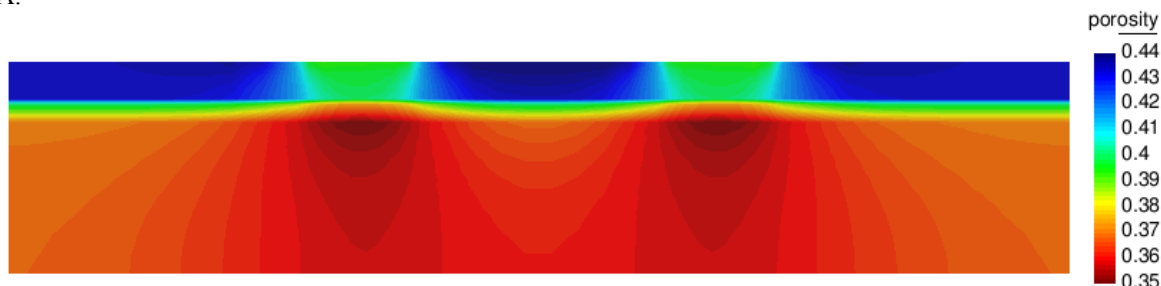
### Porosidade

Na Figura 22 está apresentada a variação da porosidade no solo durante a passagem dos pneus do eixo traseiro do trator e na Figura 23 a passagem do eixo dianteiro, lembrando que por não ser uma análise com descarga, esta porosidade pode ter sido superestimada, pois não foi avaliada a deformação elástica do material. Na umidade de 10%, na profundidade de 0,00-0,20 m a porosidade variou de 43,6%, inicial para 40% na região a baixo dos pneus traseiro (Figura 22A). Na profundidade de 0,20 até 1,00 m, 10% de umidade, a porosidade inicial era de 37,2%, reduziu para 35% na região abaixo dos pneus.

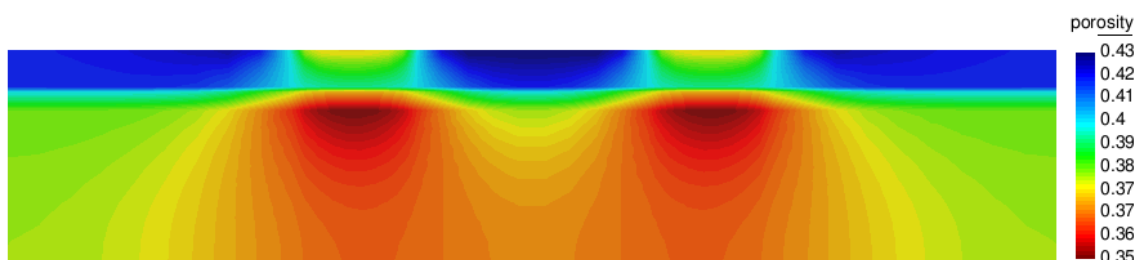
Na umidade de 15% (Figura 22B) a porosidade do solo após a passagem do pneu traseiro do trator, na profundidade de 0,00-0,20 m em baixo da roda a porosidade variou de 41%, inicial para 37%, ocasionando uma redução de 4 % da porosidade total (Figura 22B). Na profundidade de 0,20 até 1,00 m, a 15% de umidade, a porosidade inicial era de 38,6% com as maiores reduções dos valores, chegando a menor redução a 34%, na mesma região

abaixo dos pneus. Em todas as três umidades a cima ocorreu uma diminuição drástica da porosidade na região a baixo das rodas.

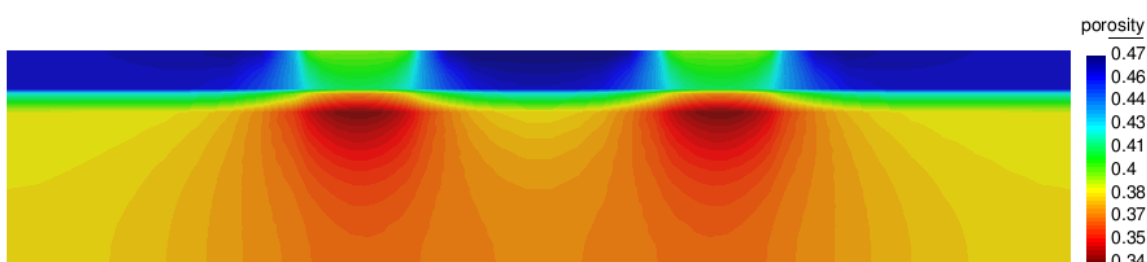
A.



B.

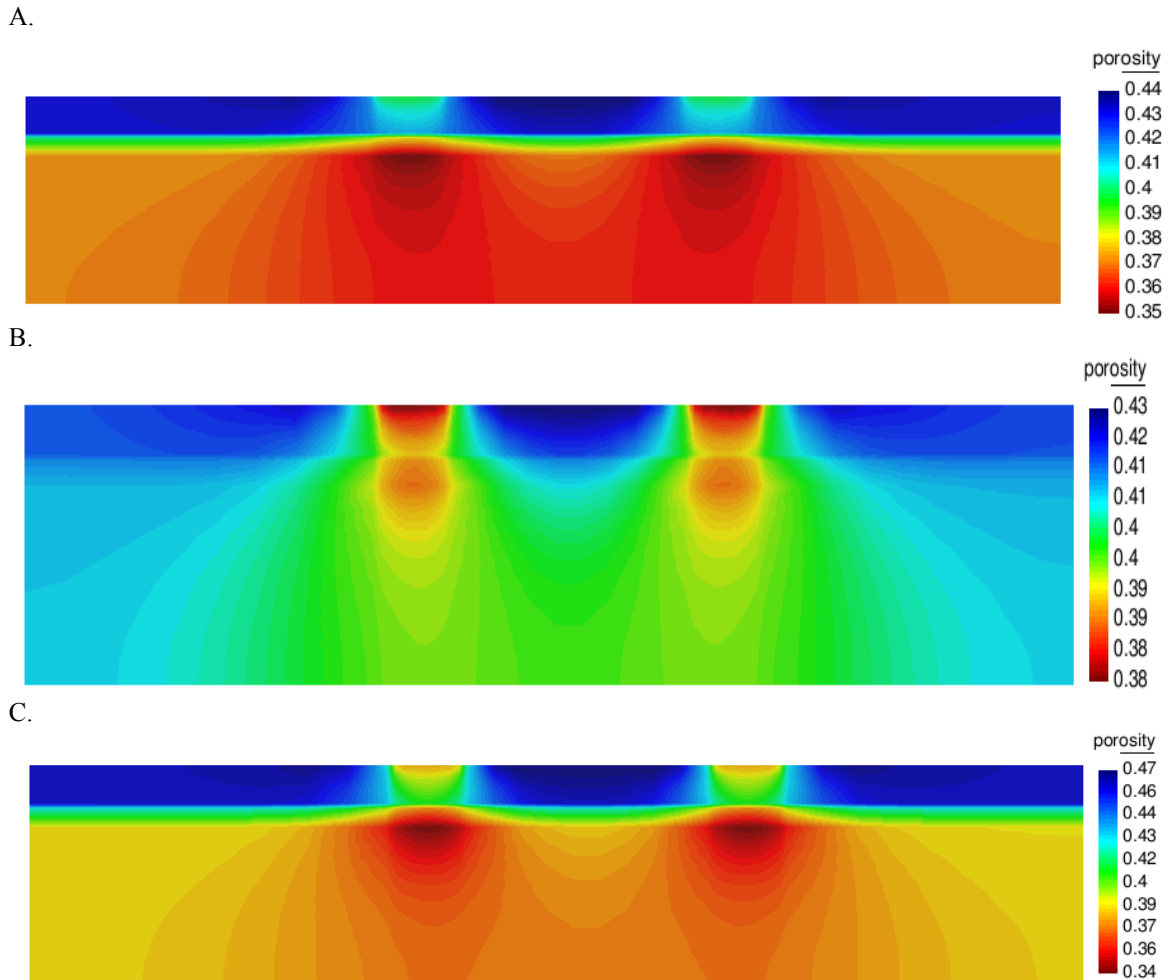


C.



