

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**VICTOR PAZ BORTOLON**

**ANÁLISE DE FATORES INTERVENIENTES NA PROPAGAÇÃO DE TRINCAS DE  
CIMA PARA BAIXO EM PAVIMENTOS ASFÁLTICOS A PARTIR DO *SOFTWARE*  
ABAQUS**

**PATO BRANCO**

**2023**

**VICTOR PAZ BORTOLON**

**ANÁLISE DE FATORES INTERVENIENTES NA PROPAGAÇÃO DE TRINCAS DE  
CIMA PARA BAIXO EM PAVIMENTOS ASFÁLTICOS A PARTIR DO SOFTWARE  
ABAQUS**

**Analysis of intervening factors in the propagation of top-down cracking in  
asphalt pavements using the ABAQUS software**

Trabalho de conclusão de curso de graduação  
apresentada como requisito para obtenção do título  
de Bacharel em Engenharia Civil da Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).  
Orientador(a): Prof. Dr. Danilo Rinaldi Bisconsini.

**PATO BRANCO**

**2023**



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

**VICTOR PAZ BORTOLON**

**ANÁLISE DE FATORES INTERVENIENTES NA PROPAGAÇÃO DE TRINCAS DE  
CIMA PARA BAIXO EM PAVIMENTOS ASFÁLTICOS A PARTIR DO SOFTWARE  
ABAQUS**

Trabalho de conclusão de curso de graduação  
apresentada como requisito para obtenção do título  
de Bacharel em Engenharia Civil da Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).  
Orientador(a): Prof. Dr. Danilo Rinaldi Bisconsini.

Data de aprovação: 23/Junho/2023

---

Prof. Dr. Danilo Rinaldi Bisconsini  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Pato Branco

---

Prof. Me. Jairo Trombetta  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Pato Branco

---

Prof. Me. Anthony Gomes dos Santos  
Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC-USP)

**PATO BRANCO**

**2023**

## **AGRADECIMENTOS**

Ao professor Danilo, pela orientação, disposição, confiança e admirável paciência nesse período.

Aos demais professores, por todo conhecimento compartilhado.

Aos meus colegas de curso, pela ajuda para chegar até esse momento.

Aos meus pais, por todo amor, doação e exemplo.

Aos meus irmãos, pela compreensão e inspiração.

Aos meus avós, pelo amor incondicional e toda a sua sabedoria.

Aos meus amigos, pela lealdade e momentos inesquecíveis.

À querida Sophie, pelo companheirismo, carinho e pureza.

A todos aqueles que fizeram parte desse caminho e de alguma forma contribuíram para que esta etapa fosse concluída.

O sucesso não é definitivo e o fracasso não é fatal: O que realmente importa é a coragem para continuar.  
(CHURCHILL; WINSTON).

## RESUMO

O surgimento de trincas de cima para baixo, a partir da camada superior do pavimento asfáltico, é considerado de rara ocorrência nos pavimentos brasileiros, possivelmente devido à baixa variação de temperatura na superfície e às espessuras delgadas de revestimento utilizadas no país. Entretanto, a iminente implantação de uma nova forma de dimensionamento, possivelmente irá resultar em camadas de revestimento mais espessas, ao considerar características locais do subleito e principalmente ao proteger o revestimento de trincas por fadiga, podendo criar um ambiente mais propício para que o trincamento de cima para baixo ocorra com maior frequência. Este trabalho busca investigar quais são os principais fatores que influenciam na ocorrência desse tipo de trincas, e posteriormente analisar alguns desses fatores, a partir de combinações de diferentes espessuras do revestimento, carregamentos e a substituição do conjunto de pneus duplos pelo pneu extralargo. Através do software de elementos finitos Abaqus, as variações de estruturas modeladas geram resultados em função de tensões, deformações e deslocamentos por gráficos em 3D. A distribuição da pressão de contato ao longo da área foi simulada baseando-se em medições experimentais de referência, as quais mostram que a pressão de contato é maior que a pressão de enchimento dos pneus, além de ser distribuída em função da carga e pressão de enchimento, tendo duas formas padrões de distribuição, lembrando a letra “m” para baixa pressão com alta carga, e “n” para baixa carga e alta pressão. Os resultados foram comparados com foco nos principais mecanismos causadores de trincas de cima para baixo, segundo a bibliografia existente. Mostrou-se que as tensões cisalhantes no sentido transversal da pista, estão localizadas com maior intensidade nas bordas externas dos pneus. As tensões transversais tiveram maior magnitude no topo do revestimento que as tensões longitudinais. Concluiu-se que o surgimento das trincas de cima para baixo está relacionado diretamente com a carga e sobrecarga aplicadas no pavimento.

Palavras-chave: pavimentos flexíveis; trincamento; análise estrutural (engenharia); método dos elementos finitos.

## ABSTRACT

Top-down cracking is a failure mechanism in flexible pavements, considered to be a minor problem in Brazilian pavements, mainly for its rare frequency, possible to many factors such as the low-temperature variation at the surface and most usage of thin asphalt layers in the country. However, the oncoming mechanistic pavement design can result in thicker asphalt layers, as usual in most countries of the northern hemisphere, mostly by considering subgrade material singularities and fatigue cracking predictions. This paper's main objective is to investigate the possible major causes for top-down cracking, and posterior analysis of them with a FE model design and structural response test. Abaqus is a mechanical simulation software that provides stress, strain, and deflection results, in three-dimensional graphics, for structural analysis by finite elements model. The contact pressure distribution was simulated by the usage of experimental values in previous works, which have been discovered it's a non-equal distribution of pressure at the contact area between the tire and surface layer. It is known that tire pressure distribution can be by two main forms: low tire pressure/high load makes the "m" distribution, defined by its higher pressure at tire lateral edges, and high pressure/lower loads results in the "n" distribution, with higher pressure on the center of the contact area. The main results have been analyzed and focused on the main top-down cracking mechanisms, as seen in the literature review. Higher transverse shear stresses are localized right below tire edges and can be a major cause of surface occurrence, because of its low distribution for the base layer. The inverse can be seen for longitudinal shear stresses, which indicates a more fatigue-cracking connection for them.

Keywords: flexible pavement; top-down cracking; structural analysis (engineering); finite element method.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>9</b>
1.1	OBJETIVO GERAL.....	10
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	10
1.3	JUSTIFICATIVA .....	10
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>11</b>
2.1	CONDIÇÃO DA MALHA RODOVIÁRIA.....	11
2.2	PAVIMENTO .....	13
2.3	MATERIAIS CONSTITUINTES .....	15
2.4	CONDIÇÃO FUNCIONAL.....	17
2.4.1	IRREGULARIDADE LONGITUDINAL .....	17
2.5	PRINCIPAIS DEFEITOS DE SUPERFÍCIE .....	18
2.6	TRINCAS POR FADIGA.....	21
2.6.1	MÓDULO DE RESILIÊNCIA.....	23
2.7	TRINCAS DE CIMA PARA BAIXO .....	25
2.7.1	DEFINIÇÃO .....	25
2.7.2	PROVÁVEIS CAUSAS DE TDC.....	28
2.7.3	MISTURA ASFÁLTICA MORNA (WMA).....	33
<b>3</b>	<b>MÉTODO.....</b>	<b>35</b>
3.1	PARÂMETROS DEFINIDOS .....	35
3.2	AMBIENTE DO SOFTWARE.....	40
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>47</b>
<b>5</b>	<b>QUADRO RESUMO DE RESULTADOS OBTIDOS .....</b>	<b>61</b>
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>63</b>
6.1	SUGESTÕES DE TRABALHOS.....	64
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>65</b>
	<b>APÊNDICE.....</b>	<b>69</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Um sistema de transporte eficiente e de qualidade, integrando os diferentes modais, fomenta o setor produtivo e promove benefícios para toda a sociedade. No Brasil, o modal rodoviário é o que possui a maior participação na matriz de transporte, concentrando, aproximadamente, 61% da movimentação de mercadorias e 95% da de passageiros. Esses dados ressaltam a importância da infraestrutura rodoviária para o desenvolvimento econômico do país e para a garantia de direitos fundamentais dos seus cidadãos (CNT, 2019).

Os danos nas estruturas de pavimentos ocorrem principalmente devido à aplicação de cargas elevadas ou devido ao grande número de repetições de passagem das rodas dos veículos. As estruturas de muitos pavimentos asfálticos existentes não foram dimensionadas para tais solicitações, uma vez que o método de dimensionamento tradicional e empírico não contempla efeitos de fadiga, pois foi desenvolvido a partir de observações de danos de deformação no subleito. O efeito da carga repetida só foi introduzido *a posteriori*, por meio do carregamento de um eixo padrão (FRANCO, 2007).

Desde a década de 1970, a maioria dos métodos de dimensionamento de pavimentos flexíveis assume que o trincamento por fadiga na fibra inferior da camada de concreto asfáltico é o mecanismo de degradação mais crítico. Entretanto, recentemente tem-se observado defeitos prematuros em pavimentos flexíveis, que se originam na superfície dos pavimentos, especialmente quando os pavimentos apresentam camadas asfálticas espessas. Essas degradações incluem trincamentos iniciados na superfície e afundamentos nas trilhas de rodas, resultantes de deformações plásticas na camada superior de concreto asfáltico (NUÑEZ et. al., 2011).

Face à tendência atual de construírem-se pavimentos com camadas asfálticas espessas, além de analisar a deformação horizontal na fibra inferior da camada asfáltica, se tornará imperativo considerar tensões e deformações na proximidade da superfície do pavimento. Mais ainda, o cálculo dessas tensões e deformações e a análise dos mecanismos de degradação do concreto asfáltico sob estado multiaxial de tensões deverão levar em conta a interação real pneu-pavimento e a natureza viscoelástica do concreto asfáltico (NUÑEZ et al., 2011).

## 1.1 OBJETIVO GERAL

O presente trabalho tem como objetivo analisar os fatores que influenciam na ocorrência do trincamento de cima para baixo (*Top-down Cracking*) em pavimentos asfálticos.

## 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Analisar o trincamento surgido na superfície do revestimento, a partir das tensões, deformações e deslocamentos em diferentes combinações de:

- Espessuras do revestimento;
- Carregamentos de eixo;
- Pneus duplos e pneu simples extralargo.

## 1.3 JUSTIFICATIVA

Este trabalho se justifica pela necessidade de conhecer e aprofundar o entendimento dos fatores que causam danos ao pavimento, através das trincas que surgem de cima para baixo, um efeito que ainda carece de estudos de referência na literatura.

Sabe-se que o efeito de trincamento de cima para baixo é considerado de rara ocorrência nos pavimentos brasileiros, possivelmente devido à baixa variação de temperatura na superfície e às espessuras delgadas de revestimento que são obtidas a partir pelo Método DNER que, de maneira geral, utiliza somente o CBR para dimensionamento das camadas.

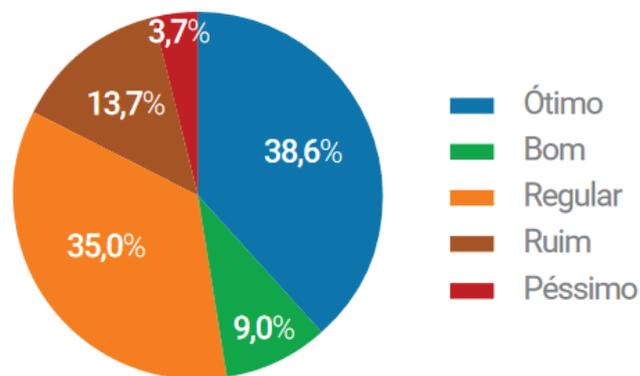
Entretanto a iminente implantação de uma nova forma de dimensionamento, possivelmente irá resultar em camadas de revestimento mais espessas, ao considerar características locais do subleito e principalmente ao proteger o revestimento de trincas por fadiga, podendo causar que trincamentos de cima para baixo ocorram com maior frequência em nossos pavimentos.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 CONDIÇÃO DA MALHA RODOVIÁRIA

Na edição de 2019 da Pesquisa CNT de Rodovias, foram pesquisados 108.863 quilômetros de rodovias pavimentadas. Essa extensão contempla a totalidade das rodovias federais e trechos estaduais considerados estratégicos para a movimentação de cargas e passageiros pelo território brasileiro.