**Figura 22.** Variação da porosidade do solo após a passagem dos pneus do trator para as umidades de 10% (A), 15% (B) e 20% (C) até 1,00 m de profundidade.

Observa-se que na região entre rodas, centro do eixo dos pneus traseiro, linha do plantio da cana-de-açúcar houve um acréscimo de porosidade, passando de 43,6 para 44%, de 0,00 a 0,20 m e de 37,2% para 38% a baixo de 0,2 m na umidade de 10% sob o eixo dianteiro do trator (Figura 23A). Esta melhoria da porosidade na zona radicular, provavelmente devido ao limite de capacidade de carga resultando em um deslocamento do cone, segundo a teoria de Terzaghi. Este acréscimo de porosidade na região do sistema radicular, pode trazer inúmeros benefícios, como melhora da infiltração e aeração nesta região.



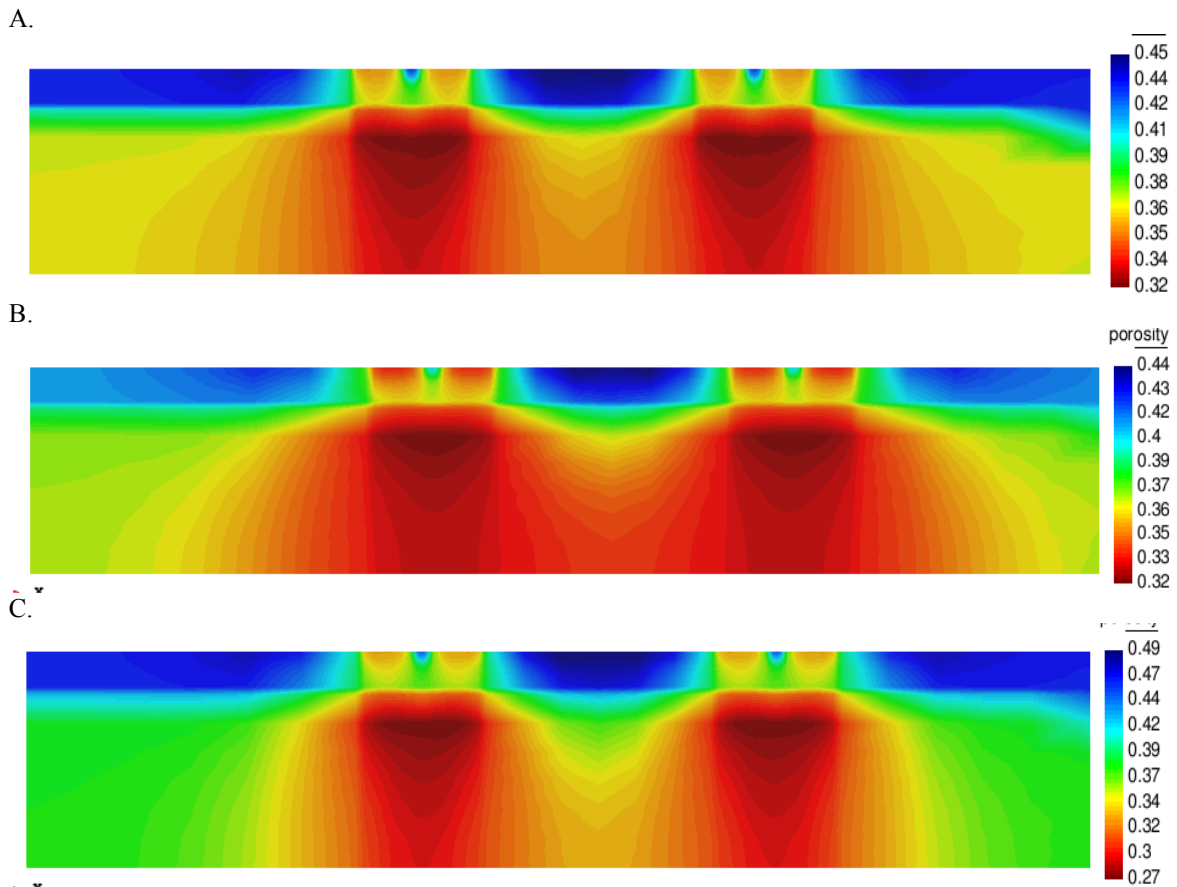
**Figura 23.** Variação da porosidade do solo após a passagem do pneu dianteiro do trator para as umidades de 10% (A), 15% (B) e 20% (C) até 1,00 m de profundidade.

Com relação as rodas dianteiras do trator a 10% de umidade (Figura 23) a porosidade na camada de 0,0-0,20 m variou da inicial 43,6% para 38%, em baixo das cargas e, com um acréscimo para 44% no centro entre rodas, região da maior densidade radicular. Na profundidade de 0,20-1,00 cm, as porosidades têm um ligeiro decréscimo, variando de 37,2% chegando a valores de 35% no bulbo de tensão das rodas.

De maneira geral a região que ocorreu as maiores reduções da porosidade para o pneu dianteiro do trator foi para a umidade de 20%, a menor 34% e a maior 47%, o mesmo ocorreu para o pneu traseiro trator. Há um aumento de 1% na porosidade para as umidades de 10% e 20% e, 2% de acréscimo na umidade de 15% na região do sistema radicular, podendo trazer inúmeros benefícios, como melhora da infiltração, aeração nesta região.

A variação da porosidade do solo após a passagem do pneu traseiro do caminhão, Figura 28. Na umidade de 10%, na profundidade de 0,0 0-0,20 m a porosidade variou de 43%, inicial para 45 % entre rodas (Figura 24 A).





**Figura 24.** Variação da porosidade do solo após a passagem dos pneus do eixo do traseiro do caminhão para as umidades de 10% (A), 15% (B) e 20% (C) até 1,00 m de profundidade.

Na profundidade de 0,20 até 1,00 m, 10% de umidade, a inicial era de 37,2% com as maiores reduções dos valores, com mínimo de 32%, na região abaixo dos pneus. Na umidade de 15% (Figura 24B) na profundidade de 0,0 0-0,20 m a porosidade variou de 41%, inicial com as maiores reduções embaixo dos pneus traseiro; na profundidade de 0,20 até 1,00 m, 15% de umidade, a inicial era de 38,6% com as maiores reduções dos valores, com mínimo de 32%, na região abaixo dos pneus. Na umidade de 15%, Figura 28C, na profundidade de 0,00-0,20 m a porosidade variou de 41%, inicial com as maiores reduções embaixo dos pneus traseiro; na profundidade de 0,20 até 1,00 m, 20% de umidade, a inicial era de 38,6% com as maiores reduções dos valores, com mínimo de 27%, na região abaixo dos pneus.

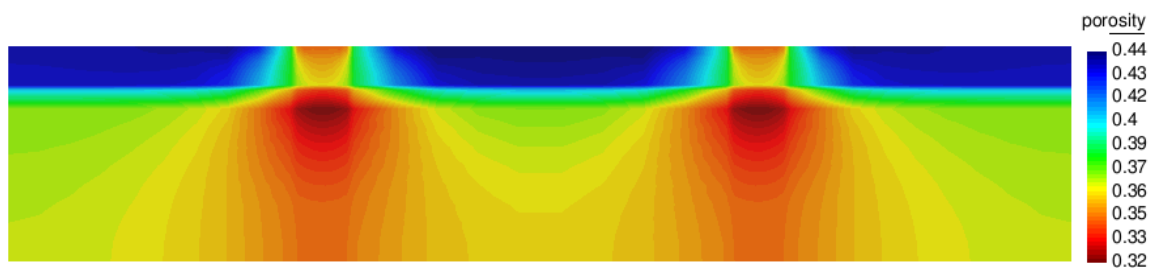
Nota-se mais uma vez que entre os conjuntos de rodas, centro do eixo há um acréscimo de porosidade de 43,6% para 45%, 44% e 49% para as umidades de 10%, 15% e

20%, respectivamente. Mais uma vez as maiores variações ocorreram para a umidade de 20%.

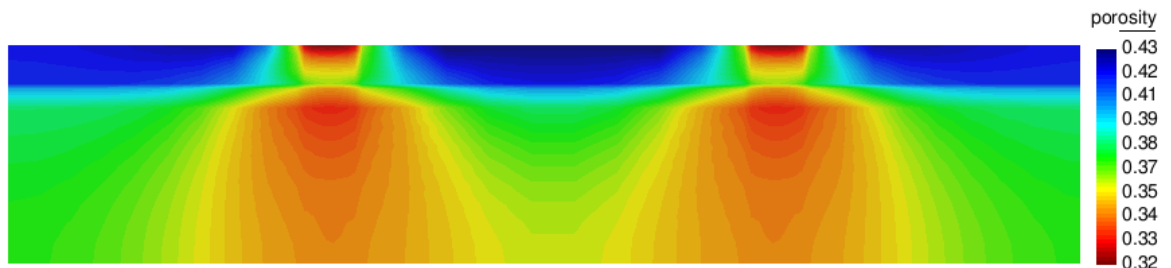
Há um aumento de 2% na porosidade total para as umidades de 10% (A) e 3% de acréscimo na umidade de 15% (B) e 20% (C) na região do sistema radicular, podendo trazer inúmeros benefícios, como melhora da infiltração, aeração nesta região.

Na Figura 25 está apresentada a variação da porosidade do solo após a passagem do pneu dianteiro do caminhão. Na umidade de 10%, na profundidade de 0,0 0-0,20 m a porosidade variou de 43,6%, inicial com as maiores reduções embaixo dos pneus dianteiro (Figura 29A). Para a profundidade de 0,20 até 1,00 m, 10% de umidade, a inicial era de 37,2% com as maiores reduções dos valores, com mínimo também de 32%, na região abaixo dos pneus. Na umidade de 15%, Figura 25B, na profundidade de 0,0 0-0,20 m a porosidade variou de 41%, inicial com as maiores reduções embaixo dos pneus dianteiro; na profundidade de 0,20-1,00 m, 15% de umidade, a inicial era de 38,6% com as maiores reduções dos valores, com mínimo de 32%, na região abaixo dos pneus.

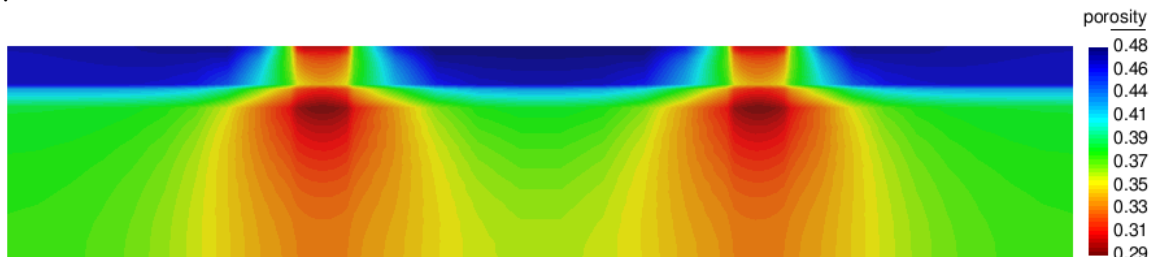
A.



B.



C.



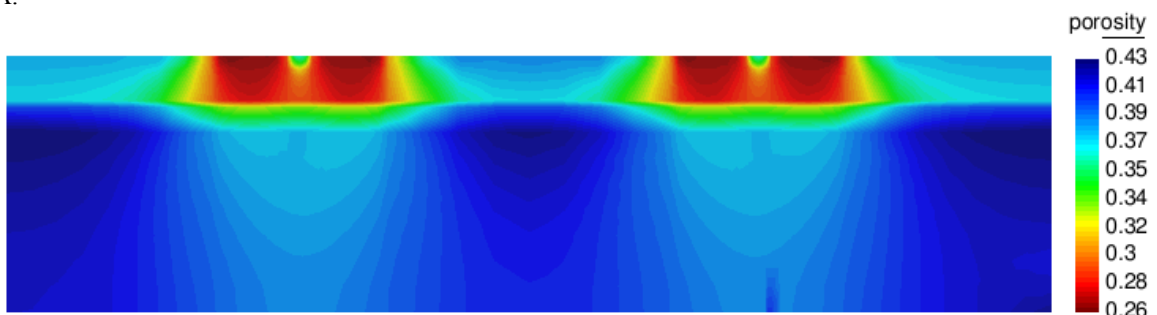
**Figura 25.** Variação da porosidade do solo após a passagem dos pneus do eixo dianteiro do caminhão para as umidades de 10% (A), 15% (B) e 20% (C) até 1,00 m de profundidade.

Na umidade de 20%, Figura 17C, na profundidade de 0,0-0,20 m a porosidade variou de 41%, inicial com as maiores reduções embaixo dos pneus dianteiro; na profundidade de 0,20 até 1,00 m, 20% de umidade, a inicial era de 38,6% com as maiores reduções dos valores, com mínimo de 27%, na região abaixo dos pneus.

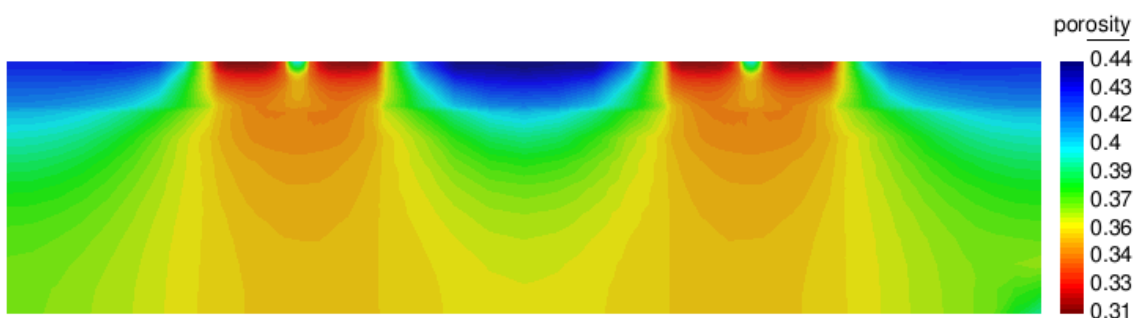
Mais uma vez, nota-se que entre os conjuntos de rodas do eixo dianteiro, centro do eixo há um acréscimo de porosidade de 43,6% para 44%, 43% e 48% para as umidades de 10% e 20%, respectivamente, na camada de 0,0-0,20 m; ou seja, nessa região há uma expansão o que auxilia o sistema radicular. Mais uma vez as maiores variações ocorreram para a umidade de 20%.