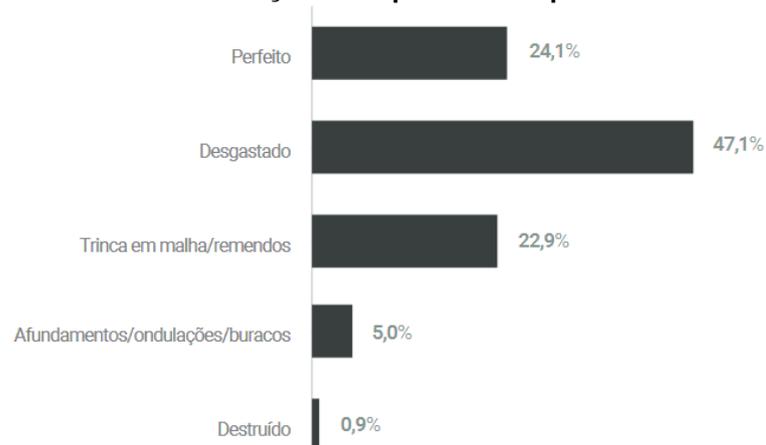
**Gráfico 1: Condição dos pavimentos quanto a qualidade.**



**Fonte: Pesquisa CNT de Rodovias (2019).**

A qualidade das rodovias brasileiras piorou no último ano. É o que mostra a 23ª edição da Pesquisa CNT de Rodovias. O estudo constata piora nas condições das características observadas. O estado geral apresenta problemas em 59% da extensão dos trechos avaliados. Em 2018, o percentual foi 57%. Também está pior a situação do pavimento (52,4% com problema). No ano passado, a avaliação foi 50,9% (CNT, 2019).

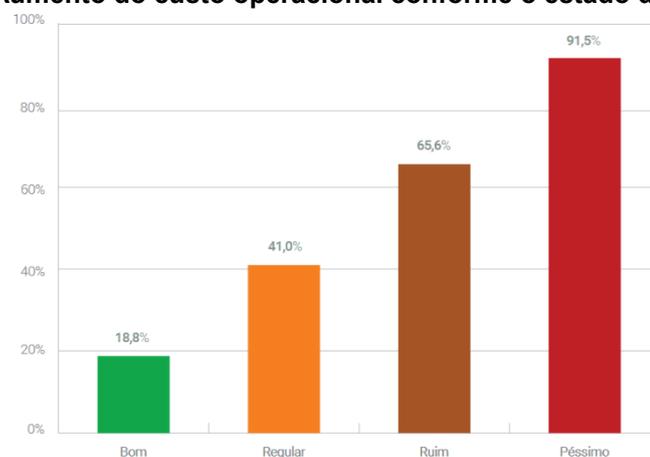
Verifica-se que apenas 213.453 quilômetros de rodovias são pavimentados, o que corresponde a 12,4% da extensão total. Ou seja, a pesquisa realizada pela Confederação contempla mais da metade da malha pavimentada do país. Isso mostra a importância e a representatividade que essa avaliação tem para o transportador e para a sociedade de maneira geral (CNT, 2019).

**Gráfico 2: Condição da superfície dos pavimentos.**

**Fonte: Pesquisa CNT de Rodovias (2019).**

Segundo a Pesquisa, as condições das rodovias impactam diretamente nos custos do transporte. Neste ano, estima-se que, na média nacional, as inadequações do pavimento resultaram em uma elevação do custo operacional do transporte em torno de 28,5%, sendo que o maior índice foi registrado na região Norte (+ de 38,5%). Transporte mais caro significa produtos mais caros e menor (CNT, 2019).

Tanto Balbo (2007) como Bernucci et al. (2022) comentam que os setores produtivos dependem do bom estado das estradas, pois estas compõem o principal meio de escoamento da produção. Entretanto há um sentimento de descontentamento geral da cadeia produtiva nacional com o investimento abaixo do necessário na infraestrutura rodoviária, demonstrados pelos levantamentos mais recentes do estado da malha viária federal, feitos pela Conferência Nacional do Transporte periodicamente.

**Gráfico 3: Aumento do custo operacional conforme o estado do pavimento.**

**Fonte: Pesquisa CNT de Rodovias (2019).**

Portanto, sugere-se que a competitividade da economia brasileira é prejudicada pela falta de investimento em infraestrutura, uma vez que isso acarreta um número crescente de acidentes, desperdício de carga e gasto elevado com manutenção e combustíveis (BERNUCCI et al., 2022).

## 2.2 PAVIMENTO

De acordo com Bernucci et al. (2022), pode-se definir o pavimento como uma estrutura formada por camadas de espessuras finitas, executada sobre uma superfície regularizada em terraplenagem, planejada técnica e economicamente com a função primária de resistir a esforços originados pelo tráfego de veículos e clima, além de fornecer conforto, economia e segurança aos usuários das rodovias.

Para o DNIT (2006), o pavimento rodoviário é uma superestrutura constituída pelo sistema de camadas assentadas sobre um semiespaço, considerado infinito, que serve como fundação ou infraestrutura, chamado subleito, o qual é limitado superiormente pelo pavimento.

Ao criar uma superfície regularizada, aderente e menos ruidosa, os usuários da via terão, conseqüentemente, uma considerável redução de custos operacionais, já que a necessidade de manutenção dos veículos está diretamente relacionada a condição da superfície de rolamento (BALBO, 2007).

Tradicionalmente, os pavimentos rodoviários são classificados pela engenharia de acordo com a rigidez do conjunto e composição do revestimento quanto aos materiais empregados. Assim, de acordo com a nomenclatura mais utilizada, o pavimento asfáltico pode ser chamado de flexível e o pavimento revestido por concreto-cimento pode ser denominado como rígido (BERNUCCI et al., 2008).

O pavimento rígido é revestido por placas de concreto, podendo ou não serem armadas por barras de aço. A espessura do revestimento é fixada pela resistência a flexão das placas e a espessura das demais camadas pelas suas respectivas resistências (BERNUCCI et al., 2008).

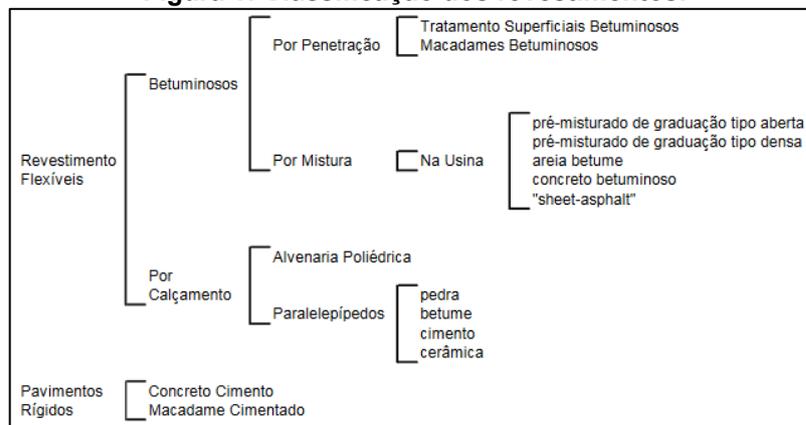
Conforme Bernucci et al. (2008), os pavimentos asfálticos são aqueles em que o revestimento é composto por uma mistura constituída basicamente de agregados e ligantes asfálticos. É formado por quatro camadas principais: revestimento asfáltico, base, sub-base e reforço do subleito.

O revestimento asfáltico pode ser composto por uma camada de rolamento – em contato direto com as rodas dos veículos e por camadas intermediárias ou de ligação, por vezes denominadas de binder, embora essa designação possa levar a uma certa confusão, uma vez que esse termo é utilizado na língua inglesa para designar o ligante asfáltico.

Já de acordo com o Manual de Pavimentação do DNIT (2006), os pavimentos classificam-se geralmente em: Flexíveis, semirrígidos e rígidos. Desta forma, o pavimento flexível é definido pela deformação elástica de todas as camadas, com a carga se distribuindo em parcelas equivalentes entre elas. Conseqüentemente, o pavimento rígido se caracteriza pela absorção da maioria das tensões pela camada de revestimento, por esta ter elevada rigidez em relação as outras camadas.

Pela classificação elaborada no Manual de Pavimentação do DNIT (2006), nota-se a inserção do termo “pavimento semirrígido”, sendo esta uma tipologia intermediária, caracterizada pela existência de base cimentada por aglutinante, sendo exemplificado por um pavimento formado por uma camada de solo cimento e camada asfáltica de revestimento.

**Figura 1: Classificação dos revestimentos.**



Fonte: DNIT, 2006.

Balbo (2007) aborda de forma crítica a questão da classificação intermediária, objetivamente pelo chamado pavimento semirrígido. Destaca-se que muitos autores na literatura internacional não admitem tal tipologia, sustentados pelo

argumento da impossibilidade que um pavimento tenha ambas características que, teoricamente, seriam mutuamente excludentes em sua definição.

Entretanto, Balbo (2007) cita experimentações realizadas em bases e sub-bases de solo cimentado, além de exemplos de estruturas que, pelo seu comportamento, tornam apropriado o emprego do termo semirrígido ou híbrido. Entre as razões citadas, destaca-se a redução da espessura necessária para transmitir as tensões ao subleito – ao comparar a base formada por brita graduada tratada com cimento (BGTC) e por brita graduada simples (BGS) – e os ganhos de resistência a tração e compressão, sem conceder características como fragilidade e tenacidade, que caracterizariam um material rígido.

### 2.3 MATERIAIS CONSTITUINTES

Quanto aos materiais de revestimentos asfálticos que podem estar presentes nos pavimentos flexíveis ou nos semirrígidos, estes identificam-se pelo seu modo de fabricação, podendo ser usinados ou preparados em pista (tratamento superficial). Além disso também pode-se classificar quanto ao tipo de ligante, sendo a quente (Cimento Asfáltico de Petróleo - CAP) ou a frio (Emulsões Asfálticas de Petróleo - EAP). As misturas usinadas podem ser ainda separadas pela distribuição granulométrica dos agregados (BERNUCCI et al., 2022).

Segundo Bernucci et al. (2008), no Brasil a camada de revestimento dos pavimentos é formada, usualmente, por uma mistura entre agregados minerais graduados e ligantes asfálticos. Os requisitos como impermeabilidade, flexibilidade e resistência são atendidos pela adequação do projeto da estrutura e dosagem, passando pela escolha do material adequado, composição das camadas e suas espessuras.

Conforme Balbo (2007), pode-se considerar que o concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ) é a mistura asfáltica mais tradicional no País, devido aos materiais empregados na fabricação e pelo processo de execução. O CBUQ é obtido através da mistura de agregados minerais bem graduados, de material fino de enchimento (pó de brita, calcário ou cimento Portland) e de cimento asfáltico de petróleo (CAP).

Através da evolução dos conceitos de concreto asfáltico, surgem misturas asfálticas drenantes ou porosas, conhecidas como camada porosa de atrito (CPA). Estas misturas foram obtidas na tentativa de se conceber uma superfície capaz de drenar rapidamente as águas pluviais para fora do revestimento, causando aumento da segurança por evitar formação de poças. Em contrapartida, observou-se a redução dos ruídos gerados pelos veículos.

Basicamente, a mistura do tipo CPA é obtida pela utilização de agregados com distribuição granulométrica aberta, ou seja, mal graduada, com porcentagem maior de vazios e diminuição de espessura da camada. A mistura asfáltica de graduação aberta pode causar um processo de deterioração acelerado, pela permissibilidade maior de percolação e falta de coesão pela baixa quantidade de ligações, que pode ser controlada pela adição de CAP modificado com polímero (BALBO, 2007).

Dependendo do tráfego e dos materiais disponíveis, pode-se ter ausência de algumas camadas. As camadas da estrutura repousam sobre o subleito, ou seja, a plataforma da estrada terminada após a conclusão dos cortes e aterros, como pode ser visualizado em Bernucci et al. (Figura 1.1, p. 12, 2022).

O funcionamento adequado de uma estrutura de pavimento é dependente de que todas as peças que o compõem sofram deformações compatíveis com sua natureza e capacidade portante, ou seja, que não ocorram processos de ruptura ou danos prematuros aos materiais que constituem as camadas do pavimento (BALBO, 2007).

Conforme Medina (1997), nos pavimentos asfálticos, as camadas de base, sub-base e reforço do subleito são de grande importância estrutural. Limitar as tensões e deformações na estrutura do pavimento, por meio da combinação de materiais e espessuras das camadas constituintes, é o objetivo da mecânica dos pavimentos.

Para o DNIT (2006), a complexidade do cálculo de tensões e deformações resultantes das cargas de tráfego é imposta pela variedade de materiais colocados em contato, formando uma estrutura de camadas, com diferentes módulos de resistência e deformabilidades.

## 2.4 CONDIÇÃO FUNCIONAL

Conforme Balbo (2007), os materiais de construção em geral, no decorrer da vida útil, apresentam danificação e degradação inevitáveis, onde são alteradas suas propriedades mecânicas, as quais determinam o comportamento do material sob ação das cargas, sejam quais forem suas naturezas. Traduzindo este fato para o meio da pavimentação, a degradação de uma estrutura será causada por diversos fatores, dentre eles as cargas de tráfego, variações de temperatura, umidade e reações químicas.

Um projeto de pavimento é concebido e executado de acordo com um planejamento de duração, por determinado período ou ciclo de vida. No início de um ciclo, este pavimento terá condição ótima, até alcançar uma condição ruim, no fim do ciclo. Essa redução da condição ao longo do ciclo de vida é entendida como a deterioração deste pavimento (DNIT, 2006).

Para Bernucci et al. (2022), o desafio no projeto de um pavimento é conceber uma obra que cumpra suas demandas estruturais e funcionais, da forma mais econômica possível. Do ponto de vista do usuário, o estado da superfície será o mais importante, por serem perceptíveis quando prejudicam o pioram as condições de segurança e geram custos operacionais com manutenção dos veículos.