Há um aumento de 2% na porosidade as umidades de 10% (A) e 3% de acréscimo na umidade 15% (B) e 20% (C) na região do sistema radicular, podendo trazer inúmeros benefícios, como melhora da infiltração, aeração nesta região.

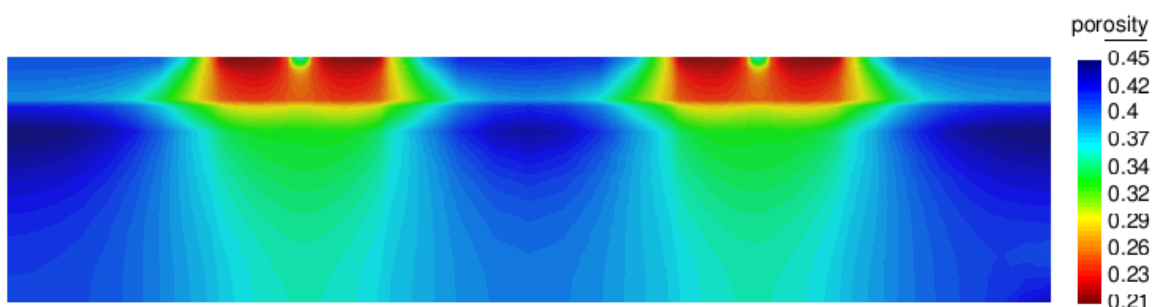
A.



B.



C.



**Figura 26.** Variação da porosidade do solo após a passagem dos pneus do Reboque para umidades de 10% (A), 15% (B) e 20% (C) até 1,00 m de profundidade.

Após a passagem do pneu do Reboque, Figura 26, a variação da porosidade do solo na umidade de 10%, na profundidade de 0,0-0,20 m variou de 43,6%, inicial com as maiores reduções em baixo dos pneus, com valores de 26%.

Para a profundidade de 0,20 até 1,00 m, 10% de umidade, a inicial era de 37,2% com as maiores reduções dos valores, com mínimo também de 34%, na região abaixo dos pneus. Na umidade de 15%, Figura 26B, na profundidade de 0,00-0,20 m a porosidade variou de 41%, inicial com as maiores reduções embaixo dos pneus dianteiro para 31%; na profundidade de 0,40-1,00 m, a inicial era de 38,6% com as maiores reduções dos valores, com mínimo de 32%, na região abaixo dos pneus. Para umidade de 20%, Figura 26C, na profundidade de 0,0-0,20 m a porosidade variou de 41%, inicial com as maiores reduções de 21% embaixo dos pneus dianteiro; na profundidade de 0,40 até 1,00 m, a inicial era de 38,6% com as maiores reduções dos valores, com mínimo de 32%, na região abaixo dos pneus no bulbo de tensões.

Para o Reboque, entre os conjuntos de rodas do eixo, centro do eixo há um acréscimo de porosidade de 43,6% para 43%, 44% e 45% para as umidades de 10%, 15% e 20%, respectivamente, na camada de 0,0-0,20 m; ou seja, nessa região há uma pequena expansão, ao contrário dos outros veículos: trator e caminhão, que de certa forma auxilia o sistema radicular. Mas, ao contrário dos demais as maiores reduções de porosidade ocorreram na camada de 0,0-0,20 m. Também, mais uma vez as maiores variações ocorreram para a umidade de 20%. Após passagem do Reboque ocorreu as maiores reduções da porosidade na camada de 0,0-0,20 m com 43%, 41% e 41% para 26%, 31% e 21%, respectivamente. Também o Reboque proporcionou as menores expansões da região radicular.

Há um aumento de 2% na porosidade as umidades de 10% (A) e 3% de acréscimo na umidade de 15% (B) e 20% (C) na região do sistema radicular, podendo trazer inúmeros benefícios, como melhora da infiltração, aeração nesta região. As rodas duplas não ajudam no aumento de porosidade na região do sistema radicular da cultura.

Com a redução da porosidade provocada pela passagem dos pneus dos veículos utilizados, reduz assim a quantidade de água disponível, podendo reduzir a produtividade. Essa alteração na porosidade tem reflexo direto em outras propriedades do solo, como a redução das trocas gasosas e o favorecimento do encharcamento temporário, que reduz a infiltração e altera a absorção de nutrientes. Ou seja, com a compactação do solo, a água proveniente da chuva não penetra no solo e essa umidade pode fazer falta no ciclo da

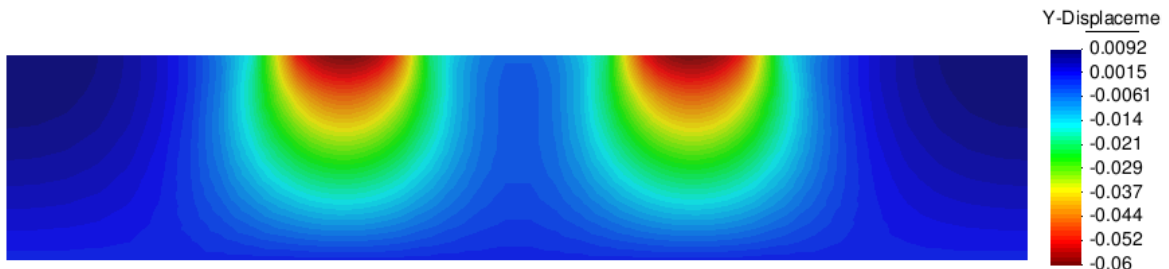
cultura. Contudo, o fator mais afetado pela compactação é o crescimento radicular, que é restringido.

### Deslocamentos

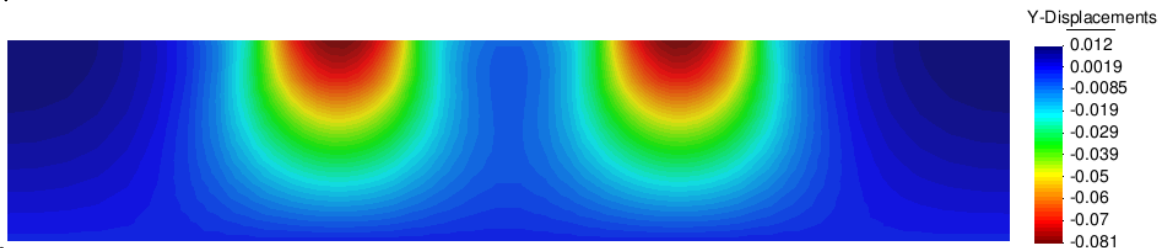
Na Figura 27, está apresentada a variação dos deslocamentos, em metros, provocados pela passagem dos pneus do eixo traseiro do Trator, enquanto na Figura 28, para os pneus do eixo dianteiro do Trator. Os deslocamentos após a passagem do eixo traseiro do Caminhão estão mostrados na Figura 29, enquanto do eixo dianteiro do Caminhão na Figura 30 e finalmente na Figura 31, o deslocamento provocado pela passagem dos pneus do Reboque canavieiro.

Para os pneus do eixo traseiro do Trator, os menores deslocamentos (0,06) foram alcançados para o solo na umidade 10% (Figura 27A) e os maiores (0,096) para 20% (Figura 27C). Enquanto para os pneus do eixo dianteiro do Trator, os menores deslocamentos (0,064) foram alcançados para a umidade 10% (Figura 28A) e os maiores (0,094) também para 20% (Figura 28C).

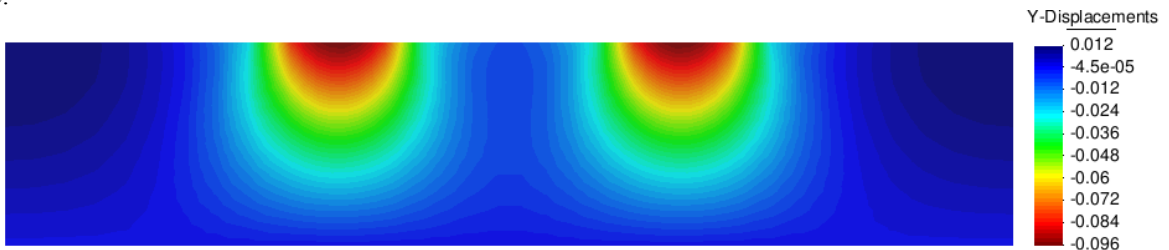
A.



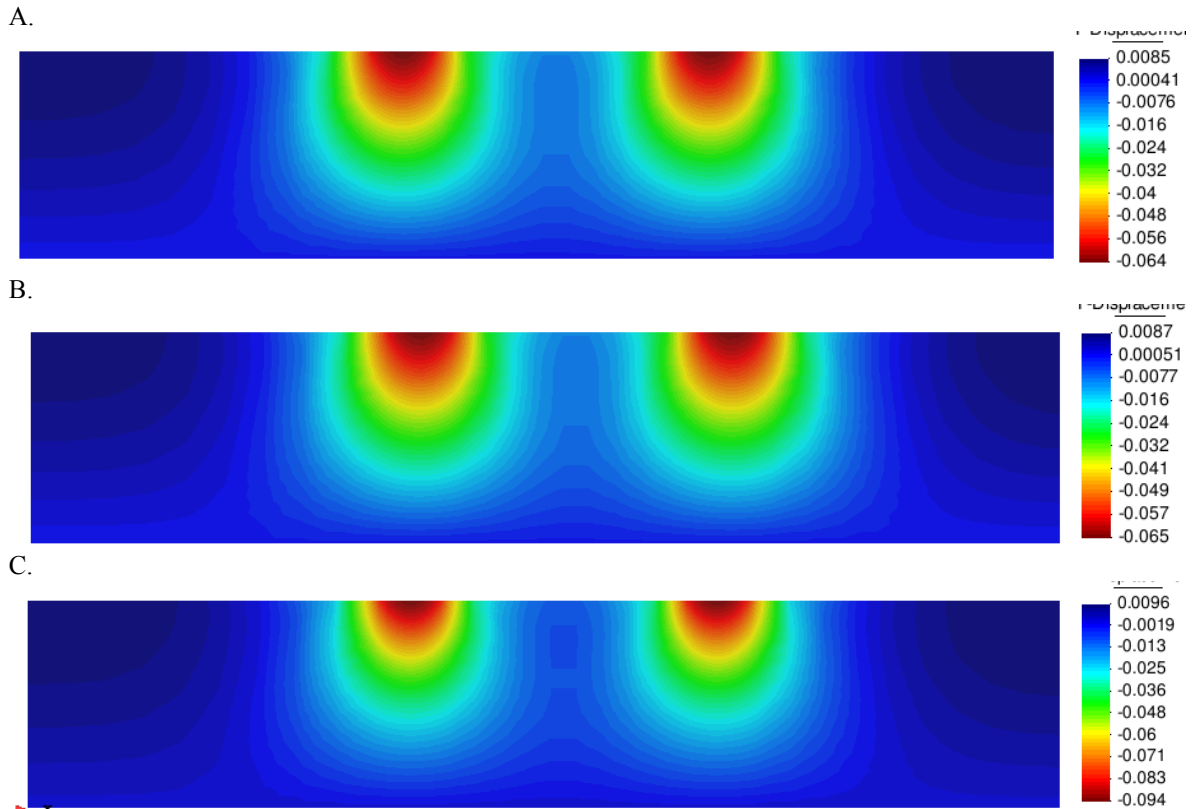
B.



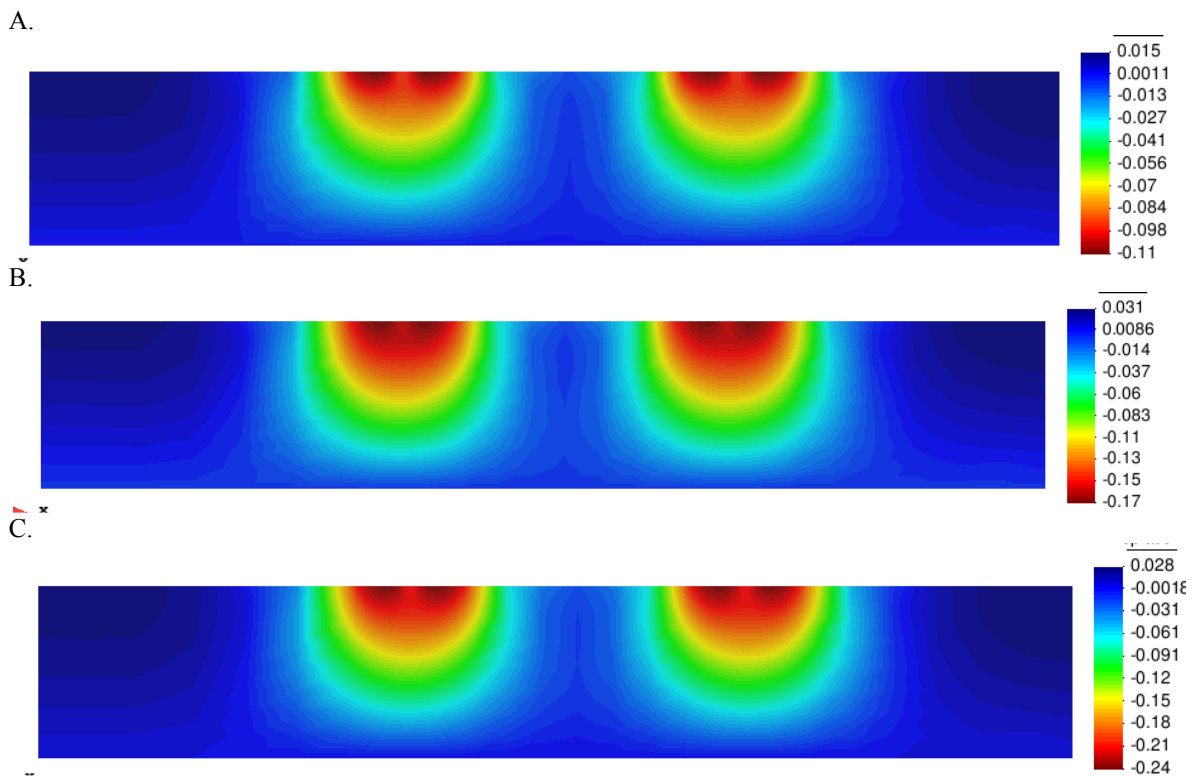
C.