Conforme Balbo (2007), o conceito de serventia, introduzido pela Associação Americana de Rodovias do Estado e Funcionários de Transporte – AASHTO (1993) como um parâmetro que trata do desempenho ao longo do tempo, indica que a classificação dos mecanismos de ruptura entre estruturais e funcionais deve ser evitada, pois um defeito estrutural terá consequências funcionais, inevitavelmente e vice-versa.

### 2.4.1 IRREGULARIDADE LONGITUDINAL

A irregularidade longitudinal é uma grandeza utilizada para medição da condição funcional, definida como o desvio da superfície da rodovia em relação a um plano de referência, afetando a dinâmica do veículo, qualidade de rolamento, efeito das cargas dinâmicas sobre a via e a drenagem superficial. Por ser uma grandeza correlacionada com o custo operacional, conforto, segurança e velocidade, é uma

característica diretamente ligada ao desempenho funcional (Manual de restauração do DNIT, 2006).

Quando se fala em irregularidade longitudinal de um pavimento, esta pode ser tratada como uma quantificação utilizada diretamente para a avaliação funcional da rodovia, sendo muito útil para que sejam analisados processos de manutenção e reabilitação desta estrutura.

Atualmente, existem diversas formas de mensurar a irregularidade longitudinal através de equipamentos utilizados pelos órgãos de transportes para este fim, com metodologia respectiva e resultados expressos em diferentes escalas de medida, correlacionadas a cada equipamento ou procedimento de avaliação específico.

O IRI (Índice de Irregularidade Longitudinal) é utilizado internacionalmente como um padrão para quantificação da irregularidade no pavimento. Utiliza-se da definição de irregularidade longitudinal (desvio da superfície ao longo de um perfil imaginário contínuo) e pode ser expresso em m/km, descrevendo quanto um passageiro iria sentir de movimento vertical, se dirigisse a uma determinada velocidade ao longo da via em questão (MDOT, 2017).

Dentre os índices mais conhecidos, pode-se citar também o Q.I. (Quociente de Irregularidade), com valores obtidos através de um equipamento chamado integrador IPR, concebido na década de 1980 pelo Instituto de Pesquisas Rodoviárias junto a Universidade de São Paulo (USP) e devidamente normatizado pelo DNIT quanto a sua utilização, calibração e manutenção.

## 2.5 PRINCIPAIS DEFEITOS DE SUPERFÍCIE

As patologias funcionais são associadas diretamente às irregularidades presentes na superfície. No entanto, tais irregularidades, sejam transversais ou longitudinais, também podem ser interpretadas como resultado de processos degradantes com natureza estrutural (deformações plásticas), ocorridos em qualquer camada do pavimento, incluindo o subleito (BALBO, 2007).

Conhecer e entender os mecanismos de deterioração de um pavimento é essencial para identificar as causas que o levam a sua condição atual, além de

proporcionar a escolha de técnicas de restauração mais adequadas. Estes mecanismos se apresentam na ocorrência de defeitos, surgidos na superfície, onde cada tipo de patologia pode ser associado a um modo de ruptura.

Quanto aos defeitos de superfície, podem ser definidos como danos ou deteriorações na superfície dos pavimentos asfálticos, identificadas a olho nu e classificadas de acordo com suas características, segundo uma terminologia definida por norma, como a DNIT 005/2003-TER. Ainda, o conjunto de defeitos num trecho pode ser resumido por índices que auxiliam a gerencia de pavimentos (BERNUCCI et al., 2022).

### 2.5.1 TRINCAS

Conforme a norma DNIT 005/2003-TER, que trata dos defeitos nos pavimentos flexíveis e semirrígidos, uma fenda é qualquer descontinuidade na superfície do pavimento, que conduz a aberturas de menor ou maior porte.

Fissura é uma fenda de largura capilar, seja qual for a posição quanto ao eixo da via, somente perceptível a olho nu, em distância reduzida. Trinca é uma fenda existente no revestimento, facilmente visível, com abertura superior a uma fissura, podendo ser isolada ou interligada, transversal, longitudinal ou de retração. (DNIT, 2003).

A trinca é um defeito que, ao surgir na superfície, irá enfraquecer o revestimento e permitir a entrada de água, causando danos adicionais a estrutura. Após o início do trincamento, há tendência de aumento da extensão e severidade, eventualmente causando a desintegração do revestimento (DNIT, 2006).

Por ser um defeito que pode ser subdividido em várias classificações, quanto ao comprimento, profundidade, sentido, geometria e origem, o estudo das trincas possui uma gama imensa de diferentes abordagens, já que cada tipo de trincamento deve ser associado a um mecanismo de deterioração específico, podendo ser estes a ruptura por esforços excessivos ou danificação por fadiga.

### 2.5.2 AFUNDAMENTOS

Os afundamentos também são considerados como um defeito importante na pavimentação, causado pela deformação permanente (plástica) do revestimento ou de qualquer camada subjacente. Assim como as trincas, podem ser subdivididos, destacando-se o afundamento longitudinal nas trilhas de roda (BERNUCCI et al., 2022).

Trata-se de uma condição de ruptura que está associada ao desempenho funcional, pois há considerável perda da qualidade de rolamento, principalmente quando há baixa resistência em camadas inferiores ou fluxo de veículos comerciais em faixas de rolamento estreitas, onde se empregam materiais dúcteis no revestimento (BALBO, 2007).

### 2.5.3 CORRUGAÇÕES E ONDULAÇÕES

Corrugação é uma deformação transversal ao eixo, com depressões intercaladas com elevações compensatórias e comprimento de onda, entre duas cristas, de alguns centímetros. As ondulações se diferem de corrugações pelo comprimento de onda na ordem de metros (BERNUCCI et al., 2022).

### 2.5.4 EXSUDAÇÃO E DESGASTE

Exsudação é definida como o surgimento de ligante em abundância na superfície do pavimento, causado pelo excesso do mesmo na mistura asfáltica. A desagregação ou desgaste pode ser o efeito de arrancamento do agregado, caracterizado pela aspereza superficial do pavimento e causado por esforços tangenciais na via (DNIT, 2003).

### 2.5.5 “PANELAS”

Panelas ou buracos são cavidades no revestimento, podendo atingir camadas inferiores, formadas por diversas causas possíveis. Remendos são

panelas preenchidas por camada de massa asfáltica. Apesar de estar relacionado a um processo de conservação, é também considerado um tipo de defeito.

#### 2.5.6 DEMAIS DEFEITOS

Além dos defeitos citados em norma e codificados por suas respectivas siglas, segundo Balbo (2007) pode-se citar os efeitos de reflexão de trincas, bombeamento de finos, oxidação dos asfaltos no revestimento e defeitos causados por variações climáticas (fissuras transversais por retração térmica).

### 2.6 TRINCAS POR FADIGA

As cargas aplicadas pelas rodas provenientes do tráfego de veículos, ao se repetirem, irão solicitar a camada de concreto asfáltico do revestimento à flexão, levando à fadiga dos materiais pelo efeito acumulativo de carregamentos. As chamadas trincas por fadiga do revestimento irão iniciar, geralmente, na sua parte inferior, propagando-se acima até atingir a superfície da estrutura (MEDINA e MOTTA, 2005).

O fenômeno da fadiga relaciona-se ao fato de que muitos materiais, sendo sucessivamente solicitados em níveis de tensão inferiores aqueles de ruptura, pouco a pouco desenvolvam alterações em sua estrutura interna, que resultam na perda de características estruturais originais. Isso gera um processo de micro fissuração progressiva que culmina no desenvolvimento de fraturas e, conseqüentemente, no rompimento do material (BALBO, 2007).

Pode-se dizer que o trincamento por fadiga em materiais de pavimentação é causado diretamente pelas solicitações do tráfego, mas nesse caso, apenas uma única aplicação de determinada carga não causa deformação suficiente para levar o pavimento à ruptura, ou seja, o que levará à ruptura são sucessivas aplicações de carga e o acúmulo de tensões e deformações causadas por ela (MATOS, 2011).

Em relação à chamada vida de fadiga do material constituinte de um pavimento, considera-se o ciclo realizado pelo carregamento, diferentemente de uma carga pontual e monotônica. As cargas cíclicas irão produzir falhas para valores

de tensão mais baixos, em via de regra, do que na ruptura obtida em ensaios de carregamento estático, pois a mesma carga será aplicada várias vezes, e o dano no primeiro ciclo será diferente do dano seguinte (BERNUCCI et al., 2022).

O principal desafio de esclarecimento nos modelos de previsão da fadiga, o fato dos ensaios laboratoriais não reproduzirem, em sua maioria, as condições reais de pista em que os materiais serão submetidos, citando-se a forma de aplicação das cargas, variação de temperatura, heterogeneidade e alteração dos parâmetros no tempo (BALBO, 2007).

Há diversas pesquisas direcionadas à tentativa de estabelecer relações que possam prever a falha da mistura pela sucessão de solicitações, que define as trincas por fadiga. Tais relações variam em torno de um modelo, do tipo (DNIT, 2006):

$$N = k \cdot (\varepsilon_t)^{-n}$$

Onde:

$N$  = número de repetições devido ao carregamento, até o início das trincas.

$\varepsilon$  = deformação específica de tração na mistura, sob ação das cargas.

$k, n$  = constantes dependentes da rigidez e do teor de asfalto na mistura e determinados por ensaios laboratoriais.

Conforme pode ser observado nos ensaios laboratoriais de vida de serviço, o processo de surgimento das fissuras causadas pela fadiga dos materiais no revestimento ocorre em fases distintas, divididas por convenção em três regiões: formação das microfissuras, propagação caracterizada na origem das microfissuras e crescimento que irá conduzir ao colapso ou ruptura (BERNUCCI et al., 2022).

Em relação as causas do processo de fadiga, pode-se citar três principais, sendo elas (BALBO, 2007):

- Presença de vazios ou fissuras iniciais, tratando-se de uma característica intrínseca no material de misturas asfálticas abertas. Enquanto em misturas densas, podendo estar presente pela redução da viscosidade relacionada a perda de temperatura (queima do material em mistura quente, por exemplo).
- Excesso de deformação plástica, podendo ser em longo prazo, pela presença de ligantes dúcteis na composição ou fragilidade da mistura,

tornando-a suscetível a fissuras proporcionalmente a sua presença de vazios e fragilidade.

- Presença de áreas de concentração das tensões na superfície do revestimento (ranhuras), sendo estas regiões que podem provocar as primeiras fissuras e que tendem a progredir a estágios críticos.

Conforme a abordagem mecânica de dimensionamento dos pavimentos utilizada no Brasil, o principal fator de surgimento das trincas por fadiga é considerado sendo a diferença entre a tensão máxima de compressão e tração na fibra inferior da camada de revestimento.

### 2.6.1 MÓDULO DE RESILIÊNCIA

Balbo (2007) afirma que para se compreender a formação dos gradientes de tensões e consequências sobre a deformação, devido a interação entre carga e estrutura, é preciso abordá-la considerando os conceitos de estrutura em camadas superpostas, as quais possuem espessuras e propriedades reológicas (medidas de deformação e viscosidade) respectivos.

Dentro do conceito de análise estrutural em sistemas formados por camadas, o módulo de elasticidade e o módulo de resiliência dos materiais tratam-se dos parâmetros mais empregados habitualmente, assim como seus coeficientes de Poisson correspondentes, para consideração dos efeitos da Lei de Hooke.

Segundo Medina e Motta (2005), o termo resiliência é utilizado para denominar a energia potencial de deformação, equivalente a energia que é armazenada num corpo deformado elasticamente e devolvida quando as tensões causadoras das deformações terminam. Já a capacidade das misturas betuminosas de resistir a deformação pode ser chamada de rigidez.

A partir da introdução de estudos da resiliência dos materiais aplicados na pavimentação possibilitou a análise e previsão dos estados de tensão e deformação das estruturas de pavimentos, expressando as propriedades dinâmicas em termos do módulo de resiliência (MR), o qual pode ser determinado pela expressão a seguir (DNIT, 2006):

$$M_R = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_r}$$

Onde:

$M_R$  = Módulo resiliente do material.

$\sigma_d$  = tensão aplicada repetidamente.

$\varepsilon_r$  = deformação específica axial.

Recomenda-se a substituição dos valores usuais de resistência dos materiais pelo módulo de resiliência ( $M_R$ ), pois trata-se de uma grandeza genérica do material, podendo ser utilizada na análise de múltiplas camadas de estruturas, sendo um método aceito internacionalmente para caracterização e projeto de pavimentos, bem como para avaliação de desempenho. Outro fator determinante é a existência de testes em campo rápidos e não-destrutivos para estimar o módulo de resiliência (BERNUCCI et al., 2022).

Alguns detalhes importantes citados por Balbo (2007), que devem ser observados na determinação das propriedades, são de que um material raramente terá módulo de elasticidade constante, sendo comum a apresentação de comportamento elástico não-linear. Ainda, a necessidade de estabilização da deformação plástica inicial, realizada através da aplicação repetida de carga.