**Figura 27.** Variação do deslocamento no solo sob o eixo traseiro do trator para as umidades de 10% (A), 15% (B) e 20% (C) até 1,00 m de profundidade.

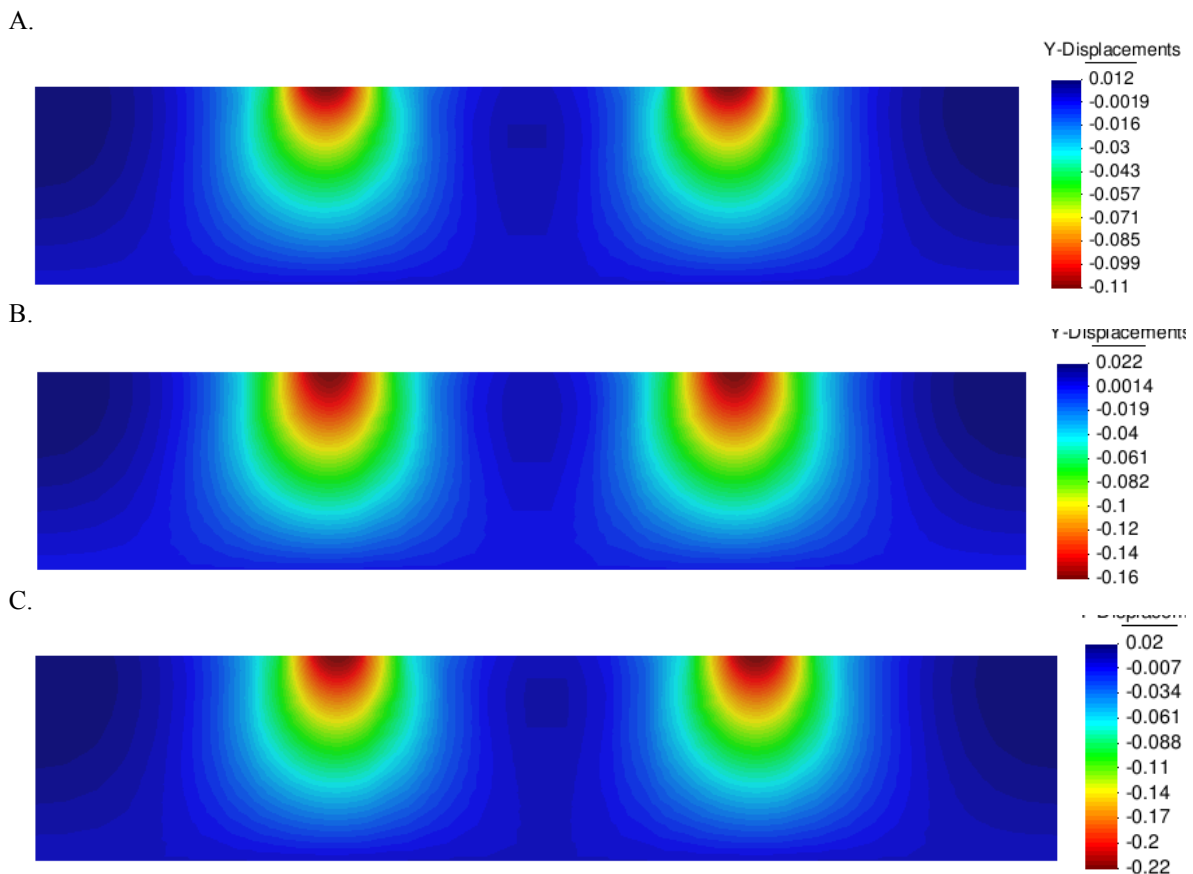


**Figura 28.** Variação do deslocamento no solo sob o eixo dianteiro do trator para as umidades de 10% (A), 15% (B) e 20% (C) até 1,00 m de profundidade.



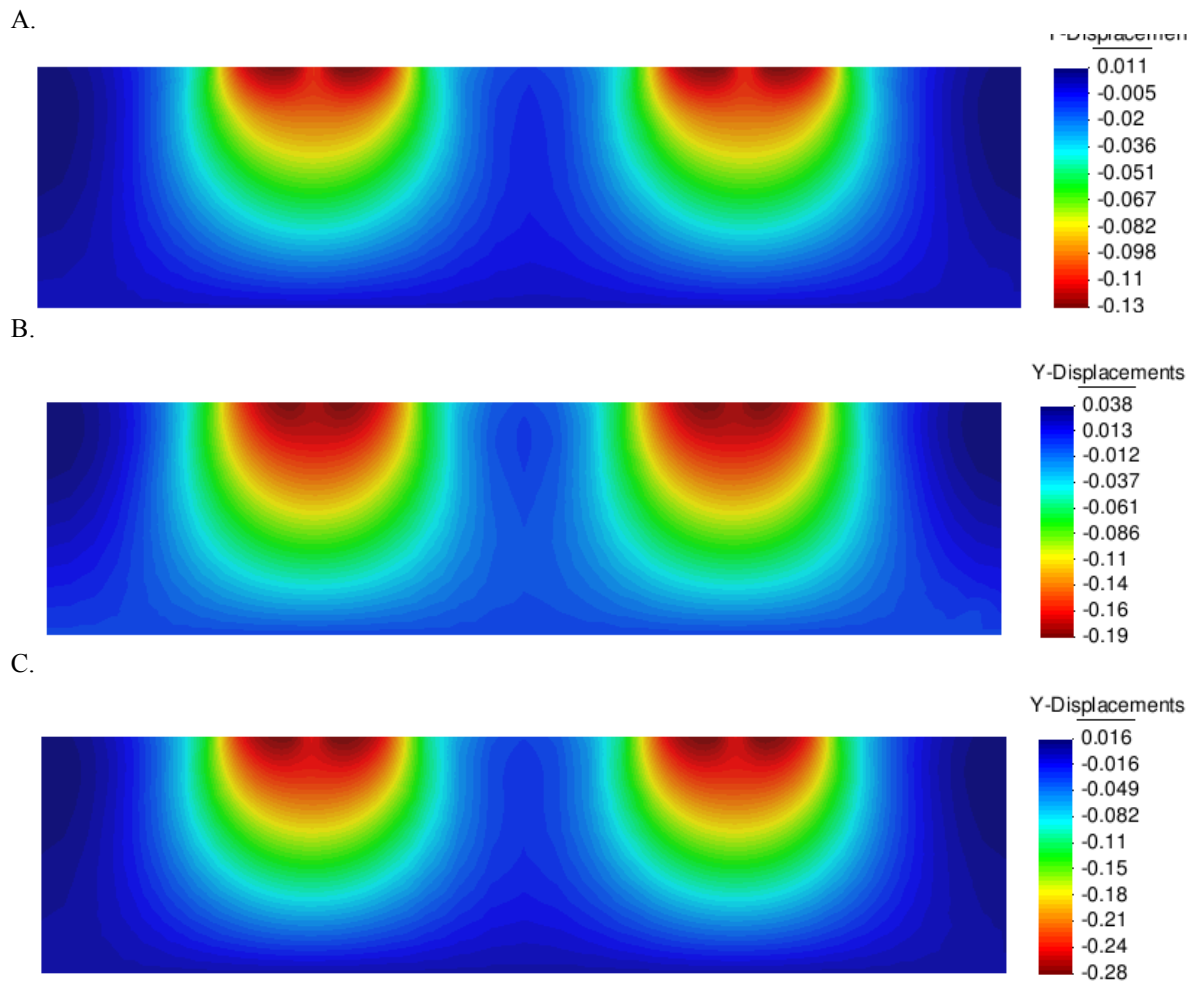
**Figura 29.** Variação do deslocamento no solo sob o eixo traseiro do Caminhão para as umidades de 10% (A), 15% (B) e 20% (C) até 1,00 m de profundidade.