Especialmente em misturas asfálticas, a viscoelasticidade dos asfaltos apresenta deformação dependente do tempo de ação da carga. Ou seja, a deformação medida será menor quanto maior velocidade de aplicação, e, conseqüentemente, terá maior módulo de resiliência aferido.

Conforme Balbo (2007), define-se elasticidade como a propriedade do material em assumir sua forma original após a ação das forças que o deformam for interrompida. Enquanto a plasticidade pode ser entendida como a característica inversa, sendo a capacidade do material preservar as deformações residuais, após ter cessado o estado de esforços submetido, introduzindo o conceito de deformações plásticas ou permanentes.

Após definir estas propriedades características aos materiais mais usados na pavimentação, tornam-se imprescindível ao projeto, que se considere a variação dos parâmetros de resistência e módulo de resiliência ao longo do tempo de uso, pois as propriedades iniciais destes materiais seguramente não serão as mesmas, ao longo do tempo de serviço dos pavimentos (BALBO, 2007).

## 2.7 TRINCAS DE CIMA PARA BAIXO

### 2.7.1 DEFINIÇÃO

Tradicionalmente, a trinca do pavimento tem sua origem na parte inferior da camada do pavimento, onde as tensões e flexões são mais significativas, e em seguida é refletida até a superfície. Entretanto, a partir do final da década de 1990, uma modalidade diferente de trincamento passou a ter mais atenção dos estudos, as trincas de cima para baixo, que tem seu início na superfície do pavimento, propagando-se até o inferior da camada do mesmo (MATOS, 2011).

Os trincamentos de cima para baixo (top-down cracking, TDC), que geralmente ocorrem na direção longitudinal, tangenciando as trilhas de roda, ou no seu interior, têm-se tornado mais comuns em pavimentos asfálticos. Este tipo de defeito também é considerado como sendo uma ruptura por cisalhamento (NUÑEZ et al., 2011).

Canestrari et al. (2020) cita que esse novo tipo de defeito, não considerado na abordagem mais tradicional de projeto de pavimentos, foi observado mais frequentemente nas últimas décadas, como sugere a literatura sobre o tema ao redor do planeta, com publicações de diversos países, incluindo nos Estados Unidos (Baladi et al., 2003; Harmelink et al., 2003; Myers et al., 2002), no Japão (Matsuno et al., 1992), Países Baixos (Gerritsen et al., 1987) e França (Dauzats e Rampal, 1987), entre outros.

Top-down cracking são fissuras longitudinais e/ou transversais que iniciam na superfície dos pavimentos asfálticos e se propagam para baixo. O trincamento geralmente se manifesta no sentido longitudinal da pista e ligeiramente fora da trilha de rodas. Ao longo do tempo, formam-se extensas conexões das trincas longitudinais, ligadas por fissuras transversais menores, o que no fim das contas reduz a vida útil do pavimento (BALADI et al., 2003).

Esse tipo de trincamento começou a surgir a partir do dimensionamento de camadas asfálticas mais espessas, que se tornavam uma solução para o trincamento por fadiga tradicional dimensionado pelos métodos mecanísticos-empíricos. Assim se aumentando a espessura da camada asfáltica, o trincamento na

parte inferior da camada seria menor, porém, haveria incidência de uma nova trinca na superfície do pavimento (KERN, 2015).

Ainda de acordo com Baladi et al. (2003), pode-se classificar as trincas de cima para baixo (TDC) em três categorias observadas em campo. Trincas longitudinais, trincas transversais e trincas por segregação de partículas. Observou-se nesta divisão, que cada agrupamento tinha causas distintas para a origem do TDC.

De acordo com Uhlmeier et al. (2000), o Departamento de Transportes do Estado de Washington (WSDOT) observou o surgimento de trincas por fadiga e longitudinais em seus pavimentos de concreto asfáltico mais espessos, que pareciam iniciar no topo da camada de revestimento para baixo. Frequentemente, as trincas param na interface entre a camada de rolamento e a camada de ligação (profundidade de 50 mm).

Conforme relatado por Gerritsen et al. (apud Uhlmeier et al., 2000, p. 110), alguns pavimentos nos Países Baixos estavam sofrendo trincamentos prematuros nas camadas de revestimento. Além disso, os trincamentos não chegavam às camadas de base betuminosa adentro. Essas trincas ocorriam dentro e fora da trilha de rodas e, em alguns casos, logo após a pavimentação. Gerritsen et al. (1987) concluiu que havia mais que um fator causador do efeito.

Dauzats e Rampal (1987) apud Uhlmeier et al. (2000) publicaram resultados que descreviam trincas iniciadas na superfície em pavimentos na França. De acordo com o estudo, foi notado que as fissuras poderiam ser tanto no sentido longitudinal quanto transversalmente, e ocorreram habitualmente com 3 a 5 anos de idade de construção dos pavimentos.

Para Freitas et al. (2003), o top-down cracking (TDC) é definido como um mecanismo de deterioração que tem sido identificado em países de clima temperado. Suas causas não são suficientemente conhecidas e definidas, pois os estudos realizados não convergem. São apontados como as principais causas da origem e propagação das trincas: condições climáticas, tráfego, desgaste temporal, qualidade estrutural e qualidade da construção.

Harmelink e Aschenbrener (2003) realizaram uma pesquisa no Estado do Colorado, em rodovias que haviam sido reconstruídas em 1997 e, após 1 ano de uso, começaram a surgir trincas longitudinais na superfície. Os trincamentos apareceram nas faixas externas das pistas, com baixa a média severidade, porém a

ocorrência prematura motivou a realização de uma série de investigações sobre suas causas e efeitos.

Conforme o levantamento feito no estudo de Harmelink e Aschenbrener (2003) com objetivo de determinar a dimensão do trincamento de cima para baixo no Estado do Colorado, primeiramente concluiu-se que a observação visual não pode determinar se os defeitos são trincas por reflexão ou do tipo top-down. Notou-se também que as trincas de cima para baixo pareciam ser retas e paralelas com a rodovia, além de ter baixa severidade se comparadas com as trincas por reflexão conhecidas. Entretanto, como as observações visuais não eram sempre conclusivas, as trincas devem ser testemunhadas para que se determine suas causas exatas.

Ainda de acordo com Harmelink e Aschenbrener (2003), foi possível identificar uma correlação entre o local das trincas longitudinais em alguns trechos e a bordas externas das esteiras que transferem a mistura asfáltica da pavimentadora ao solo. Tal descoberta mostrou-se coerente com um estudo realizado em 1993 pelo Departamento de Transportes de Illinois.

Trincamentos de cima para baixo (top-down cracking, TDC) começaram a ser mais perceptíveis por duas razões. Primeiro, o aumento de tráfego de caminhões aumentou os níveis do fator de equivalência de carga (equivalent single axload, ESAL) até um ponto em que os novos pavimentos são projetados com concreto asfáltico com espessura maior que 160 mm. Os pavimentos do Departamento de Transportes do Estado de Washington (WSDOT) tiveram espessura aumentada pelo recobrimento da camada de concreto asfáltico recorrente, chegando ou superando 160 mm de espessura (UHLMEYER et al., 2000).

Conforme Uhlmeier et al. (2000), concluiu-se que as trincas ocorrem dentro ou próximo a trilha de rodas, em camadas de pavimento tipicamente mais espessas, geralmente ocorrendo em 3 a 8 anos de idade, enquanto trincas que atravessaram a camada inteira do pavimento surgiram com 3 anos em média. Vale ressaltar que, de acordo com os autores, as trincas que atravessavam o pavimento não poderiam ser determinadas quanto a sua origem, podendo ser do tipo *top-down* ou *bottom-up*, uma vez que a largura das trincas seguia uniformemente ao atravessar o testemunho de pavimento.

De acordo com o relatório elaborado pela S&T (2012) para a Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT) sobre o desempenho de pavimentos flexíveis na região sul do Brasil, o trincamento de cima para baixo (TDC) não

representa (inicialmente) um comprometimento estrutural. Porém ao propiciar a penetração de água nas primeiras camadas, com a passagem de altas cargas pode gerar excesso de poro-pressão, e posteriormente, o bombeamento de finos e desintegração progressiva da camada superior.

Ainda conforme S&T (2012), observou-se que o TDC pode se manifestar tampouco seja feita a abertura do pavimento ao tráfego, caso os veículos operem em sobrecarga. Tal fenômeno foi observado em pavimentos construídos recentemente na região sul do Brasil, o que evidencia que as tensões de cisalhamento geradas pelos veículos comerciais excedem a resistência ao cisalhamento da mistura asfáltica.

Segundo Roque et al. (NCHRP, 2010), o top-down cracking não pode ser explicado pelos mecanismos tradicionais de fadiga, utilizados para entender trincas iniciadas na base do revestimento. Por anos, diversas pesquisas tentaram encontrar os fatores chave e mecanismos fundamentais que podem levar ao surgimento e propagação de trincas de cima para baixo.

### 2.7.2 PROVÁVEIS CAUSAS DE TDC

Roque (NCHRP, 2010) diz que ao menos dois principais mecanismos que podem levar ao top-down cracking devem ser considerados para prever o seu surgimento. Um deles estaria relacionado as tensões na superfície fora da trilha de rodas, induzida por esforços de flexão, o que pode estar ligado ao surgimento de trincas em camadas de asfalto com baixa/média espessura. E outro mecanismo seria associado as tensões de cisalhamento no contato entre a superfície e a borda do pneu, que pode explicar trincas em asfaltos mais espessos. Ainda, o surgimento de TDC pode ser influenciado por tensões causadas por gradientes térmicos (ROQUE et al., NCHRP, 2010).

Conforme S&T (2012), o trincamento de cima para baixo não tem as causas plenamente estabelecidas, podendo-se citar: elevadas tensões cisalhantes causadas por excesso de carga ou pressão de inflação dos pneus, redução de viscosidade da mistura asfáltica causada por temperaturas elevadas e segregação da camada de revestimento.

Entre as observações do relatório da S&T (2012) na Região Sul do Brasil, destaca-se que as misturas asfálticas com teor de ligante na ordem de 11% mostraram-se mais suscetíveis ao TDC do que as misturas com teor de ligante na ordem de 13%. Além disso, os pavimentos com camadas asfálticas mais espessas (BR-101/RS, 150 mm a 170 mm) tiveram predominância de trincamentos de cima para baixo, enquanto pavimentos (BR-290/RS) com espessura total da camada asfáltica de 80 mm (em média) tiveram predominância de trincas por fadiga tradicionais.

Ao analisar pavimentos localizados na região norte de Portugal que sofreram o surgimento de TDC e os possíveis fatores causadores, Freitas et al. (2003) concluiu na fase inicial da análise que a qualidade da construção era um fator principal, enquanto que o tráfego não se mostrou relevante na progressão das trincas. Em segunda fase do estudo, os efeitos de fadiga não pareceram causar o TDC, mas podem contribuir para a propagação das trincas.

Dauzats e Rampal (1987) apud Uhlmeier et al. (2000, p. 110) estimaram em seus resultados, que este tipo de trincas na camada superior, inicialmente eram causadas por tensões de natureza térmica e posteriormente propagadas devido ao carregamento de tráfego. Eles notaram também que o endurecimento prematuro da mistura asfáltica provavelmente contribuiu nesse tipo de tensões.

De acordo com Gerritsen et al. (1987) apud Uhlmeier et al. (2000, p. 110), o trincamento na camada superior, localizado fora da trilha de rodas, tinha baixa força de coesão como característica em baixas temperaturas. Além disso, valores baixos de penetração do betume, que poderiam estar relacionados a alta fadiga térmica, foram notados. Os trincamentos superiores localizados dentro da trilha de rodas, foram amplamente atribuídos a tensões de cisalhamento causadas por pneus de caminhões em regiões próximas a borda da pista.

A conclusão foi de que ambos efeitos térmicos e de carregamento causaram o trincamento de cima para baixo. Gerritsen et al. (1987) recomendou então que a espessura da camada betuminosa fosse reforçada para reduzir o endurecimento precoce das misturas.

Ao analisar os efeitos da qualidade de construção, temperatura e afundamento da superfície no surgimento de TDC, através de resultados de laboratório combinados com um modelo tridimensional de Elementos Finitos viscoelástico não-linear, Freitas et al. (2004) descobriu que as trincas surgiram

precocemente quando expostas a altas temperaturas. Os fatores causadores de maior importância foram o elevado índice de vazios na mistura e graduação dos agregados (agregados mais espessos).

Ainda de acordo com Freitas et al. (2004), indicou-se que o afundamento da superfície parece contribuir significativamente para o surgimento de TDC. Tal conclusão parece convergir com resultados obtidos por outras publicações já citadas.

Wang e Al-Qadi (2010) investigaram os mecanismos de surgimento das trincas próximas a superfície em camadas de asfalto espessas, através do desenvolvimento de um modelo tridimensional em elementos finitos. O modelo buscou simular a área de contato e a tensão de contato entre na interface pneu-pavimento.