Na passagem dos pneus do eixo traseiro do Caminhão, os menores deslocamentos (0,11) foram obtidos para a umidade 10% (Figura 29A) e as maiores (0,22 m) para a umidade 20% (Figura 29 C), como ocorreram para os dois eixos do trator. Para o caso da passagem dos pneus do eixo dianteiro do Caminhão, os menores deslocamentos (0,11) ocorreram para a umidade de 10% (Figura 30A) e os maiores (0,22) para 20%.



**Figura 30.** Variação do deslocamento no solo sob o eixo dianteiro do Caminhão para as umidades de 10% (A), 15% (B) e 20% (C) até 1,00 m de profundidade.

No caso específico dos pneus do Reboque, eixo dianteiro ou traseiro, os menores (0,13) deslocamentos ocorreram para a umidade 10% (Figura 31A) e as maiores (0,28) para a umidade 20%. Na Figura 30 pode se observar a umidade e o deslocamento são diretamente proporcionais, lembrando que o estudo acima não leva em conta o componente hidráulico, nem os parâmetros físicos da camada do solo abaixo de 40 cm, o maior deslocamento está na umidade mais alta, chegando a 28 cm no caso das rodas do reboque, as quais de todos os veículos apresenta maior carregamento



**Figura 31.** Variação do deslocamento no solo sob o eixo do Reboque para as umidades de 10% (A), 15% (B) e 20% (C) até 1,00 m de profundidade.

Pode ser observado também que a região entre rodas, região do sistema radicular sofre com a força do deslocamento, podendo ser observado pela cor mais clara que a original, o mesmo acontece com o eixo traseiro do caminhão (Figura 29) e os eixos do trator. As rodas duplas mesmo agem como uma única roda larga assim como o trator atingido a região entre rodas, o que não acontece com a roda simples do caminhão, embora mais pesada que a maioria. Este fenômeno pode ser visto pelo encontro de bolbos na região entre roda.

## CONCLUSÕES

- As maiores tensões transmitidas foram com a passagem dos pneus do Reboque.
- A propagação de tensão, assim como a diminuição da porosidade e aumento do deslocamento aumentam com o acréscimo de umidade.



- O acréscimo de umidade de 10% para 15% e 20%, agrava o risco de compactação do solo.
- Para o Argissolo Amarelo distrocoeso estudado, com o carregamento houve acréscimo nos valores de porosidade de até 4%, em relação a inicial, na região do sistema radicular.
- Os veículos que mais causam compactação são os de maior carregamento, como as rodas do caminhão dianteiro e reboque.
- Todos os veículos estudados causaram compactação adicional na camada de 0-20 cm para todas as umidades.
- O controle de tráfego pode ser um importante aliado para evitar a compactação do solo, pois as maiores alterações são provocadas pela passagem dos veículos na entre linha da cana-de-açúcar.

### **Bibliografia**

- Abbo, A. J. Finite element Algorithms for Elastoplasticity and Consolidation. PhD Thesis, University of Newcastle, 271 p. 1997.
- Alakukku, L., Weiskopf, P., Chamen, W. C. T.; Tijink, F. G. J., Van Der Linden, J. P., Pires, S., Sommer, C., Spoor, G. Prevention strategies for field traffic-induced subsoil compaction: a review. Part 1. Machine/soil interactions. *Soil & Tillage Research*, v.73, p.45-160, 2003.
- Alonso, E. E., Gens, A.; Josa, A. A. constitutive model for partially saturated soils. *Géotechnique*, v.40, p. 405-430, 1990.
- Balastreire, L. A. Maquinas agrícolas. São Paulo: Manole. 310 p. 1987.
- Bathe, K. J. Finite Element Procedures. Prentice Hall, England Cliffs, New Jersey, 49p. 1996.
- Brady, N. C. Natureza e propriedades dos solos. São Paulo: F. Bastos. 5. ed. p.647, 1979.
- Braunbeck, O. A., Magalhães, P. S. G. Avaliação tecnológica da mecanização da cana-de-açúcar. *Bioetanol de Cana-de-Açúcar: P&D para Produtividade e Sustentabilidade*. v.5, 14p. 2010.
- Borja, R. I. Plasticity, Modeling e Computation. Springer, 54 p. 2013.
- Boussinesq, J. Application des Potentiels a l'étude de l'équilibre et Du Mouvement des Solides Elastiques (Aplication of Potentials in the Study of the Equilibrium and the Movement of the Elastic Body). Gauthier-Villars, Paris, p.30, 1885.
- Buckman, H. O., Brady, N.C. Natureza e propriedade dos solos. Rio de Janeiro. 7.ed. 594 p. 1989.

- Chissolucombe, I. Simulação numérica para avaliação de danos em edificações adjacentes a uma escavação de um túnel. Dissertação Mestrado. Brasília: UNB, p.194, 2001.
- Chadwick, P. Continuum Mechanics. Wiley, p. 65, 1976.
- Collares, G. L., Reinert, D. J., Reichert, J. M., Kaiser, D. R. Compactação de um Latossolo induzida pelo tráfego de máquinas e sua relação com o crescimento e produtividade de feijão e trigo. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.32, p.933-942, 2008.
- Conab. Acompanhamento de safra brasileira: cana-de-açúcar, primeiro levantamento, maio/2016 - Companhia Nacional de Abastecimento. – Brasília: Conab, 2016.
- Davis, R. O., Selvadurai, A. P. S. Plasticity and Geomechanics. Cambridge University Press, 2002.
- Defosse, P., Richard, G., Boizarf, H., O’Sullivan, M.F. Modeling change in soil compaction due to agricultural traffic as function of soil water content. Geoderma. v.116, p.89-115, 2003.
- Dias Junior, M. S. Pierce, F. J. Revisão de literatura: O processo de compactação do solo e sua modelagem. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.20, p.175-182, 1996.
- Fao. Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura, 2016.
- Farias, C. H. A.; Fernandes, P. D.; Gheyi, H. R.; Dantas Neto, J. Qualidade industrial de cana-de-açúcar sob irrigação e adubação com zinco, em Tabuleiro Costeiro paraibano. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.13, p.419–428, 2009.
- Frohlich, O. K. Druckverteilungim Baugrunde (Pressure Distribution in Soil Foundation). Springer, Wien, 178 p. 1934.
- Gens, A. Potts, D. M. Critical state models in computational geomechanics, Engineering Computation, v.5, p.178-197, 1988.
- Gens A. Nova R. Conceptual bases for a constitutive model for bonded soils and weak rocks, Geotechnical Engineering of Hard Soils – Soft Rocks, v.1, p.485-494, 1993.
- Gomes, I. F. Implementação de métodos explícitos de integração com controle de erro para modelos elastoplásticos e visco-elastoplásticos. Dissertação Mestrado. Recife: UFPE, 98 p. 2006.
- Gomes, I. F. Implementação em elementos finitos das equações de pressão e saturação para problemas de fluxo bifásico em reservatórios de petróleo deformáveis. Tese Doutorado. Recife: UFRPE, 100f. 2009.
- Guimarães, L. N. Análisis multi-componente no isoterme en medio poroso deformable no saturado, Barcelona, 78 p. 2002.

- Hamza, M. A., Anderson, W. K. Soil compaction in cropping systems A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil & Tillage Research*. v.82, p.121-14, 2005.
- Hinton, E., Owen, D. R. J., *Finite Element Programming*. Academic Press, London, UK, 1977.
- Keller, T., Defosse, P., Weisskopf, P., Arvidsson, J., Richard, G. SoilFlex: A model for prediction of soil stresses and soil compaction due to agricultural field traffic including a synthesis of analytical approaches. *Soil & Tillage Research*. v.93, p.391, 2007.
- Keller, T., Arvidsson, J. Technical solutions to reduce the risk of subsoil compaction: effects of dual wheels, tandem wheels and tyre inflation pressure on stress propagation in soil. *Soil & Tillage Research*. v.79, p.191-205, 2004.
- Koolen, A. J., Kuipers, H. *Agricultural Soil Mechanics: Advanced Series in Agricultural Sciences*, v.13, p.241, 1983.
- Lai, W. M., Rubin, D. Krempf, E. *Introduction to Continuum Mechanics*, Pergamon, 89 p. 1993.
- Larson, W. E., Gupta, S. C., Useche, R. A. Compression of agricultural soils from eight soil orders. *Soil Science Society of America Journal*. v.44, p.450-457, 1980.
- Lamande, M., Schjonning, P. Transmission of vertical stress in a real soil profile. Part II: Effect of tyre size, inflation pressure and wheel load. *Soil & Tillage Research*. v.114, p.71-77, 2010.
- Lozano, N.; Rolim, M. M.; Oliveira, V. S.; Tavares, U. E.; Pedrosa, E. M. R. Evaluation of soil compaction by modeling field vehicle traffic with SoilFlex during sugarcane harvest. *Soil & Tillage Research*, v.129, p.61-68, 2013.
- Magno Junior, R. G. Avaliação de sistemas de preparo do solo para a cultura da cenoura (*Daucus carota L.*) visando a colheita mecanizada. Tese Doutorado. Viçosa: UFV, 85f. 2012.
- Mesquita, M. G. B. F.; Moraes, S. O. A dependência entre a condutividade hidráulica saturada e atributos físicos do solo. *Ciência Rural*, v.34, p. 963-969, 2004.
- Mion, R. L., Pereira, V. P., Sombra, W. A.; Andrade, R. R., Cordeiro, I. M.; Nunes, K. Preconsolidation of Ultisol subjected to the traffic of agricultural tractors. *Revista Ciências Agrárias*, v.56, p.69-72, 2013.
- Oliveira, V. S. Compactação dos solos coesos dos tabuleiros costeiros de Alagoas. Tese Doutorado. Recife: UFRPE, 81f. 2008.
- Olivella, S., Carrera, J., Gens, A. Alonso, E. E. No isothermal multiphase flow of brine and gas through saline media. *Transport in Porous Media*, v.15, p. 271-293. 1994.

- Olivella, X. O., Bosch, C. A. S. Mecánica del medios continuos para ingenieros. Edicions de la Universitat Politècnica de Catalunya, 45p. 2002.
- Olivella, S., Carrera, J., Gens, A., Alonso, E. E. Numerical formulation for a Simulator (CODE\_BRIGTH) for the coupled analysis of saline media. Engineering Computations, v.7, p.87-112, 1995.
- O'Sullivan, M. F., Robertson, E. A. G. Critical state parameters from intact samples of two agricultural. Soil & Tillage Research. v.39, p.161-173, 1996.
- Pedroso, D. M. Modelos elastoplásticos para solos argilosos: capacidade de previsão decomportamento e integração da relação constitutiva. Dissertação Mestrado, Brasília: UNB, 171f. 2002.
- Prat, P., Gens, A. Leyes de Comportamento de Materiales. Curso de Master, Metodos Numéricos para Cálculo y Diseño em Ingenieria, Barcelona, Febrero, 2003.
- Potts, D. M.; Zravkovic, L. Finite element analysis in geotechnical engineering. Published by Thomas Telford Publishing, London, v.1, p.440, 1999.
- Poodt, M. P. Koolen A. J. Van der Linden J. P. FEM analysis of subsoil reaction on heavy wheel loads with emphasis on soil preconsolidation stress and cohesion. v.73, p.67-76, 2003.
- Reinert, D. J.; Robaina, A. D.; Reichert, J. M. Compress – software e proposta de modelo para descrever a compressibilidade do solo e seus parâmetros. Congresso Brasileiro de Ciência do Solo. Ribeirão Preto: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2003. CD Rom.
- Richards, L. A. Physical conditions of water in soil. In: Black, C. A. (Ed.) Methods of soil analysis. Madison: American Society for Testing and Materials, p.128-152, 1965.
- Roscoe, K. H., Burland, J. B. On the Generalized Stress Strain Behavior of wet Clay. Engineering Plasticity. Cambridge: Univ. Press. P. 535-609, 1968.
- Sanchez, M., Gens, A., Guimarães, L. J. N., Olivella, S. A. Double Structure Generalized Plasticity Model for Expansive Materials. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, v.29, p.751-787, 2005.
- Santos, R. A. Propriedades de retenção de água por espaços porosos não homogêneos: experimentos de laboratório e simulação computacional. Dissertação Mestrado, Ponta Grossa: UEPG, 124f. 2005.
- Sohne, W. Druckverteilungim Boden und Bodenverformungunter Schlepperreifen (Preassure Distribution in the Soil and Soil Deformation Under Tractor Tyres), v.5. Grundlagen Landtechnik, p.373-400, 1953.

- Schjonning, P., Lamande, M., Togersen, F. A., Arvidsson, J., Keller, T. Modelling effects of tyre inflation pressure on the stress distribution near the soil-tyre interface. *Biosystems Engineering*. v.99, p.119-133, 2008.
- Schofield, A. N., Wroth, C. P., *Critical State Soil Mechanics*. McGraw-Hill, NewYork, 1968.
- Severiano, E. C., Oliveira, G. C., Dias Junior, M. S., Castro, M. B., Oliveira, L. C., Costa, K. P. Compactação de solos cultivados com cana-de-açúcar: I - Modelagem e quantificação da compactação adicional após as operações de colheita. *Engenharia Agrícola*, v.30, p.404-413, 2010.
- Simo, J. C., Hughes, T. J. R. *Elastoplasticity and viscoplasticity – computational aspects*, 1988.
- Souza Neto, E. A., Peric, D., Owen, D. R. J. *Computational Methods for Plasticity: Theory and Applications*. Wiley, 2008.
- Tavares, U. E. Resistencia mecânica e atributos físicos de um Argissolo submetidos a diferentes preparos de solo. Tese Doutorado. Recife: UFRPE, 90f. 2016.
- Vallipan, S. *Continuum Mechanics Fundamentals*. A. A. Balkema, Rotterdam, Netherlands. 67p. 1981.
- Vizzotto, V. R. Desempenho de mecanismos sulcadores de semeadora-adubadora sobre os atributos físicos do solo em várzea no comportamento da cultura da soja (*Glycine Max L.*). Tese Doutorado. Santa Maria: UFSM, 78f, 2014.
- Zienkiewicz, O. C., Morgan, K., *Finite Elements Approximation Procedures in Engineering*. John Wiley, 91p. 1984.
- Zienkiewicz, O. C., Pande, G. N. Some useful forms for isotropic yield surfaces for soils and rock mechanics. *Finite Element in Geomechanics*, Chichester. Wiley, p.179-190, 1977.