Conforme Wang e Al-Qadi (2010), os fatores analisados foram o efeito da tensão de contato pneu-pavimento, o efeito do gradiente de temperatura e o efeito das condições de ligação da interface de camadas. O estudo modelou com precisão os carregamentos dinâmicos e tensões de contato do pneu, considerando estados de tensão multiaxiais (normal e cisalhamento).

Concluiu-se que as trincas se iniciam na área entre pneus nos eixos duplos. Altas temperaturas potencializam o surgimento de trincas, entretanto o gradiente negativo de temperatura na camada asfáltica induz maior potencial de falha na superfície do que assumindo-se uma média constante de temperatura. Além disso, o descolamento entre as camadas de asfalto aumenta significativamente as tensões cisalhantes. Esse fenômeno resulta em falhas prematuras próximo a ligação entre camadas (WANG e AL-QADI, 2010).

Wang et al. (2012) analisaram os efeitos causados na superfície do pavimento pelo afundamento da camada de rolamento, através da modelagem bidimensional, por Elementos Finitos, da interação entre pneu e pavimento. Dos resultados concluiu-se que, comparando com uma superfície uniforme, o afundamento pode contribuir significativamente para o surgimento de trincas de cima para baixo. O potencial para surgimento de trincas aumenta de acordo com a severidade do afundamento da camada superior do pavimento.

Para Nuñez et al. (2011), a tensão cisalhante é um dos fatores que mais afeta o desempenho dos pavimentos asfálticos, uma vez que a ruptura por cisalhamento resulta em afundamento da trilha de rodas e trincas surgidas na

superfície (TDC). Ao se analisar a ruptura da camada asfáltica próximo a superfície, deve-se considerar o estado multiaxial de tensões, pois os pneus de caminhões geram tensões desuniformes nas três direções (vertical, transversal e longitudinal). Além disso, está claro que temperaturas elevadas podem agravar os problemas na superfície, em razão da diminuição da viscosidade do ligante asfáltico e da coesão da mistura.

Sobre a influência da pressão de contato entre pneu e pavimento na tensão cisalhante, Su et al. (2008) avaliaram as tensões cisalhantes produzidas pela distribuição não uniforme de tensões aplicadas aos pavimentos, ao constatar que os métodos tradicionais de análise assumiam, equivocadamente, que a pressão de contato era equivalente a pressão do pneu, além de assumirem que a pressão era constantemente distribuída.

Foram aplicados métodos laboratoriais para aplicação e medição da pressão de contato real. Concluiu-se que tanto a carga, quanto a pressão de enchimento dos pneus, contribuem significativamente para a magnitude da tensão cisalhante, sendo que o excesso de carga se mostrou mais influente (SU et al., 2008).

De acordo com Su et al. (2008), a tensão cisalhante máxima ocorre na borda do pneu, sendo que nesse ponto o pico de tensão torna-se um dos maiores fatores responsáveis pelos defeitos na superfície surgirem (trincas de cima para baixo e afundamento da trilha de rodas). Concluiu-se também que a espessura da camada asfáltica tem pouca influência na tensão de cisalhamento.

A origem e propagação das trincas pode ser analisada rigorosamente através da abordagem mecanístico-empírica. Lue et al. (2018) realizou uma extensiva revisão dos modelos propostos para previsão de TDC, localizando e revisando mais de 120 trabalhos em termos de diferentes técnicas de modelagem, tipos e componentes. Os principais modelos enfatizam questões críticas que devem ser inclusas no desenvolvimento de um plano de modelagem, destacando-se o gradiente do módulo de resistência devido ao envelhecimento não-uniforme, mecanismos da trinca de cima para baixo e modos de fratura devido a tensões de contato pneu-pavimento.

Buscando calibrar um modelo de previsão do TDC em pavimentos asfálticos, Ling et al. (2019) desenvolveram um modelo com abordagem mecanístico-empírica para prever o início das trincas e a “vida pré-fadiga”. Foram considerados o envelhecimento a longo prazo e não-uniforme das misturas asfálticas.

Identificou-se uma conexão entre o surgimento de TDC e trincas “escama de jacaré”, indicando que o TDC pode ser um precursor das trincas por fadiga. Os resultados indicaram que as tensões axiais por variação térmica atuam de forma secundária na propagação do TDC, quando comparado ao efeito da carga de tráfego. Entretanto, o modelo desenvolvido deve ser adaptado para diferentes tipos de pneus e necessita de coleta contínua de dados de campo para calibragem.

Em resumo, fica claro pela revisão da literatura sobre os efeitos causadores da origem e propagação de top-down cracking nos pavimentos, que não há consenso entre os pesquisadores da existência de um fator único, ou ao menos majoritário, atuando na formação das trincas. Na verdade, é aceitável e amplamente acreditado pela comunidade científica, que existe uma combinação de múltiplos efeitos, já mencionados.

Conforme Baladi et al. (2003), podem-se citar, teoricamente, diversos fatores como causas do TDC, sendo que, obviamente, não há concordância na literatura sobre um fator principal. Entretanto, as diversas causas citadas podem ser separadas em duas grandes categorias, distintas entre si, sendo:

- Altos esforços de tração e deformação induzidos pelo carregamento, temperatura e outros fatores como construção;
- Baixa resistência dos materiais de concreto asfáltico a tração ou a fadiga, induzidos pelas propriedades da mistura, envelhecimento, endurecimento precoce e más práticas construtivas, como baixa compactação entre outros.

Para Canestrari e Ingrassia (2020), a literatura sugere que pavimentos de grande espessura tem o principal mecanismo de TDC relacionado com a tensão localizada no contato pneu e pavimento, a qual é bastante dependente das características do pneu e determina a origem da resistência a tração crítica e/ou tensões de cisalhamento na superfície do pavimento.

Para camadas asfálticas menos espessas, prevalece o mecanismo dos esforços de flexão globais (relacionado a resposta do pavimento aos carregamentos de tráfego). Entretanto, pavimentos com menor espessura estão mais suscetíveis ao surgimento de fissuras tradicionais, surgidas na base e propagadas ao topo do revestimento.

Cita-se ainda por Canestrari e Ingrassia (2020) como fatores cruciais, o gradiente de rigidez devido ao envelhecimento da mistura e condições climáticas,

assim como defeitos de construção e segregação da mistura ou má compactação tornam o pavimento mais propenso ao TDC, enquanto trincas induzidas por variação térmica são geralmente negligenciáveis (exceto em condições climáticas extremas).

### 2.7.3 MISTURA ASFÁLTICA MORNA (WMA)

De acordo com Wu et al. (2016), as reabilitações executadas repetitivamente sob a camada asfáltica, frequentemente resultam na alteração do pavimento flexível para um pavimento do tipo *deep-strength* (PDS), onde além da camada de revestimento, a camada de base também é constituída de mistura asfáltica, enquanto a sub-base permanece formada por material granular ou solo.

O WMA tornou-se uma tecnologia cada vez mais utilizada, já que reduz o consumo de energia e emissão de poluentes, devido principalmente as menores temperaturas de mistura e compactação (WU et al.,2016). Além disso, pode-se se citar como benefícios oferecidos pelo WMA, quando comparado com a mistura HMA tradicional: aumento da distância de transporte da massa asfáltica e redução de exposição dos trabalhadores aos gases nocivos à saúde. Dito isso, o uso da mistura asfáltica morna (WMA) tornou-se uma tendência em reabilitações no meio urbano, onde há necessidade de interrupções rápidas do trânsito e a solicitação de cargas é de ordem reduzida.

Devido ao pouco conhecimento da literatura sobre o tema, Wu et al. (2016) comparou a resposta ao top-down cracking entre pavimentos com mistura asfáltica morna (warm mix asphalt, WMA) e mistura a quente (hot mix asphalt, HMA). O projeto foi desenvolvido através do estudo de 28 pavimentos distribuídos nos Estados Unidos, variando em termos da tecnologia das misturas de WMA, zonas climáticas, níveis de tráfego e estrutura dos pavimentos. As conclusões foram de que pavimentos com HMA e WMA tiveram performances parecidas quanto à resistência ao TDC e a deformação vertical mostrou-se um fator determinante no surgimento de trincas.

Quanto ao tratamento e recuperação do top-down cracking, Harmelink et al. (2008) observou a ocorrência de segregação do material agregado, em volta das fissuras. Tão logo que a umidade penetra nas trincas, ocorre a deterioração progressiva do pavimento com o tempo. Portanto, a selagem das fissuras deve

reduzir a penetração de umidade, se o processo for realizado antes que as trincas sejam alargadas significativamente.

### 3 MÉTODO

As estruturas dos pavimentos abordadas neste trabalho foram modeladas com uso do Método dos Elementos Finitos por meio do *software* ABAQUS/CAE 6.14, o qual permitiu a estimativa do comportamento mecânico das estruturas sob diferentes condições de aderência entre as camadas.

O *software* ABAQUS foi escolhido por ser uma ferramenta de uso geral na resolução de problemas de engenharia, com análise de tensões e deformações baseado no Método dos Elementos Finitos, que possibilita boa representação da condição real do pavimento com uma variedade de ferramentas de análise (SANTOS, 2018).

A modelagem dos pavimentos sob carregamento do tráfego foi feita a partir das características gerais do problema como a geometria da estrutura, as características de carregamento e as condições de contorno. O estudo foi realizado com uma estrutura formada por camada asfáltica, base e subleito.

Os valores que definem as propriedades da base, subleito e mistura asfáltica foram fixados de acordo com a recomendação da bibliografia e baseados em trabalhos anteriores, de forma a possibilitar a comparação dos resultados obtidos e enriquecer as análises feitas neste trabalho.

#### 3.1 PARÂMETROS DEFINIDOS

O módulo de resiliência (MR) e Coeficiente de Poisson nas camadas constituintes do pavimento asfáltico analisado foram fixadas, em valores baseados nas médias encontradas entre pesquisas de referência e trabalhos semelhantes (Franco, 2007; Su et al., 2008; Matos, 2011; Pacheco, 2014; Dos Santos, 2019; Hadi e Al-Sherrawi, 2021) e podem ser visualizadas no Quadro 1 a seguir, assim como as espessuras fixas e variadas.

Devido a limitação de 1.000 elementos na estrutura gerada, ao utilizar o Abaqus na versão estudantil, os resultados gerados podem ter influência direta da espessura definida para o subleito do pavimento, já que algumas referências (Huang, 2004) sugerem a utilização de subleitos mais espessos, na ordem de 300

cm, para simular condições reais, onde o subleito trata-se de uma camada semi-infinita.

**Quadro 1: Propriedades quanto a geometria e material estrutural**

Camada	Tipo da camada	Espessura (cm)	Módulo resiliente - MR (MPa)	Coefficiente de Poisson - $\nu$
1	Revestimento asfáltico	5 / 15 / 25	3000	0,30
2	Base	30	300	0,40
3	Subleito	100	150	0,45

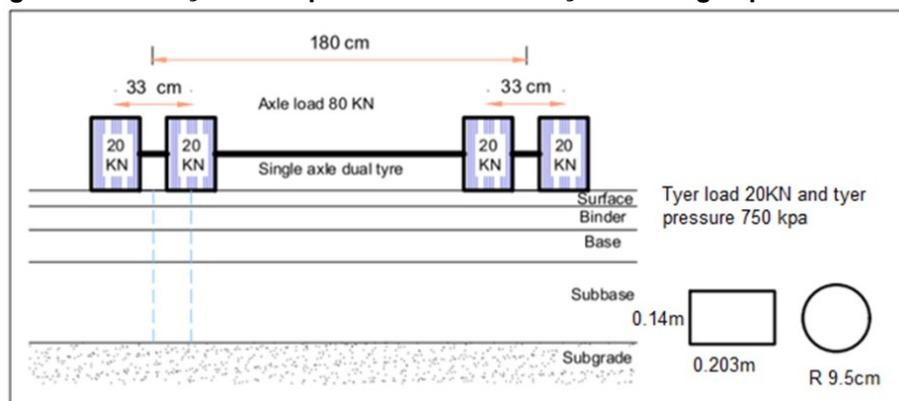
Fonte: Autoria própria (2023).

A estrutura apresentada foi analisada com semieixo fixado, entretanto com duas configurações de pneus, sendo o mesmo carregamento de eixo total para ambas propostas:

- Eixo Simples de Rodas Duplas (ESRD);
- Eixo Simples, com Pneu Simples Extralargo;

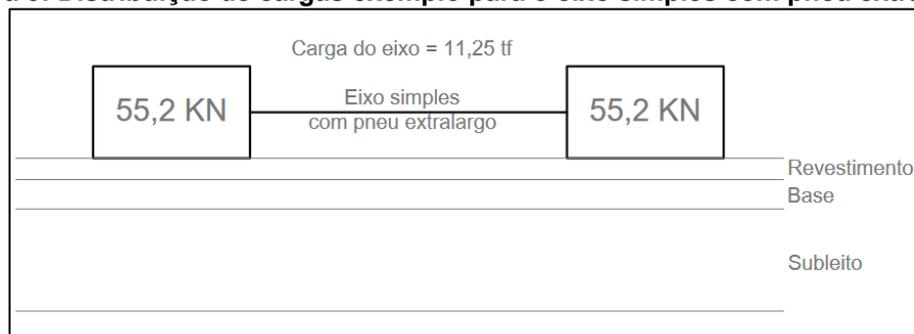
Nas figuras a seguir, pode-se visualizar como é feita distribuição de cargas para cada pneu conforme um eixo considerado.

**Figura 2: Ilustração exemplo de uma distribuição de cargas para um ESRD**



Fonte: Hadi e Al-Sherrawi (2021).

**Figura 3: Distribuição de cargas exemplo para o eixo simples com pneu extralargo**



Fonte: Autoria própria (2023).

Quanto ao carregamento, foram duas variações, com objetivo de simular condições reais de utilização que são observadas atualmente (Albano, 1998; Réus et al., 2014; Klamt et al., 2017; Bosso, 2018; CONTRAN, 2021):

- Carga máxima legalizada para o ESRD (eixo simples de rodas duplas), com fator de tolerância máxima permitido (10 tf + 12,5%), resultando em 11,25 tf para o total do eixo;
- Sobrecarga de 30%, além do máximo permitido com tolerância (11,25 tf + 30%), resultando em 14,625 tf para o total do eixo;

Na tabela 1 abaixo são apresentados os carregamentos para cada pneu aplicado nas estruturas, de acordo com a carga total para o eixo considerado e configuração de pneus. A pressão de enchimento utilizada de acordo com o tipo de pneu, também está informada a seguir.

**Tabela 1 - Carregamentos aplicados a cada pneu do conjunto**

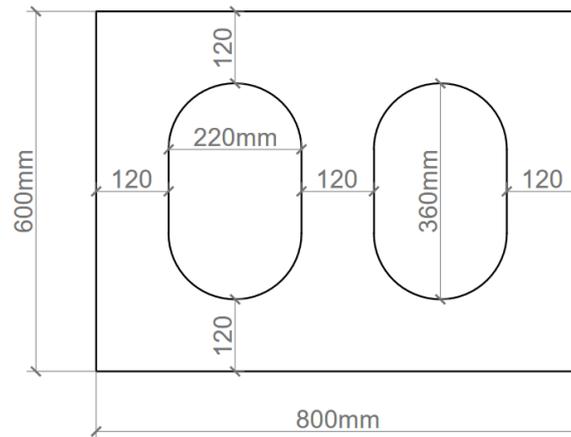
Configuração de pneus	Carregamento total do eixo (tf)		Pressão de enchimento (kPa)
	11,25	14,625	
Semieixo ESRD	27,6 kN	35,9 kN	720 (104 psi)
Semieixo Pneu extralargo	55,2 kN	71,7 kN	825 (120 psi)

**Fonte: Autoria própria (2023).**

Quanto as dimensões da estrutura analisada, a modelação utilizando apenas o semieixo, tem como objetivo de reduzir os custos computacionais e considerando que não há influencia ou impacto nos resultados, partindo do conceito de simetria e transferência igualitária de cargas entre os semieixos.

As dimensões do pavimento no plano XY podem ser visualizadas na Figura a seguir, com unidade de medida em milímetros (mm). Como já citado, o eixo X representa o sentido transversal da pista, enquanto o eixo Y representa o sentido longitudinal.

**Figura 4: Dimensões do pavimento flexível modelado com área de contato para ESRD.**

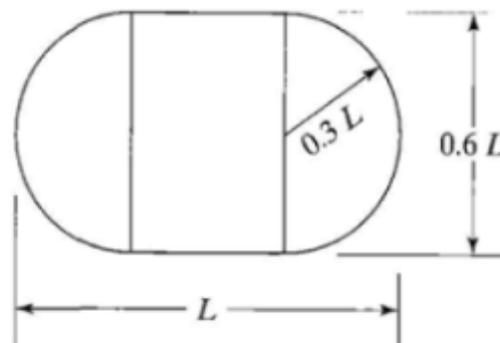


**Fonte: Autoria própria (2023).**

Para as dimensões e forma geométrica das áreas de contato entre pneu e pavimento, em cada configuração de pneus e magnitude de carga resulta em uma área total característica, em função do carregamento e pressão de enchimento dos pneus, com o comprimento total ( $L$ ) e a largura ( $0,6 \cdot L$ ) em função da área total onde é utilizado a equação sugerida por Huang (2004).

$$L = \sqrt{\frac{A}{0,5227}}$$

**Figura 5: Área de contato proposta, referente a um pneu simples.**

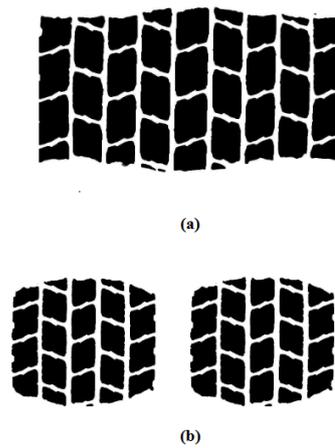


**Fonte: Huang (2004).**

Assim, para o semieixo que representa um ESRD com carga total de 14,625tf e pressão de enchimento de 104 psi, a área correspondente de 38307,2 mm<sup>2</sup> resulta num  $L$  de 270,7 mm. Para cada configuração de pneus, carregamento e pressão de enchimento, esta área total e demais dimensões é recalculada e utilizada na modelagem inserida no software.

Já para o pneu extralargo, foi utilizado o conceito definido por Huang (2004) como área equivalente, já que possui uma relação entre largura e comprimento praticamente inversa ao pneu radial simples. Como não há registros na literatura sobre sugestões de geometria simplificada para o pneu extralargo, foi utilizado como referência uma área de contato real, extraída de Al-Qadi et al. (2005), que compara as marcas de contato entre pneus simples e extralargos.

Figura 6: Área de contato medida em (a) Pneu extralargo e (b) Pneus duplos.



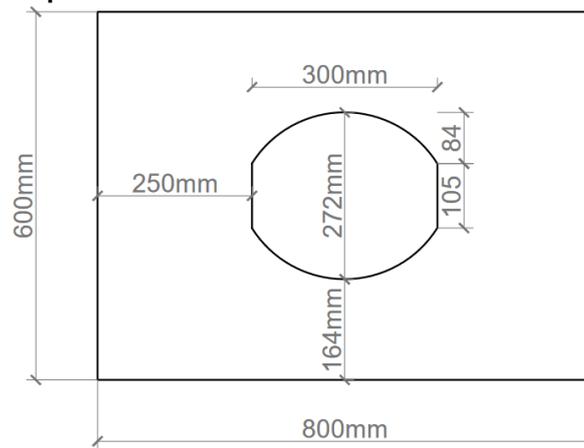
Fonte: Al-Qadi et al. (2005).

Figura 7: Mapa de pressão de um pneu extralargo com 85psi e 8.000 lbf.



Fonte: Hansen et al. (1989).

**Figura 8: Dimensões do pavimento flexível modelado com área de contato para extralargo.**



**Fonte: Autoria própria (2023).**

### 3.2 AMBIENTE DO SOFTWARE

Para a determinação das tensões, deformações e deslocamentos que ocorrem no pavimento, foi utilizado o Método de Elementos Finitos por meio de uma modelagem tridimensional das estruturas no software ABAQUS/CAE 6.14, versão para teste estudantil, com limitação de 1.000 nós por elemento analisado.

**Figura 9: Modelo em 3D, para revestimento de 15 cm no Abaqus.**

**Fonte: Autoria própria (2023).**

**Quadro 2: Representação esquemática do pavimento demonstrado acima**

Camada	Nome da camada	Espessura da camada (cm)
1	Revestimento asfáltico 1	5,00
2	Revestimento asfáltico 2	5,00
3	Revestimento asfáltico 3	5,00
4	Base	30,00
5	Subleito	100,00

**Fonte: Autoria própria (2023).**

A pressão de contato foi dividida em 8 bandas longitudinais, em cada tipo de pneus e área de contato, com tamanho total de acordo com o carregamento aplicado e pressão de enchimento para cada variação.

**Figura 10: Área de contato aplicada para um eixo simples de rodas duplas (11,25 tf).**

**Fonte: Autoria própria (2023).**

**Figura 11: Área de contato aplicada para um pneu extralargo de eixo simples (11,25 tf).**

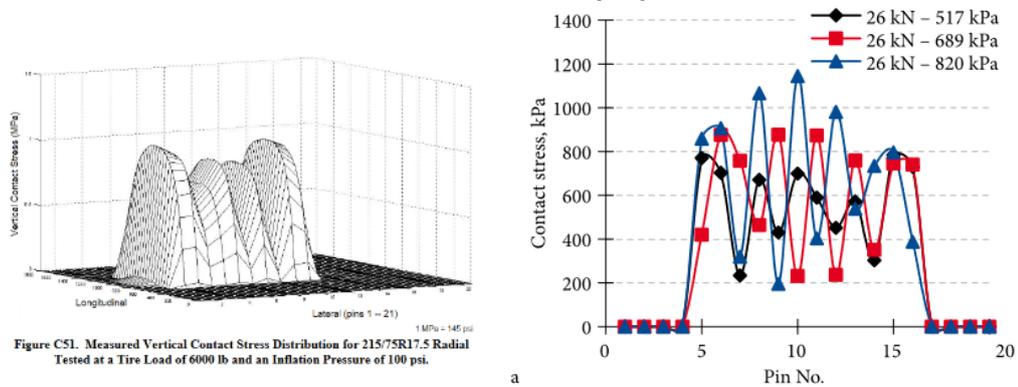
**Fonte: Autoria própria (2023).**

A distribuição das pressões de contato foi determinada de acordo com as referências de trabalhos experimentais encontrados. Em função da inexistência de dados perfeitamente compatíveis com as variações propostas neste trabalho, as

distribuições foram adaptadas de acordo com a proximidade das configurações utilizadas nos experimentos de referência.

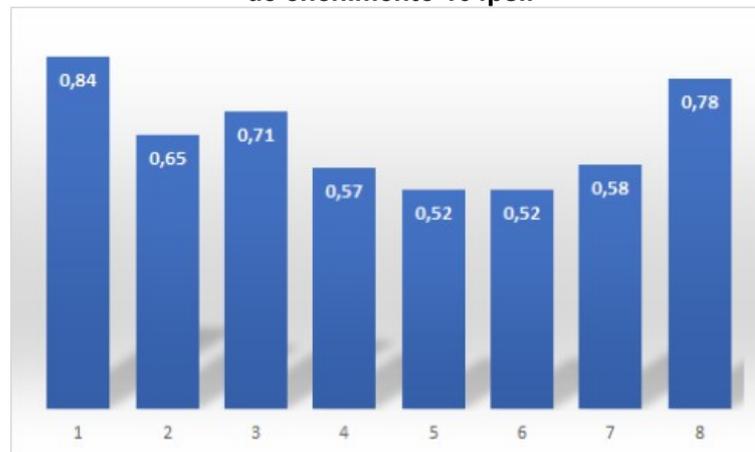
As distribuições buscaram seguir a linearidade selecionada e a lógica definida por diversos autores (De Beer et al., 1997; Al-Qadi et al., 2004; Fernando et al., 2006), onde geralmente, a magnitude de carga será responsável pela pressão de contato próximo as bordas do pneu como observado na Figura 10 (a), e a pressão de enchimento pelas pressões próximas ao centro, como pode ser observado, conforme demonstrado na Figura 10 (b).

**Figura 12: Distribuições de contato aproximadas ao caso de ESRD, com carga e pressão semelhantes a variação proposta.**



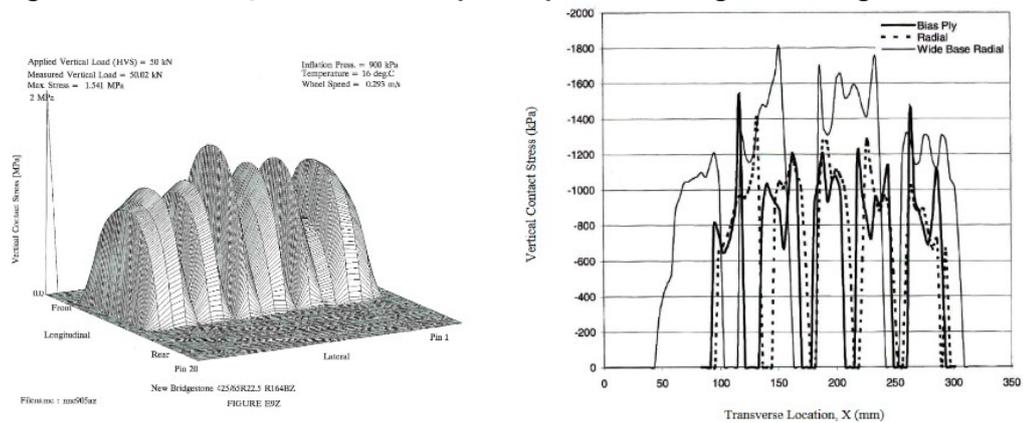
**Fonte: (a) De Beer et al. (1997), (b) D.W.Park et al. (2008).**

**Gráfico 4: Distribuição da pressão de contato (em MPa) definida para ESRD (11,25tf) e pressão de enchimento 104psi.**



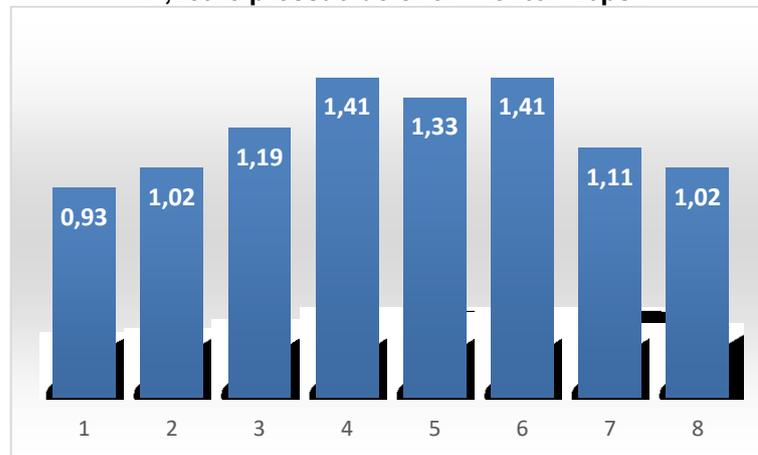
**Fonte: Autoria própria (2023).**

**Figura 13: Distribuições de contato para o pneu extralargo com carga moderada.**



Fonte: (a) De Beer et al. (1997), (b) D.W.Park et al. (2008).

**Gráfico 5: Distribuição da pressão de contato (em MPa) utilizada para pneu extralargo com 11,25tf e pressão de enchimento 120psi.**

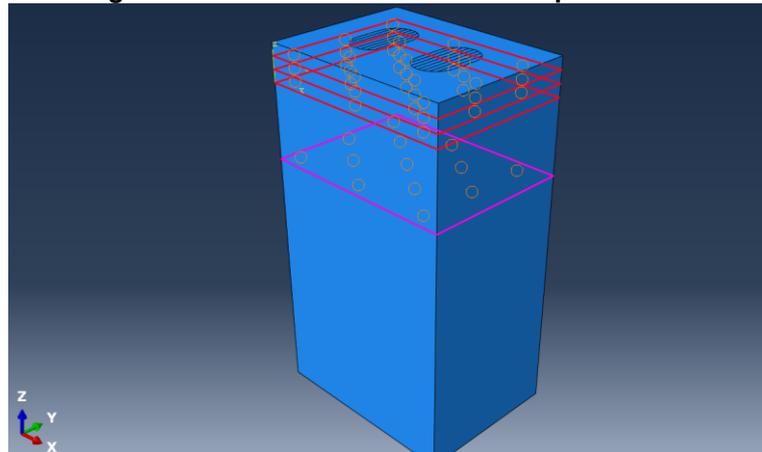


Fonte: Autoria Própria (2023).

Para a configuração da forma de distribuição dos esforços entre as camadas do pavimento, foi utilizado a opção *tie constraint*, que simula a condição de aderência total entre as camadas. Ou seja, cada elemento imediatamente abaixo da superfície de contato entre camadas, está restringido ao movimento do elemento logo acima, referente a camada adjacente.

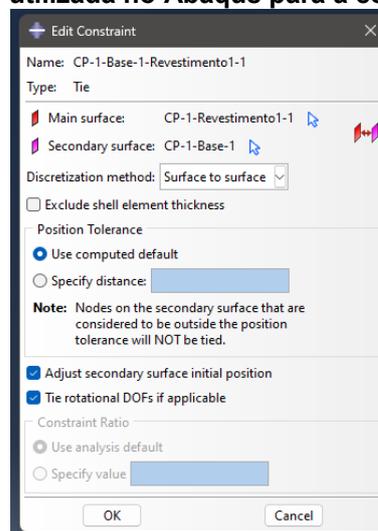
É de conhecimento a perfeita aderência entre as camadas do pavimento é uma condição praticamente impossível de ser obtida em campo, porém é uma escolha apropriada para estudo e simulação estrutural, por tratar-se de suposição utilizada no método de dimensionamento DNER.

**Figura 14: Interface das camadas do pavimento.**



**Fonte: Autoria Própria (2023).**

**Figura 15: Configuração utilizada no Abaqus para a condição de aderência total**



**Fonte: Autoria Própria (2023).**

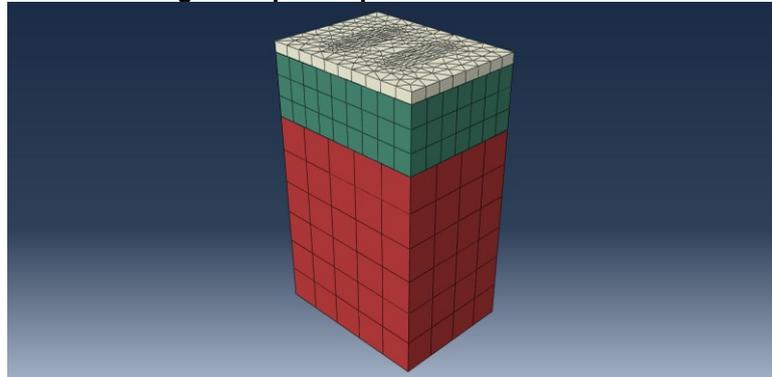
Foram utilizadas três condições de contorno. O fundo do subleito foi engastado, ou seja, foi impedida movimentação nos três eixos. A parede que corta a estrutura transversalmente ao sentido do tráfego (eixo y) foi impedida de movimentar-se no eixo x, já a parede que corta a estrutura paralelamente foi impedida no eixo y. A figura a seguir mostra as condições de contorno utilizadas no software.

**Figura 16: Condições de contorno e sentido do carregamento**

**Fonte: Aatoria Própria (2023).**

Com relação a configuração da malha de elementos finitos, quanto menores forem o tamanho dos elementos que dividem as camadas, melhor será a qualidade da análise, em nível de detalhes e distribuição de esforços. A versão estudantil do software possui uma limitação de 1.000 nós para a estrutura. Buscou-se a melhor distribuição possível que se aproximasse do limite disponível, sendo priorizado a geração da maior quantidade de elementos nas camadas próximas a superfície superior, reduzindo-os à medida que se aproximou da base do subleito.

**Figura 17: Malha gerada para o pavimento com revestimento de 5cm**



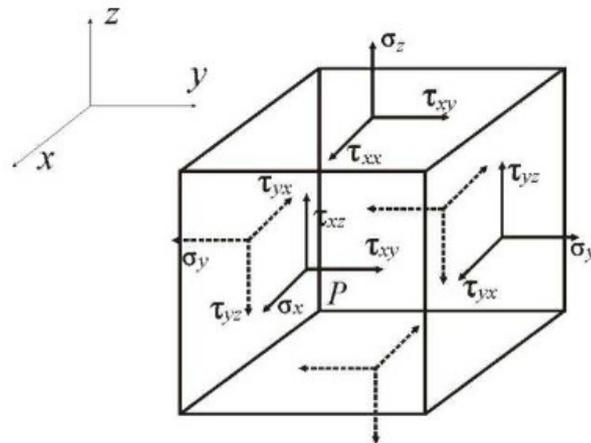
**Fonte: Aatoria Própria (2023).**

**Figura 18: Vista superior da malha gerada para o pavimento com revestimento de 5cm**

**Fonte: Aatoria Própria (2023).**

Com relação a geração dos resultados, o software utiliza notação baseada em componentes normais e cisalhantes, sendo estes distribuídos sobre a superfície do corpo, conforme a figura a seguir. Assim, a tensão cisalhante é decomposta em duas componentes paralelas aos outros dois eixos coordenados. Neste caso, são usadas letras subscritas, a primeira indica a direção normal ao plano considerado e a segunda indica a direção componente da tensão.

**Figura 19: Elemento cúbico sujeito a tensões e deformações.**



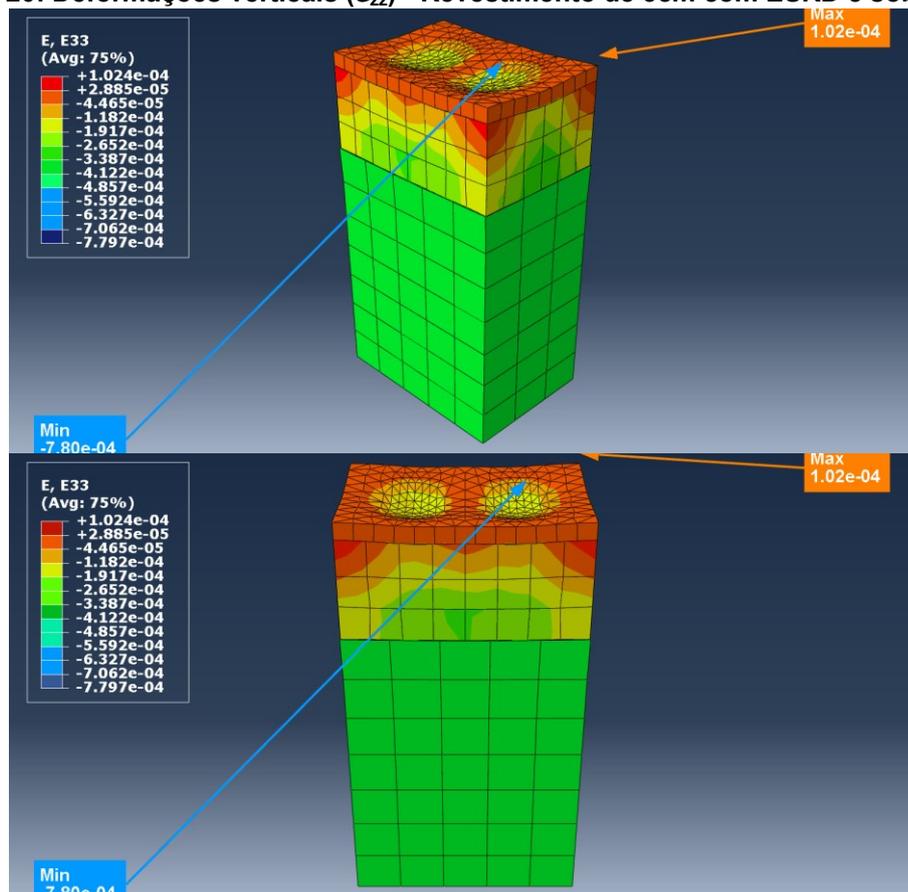
Fonte: Matos (2011).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a definição das estruturas a serem modeladas no software de elementos finitos Abaqus, além das variações definidas e descritas na seção anterior, foram gerados os resultados em função de tensões, deformações e deslocamentos de interesse, aplicados as camadas e interfaces que constituem o pavimento simulado.

Inicialmente, as simulações de comportamento do pavimento resultam em gráficos de três dimensões, onde os dados de interesse ao objetivo do trabalho podem ser extraídos, além de possibilitar uma análise visual do comportamento entre as camadas da estrutura.

Figura 20: Deformações verticais ( $\epsilon_{zz}$ ) - Revestimento de 5cm com ESRD e sobrecarga



Fonte: Autoria Própria (2023).

No Abaqus, os resultados gerados são expressos empregando as notações conhecidas da mecânica clássica, onde as tensões de tração podem ser

visualizadas em cores avermelhadas e tensões de compressão nas cores azuladas, como observado na Figura 22.

Deformações e deslocamentos no sentido positivo do eixo em questão são visualizados em cores avermelhadas, enquanto deformações e deslocamentos negativos nas cores azuladas. A cor verde e suas tonalidades representa valores nulos ou próximos ao zero. A localização de pontos máximos e mínimos podem ser destacados nas imagens extraídas do software, bem como seus respectivos valores.

Entre os principais parâmetros que foram investigados nos modelos tridimensionais, através das imagens extraídas, pode-se citar a tensão vertical, tensão cisalhante transversal, tensão cisalhante longitudinal, tensão máxima principal, além das deformações específicas correspondentes. O deslocamento vertical e a tensão de Von Mises também foram extraídos para análise do comportamento estrutural.

Lembra-se que o software Abaqus foi utilizado em sua versão para teste estudantil, a qual tem algumas limitações, dentre elas o número total de nós existentes na malha da estrutura, para geração dos resultados deve ser de 1.000 nós, o que se mostrou um limitador considerável da análise sugerida, pois a distribuição das tensões e deformações não possui grande nível de detalhe.

A limitação citada influencia principalmente na análise visual dos resultados em três dimensões. Ainda assim, há diversas possibilidades e nuances a serem observadas e apontadas como prováveis características no comportamento estrutural do pavimento, que ajudam a compreender os mecanismos de fratura, principalmente no revestimento, onde buscou-se maior nível de detalhe na malha gerada. Lembra-se que o eixo Y representa o sentido longitudinal da pista, enquanto o eixo X trata-se do eixo transversal e o eixo Z a profundidade ou espessura.

**Figura 21: Tensões cisalhantes no plano XZ – Revestimento 5cm e ESRD (11,25tf).**

**Fonte: Aatoria Própria (2023).**

**Figura 22: Tensões cisalhantes no plano XZ – Revestimento 15cm e ESRD (11,25tf).**

**Fonte: Aatoria Própria (2023).**

**Figura 23: Tensões cisalhantes no plano XZ – Revestimento 25cm e ESRD (11,25tf).**

**Fonte: Aatoria Própria (2023).**

Ao analisar as tensões cisalhantes no sentido transversal ao plano da superfície, em condições normais de carregamento, pode-se observar que o aumento da espessura do revestimento gerou diminuição de magnitude nas tensões máximas, as quais estão localizadas na superfície do revestimento.

Visualmente observa-se que as camadas inferiores do revestimento estão expostas a tensões que podem resultar na redução comentada, na camada superior. Quanto a localização no plano da superfície, está explícito que as maiores tensões ocorrem na borda externa do conjunto de pneus duplos.

Além disso, observa-se que não há, nas simulações elaboradas neste trabalho, distribuição de tensão considerável a camada do subleito, enquanto na camada intermediária (base) foram geradas maiores tensões apenas no caso do revestimento mais fino.

**Figura 24: Tensões cisalhantes no plano XZ – Revestimento 5cm e ESRD com sobrecarga**

**Fonte: Aatoria Própria (2023).**

**Figura 25: Tensões cisalhantes no plano XZ – Revestimento 5cm e ESRD com sobrecarga**

**Fonte: Aatoria Própria (2023).**

**Figura 26: Tensões cisalhantes no plano XZ – Revestimento 15cm e ESRD com sobrecarga**

**Fonte: Aatoria Própria (2023).**

Para a variação de carga, simulando uma sobrecarga excessiva de 30% além do limite legal, observa-se características semelhantes de distribuição de tensões cisalhantes. Entretanto, destaca-se para a variação com revestimento de 5cm, onde a tensão máxima não está localizada próximo a borda externa do trilho de rodas, mas junto a borda interna, imediatamente na distância entre as duas rodas que compõem o conjunto de rodas duplas. Indicando possível ruptura por cisalhamento transversal localizada exatamente no meio da trilha de rodas, para um revestimento delgado.

**Figura 27: Tensões cisalhantes no plano XZ – Revestimento 5cm e Eixo Simples com Pneu Extralargo (11,25tf).**

**Fonte: Aatoria Própria (2023).**

**Figura 28: Tensões cisalhantes no plano XZ – Revestimento 15cm e Eixo Simples com Pneu Extralargo (11,25tf).**

**Fonte: Aatoria Própria (2023).**

**Figura 29: Tensões cisalhantes no plano XZ – Revestimento 15cm e Eixo Simples com Pneu Extralargo, com sobrecarga (14,625tf).**

**Fonte: Aatoria Própria (2023).**

**Figura 30: Tensões cisalhantes no plano XZ – Revestimento 25cm e Eixo Simples com Pneu Extralargo, com sobrecarga.**

**Fonte: Aatoria Própria (2023).**

Ao analisar as tensões cisalhantes no plano transversal, com a configuração de Pneu extralargo (singular) no eixo simples, pode se destacar nas tensões máximas localizadas em camada intermediária do revestimento asfáltico, fato

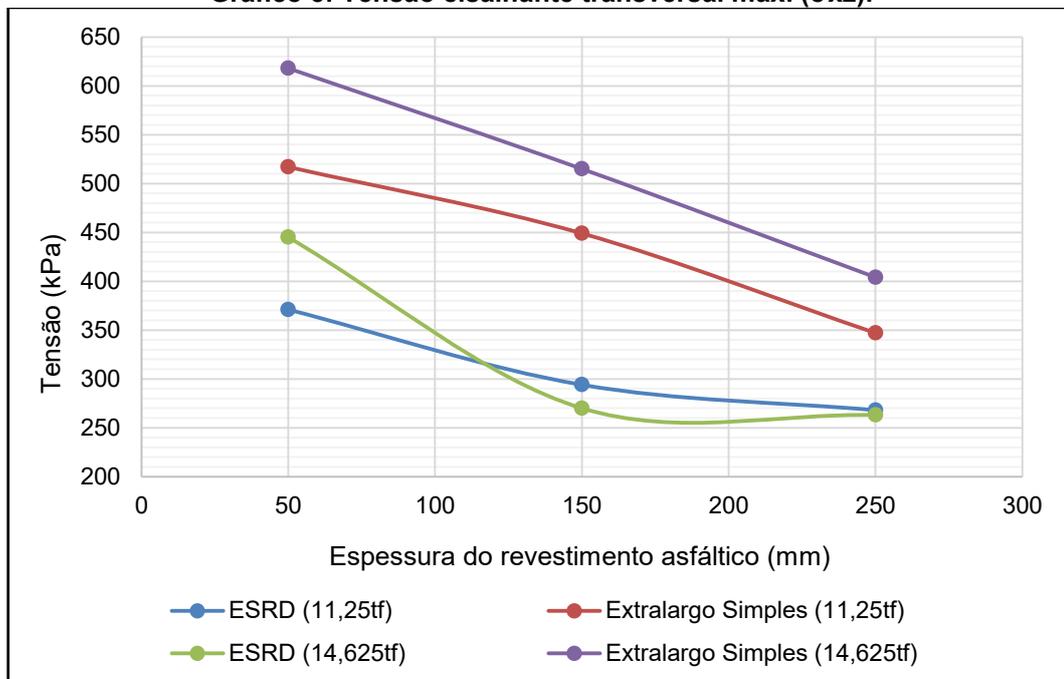
ocorrido apenas para o revestimento de 15cm, e que se repete na configuração de carga excessiva.

Devido ao limitador de nós na estrutura, não se pode afirmar que uma espessura específica seja causadora do exposto, pois nos casos modelados com uma camada fina de 5cm para o revestimento, não há separação de nós superiores e inferiores de revestimento. Apesar de que para revestimento mais espesso (25cm) a tensão máxima permaneceu localizada na superfície superior, não há um parâmetro de referência para o revestimento delgado.

No Gráfico 1 a seguir, estão demonstradas tensões cisalhantes transversais para os pavimentos gerados no software. As maiores tensões são referentes ao pneu extralargo no eixo simples, diminuindo proporcionalmente ao aumento da camada de revestimento asfáltico.

Há uma anomalia de resultados observada para o caso referente ao ESRD com sobrecarga e revestimento de 15cm, caso citado anteriormente pela localização da tensão máxima em camada intermediária. Este fato pode estar ligado as condições de contorno definidas e espessura do subleito, que como já citado anteriormente, não se enquadra na espessura indicada por estudos (Huang, 2004).

**Gráfico 5: Tensão cisalhante transversal máx. ( $\sigma_{xz}$ ).**



**Fonte: Autoria Própria (2023).**

As tensões cisalhantes no sentido longitudinal do pavimento são outro parâmetro que deve ser analisado, já que diversas referências também citam como

um provável mecanismo de abertura de trincas na superfície. Assim como na análise transversal, as imagens foram extraídas do software para as tensões no plano yz, e cortadas junto ao ponto de máxima tensão, afim de auxiliar a visualização do comportamento em pontos críticos.

**Figura 31: Tensões cisalhantes no plano YZ – Revestimento 5cm e ESRD (11,25tf).**

**Fonte: Autoria Própria (2023).**

**Figura 32: Tensões cisalhantes no plano YZ – Revestimento 15cm e ESRD (11,25tf).**

**Fonte: Autoria Própria (2023).**

**Figura 33: Tensões cisalhantes no plano YZ – Revestimento 25cm e ESRD (11,25tf).**

**Fonte: Autoria Própria (2023).**

Observa-se que as tensões cisalhantes no sentido longitudinal do pavimento, ou seja, no sentido do tráfego, estão localizadas religiosamente ao longo da trilha de rodas, além de que começam na superfície, mas são mais distribuídas para as camadas inferiores da estrutura simulada, em comparação as tensões transversais. Podendo também ser um efeito relacionado com o esforço de tração motora do veículo, transferido pelo contato pneu-pavimento.

Quanto a variação nas configurações de carga e pneus que compõem o eixo, as tensões longitudinais seguem um padrão mais característico e uniforme, visto que a distribuição e magnitude das tensões é relativamente proporcional aos aumentos de carga e espessura do revestimento. O revestimento de 15cm de espessura resultou em maiores tensões na camada intermediária e a transmissão de tensões para a camada da base é observada em todos os casos de variações.

**Figura 34: Tensões cisalhantes no plano YZ – Revestimento 15cm e ESRD com sobrecarga**

**Fonte: Autoria Própria (2023).**

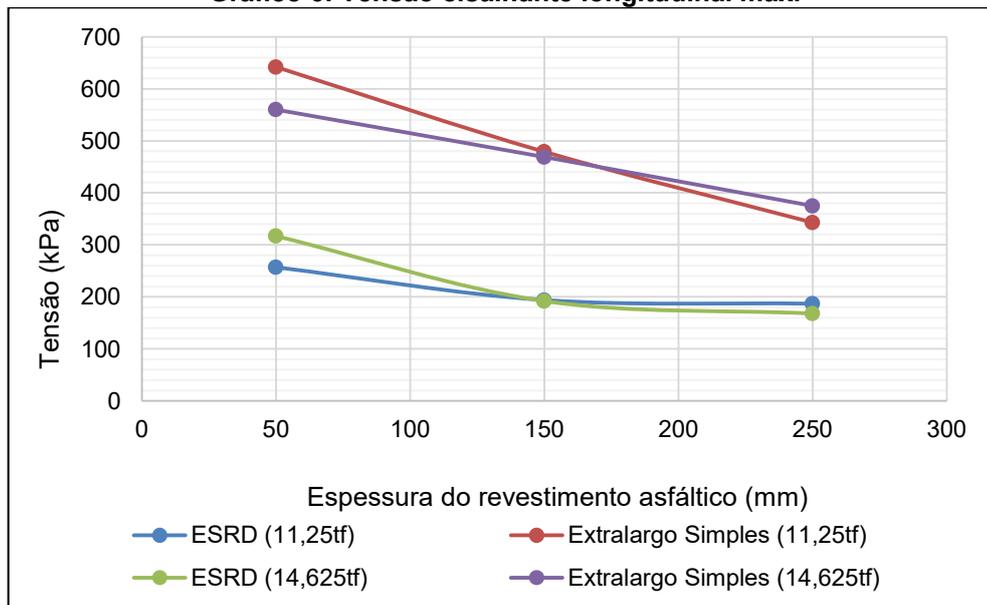
**Figura 35: Tensões cisalhantes no plano YZ – Revestimento 5cm e Eixo Simples com Pneu Extralargo**

Fonte: Autoria Própria (2023).

**Figura 36: Tensões cisalhantes no plano YZ – Revestimento 25cm e Eixo Simples com Pneu Extralargo, com sobrecarga**

Fonte: Autoria Própria (2023).

**Gráfico 6: Tensão cisalhante longitudinal máx.**



Fonte: Autoria Própria (2023).

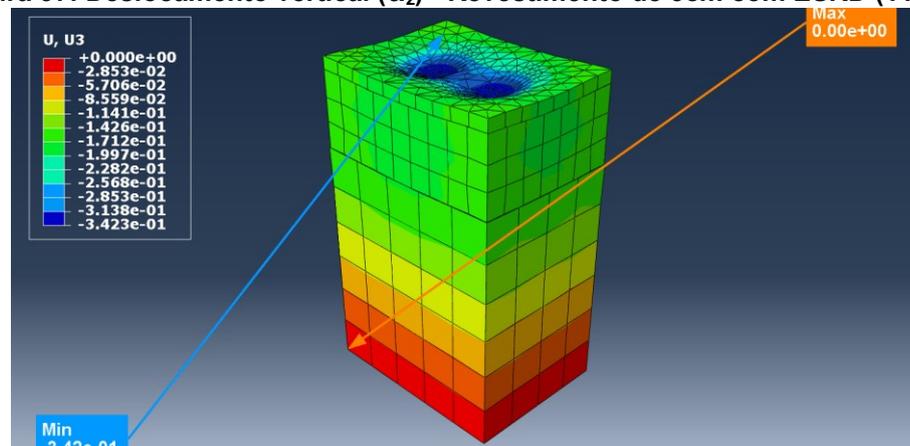
O gráfico de tensões no sentido longitudinal do pavimento demonstra alguns pontos que devem ser observados. Contra intuitivamente, a tensão extrema nas combinações realizadas foi com revestimento de 5cm, mas na configuração de pneu extralargo simples sem excesso de carregamento, fato que não se repetiu na configuração de ESRD, onde a maior carga produziu a maior tensão.

Destaca-se ainda que para o revestimento com 15cm de espessura, o carregamento praticamente não influenciou na magnitude da tensão máxima, sendo unicamente influenciada pela configuração de rodas e consequente distribuição das pressões de contato. Dito isso, o pneu extralargo produziu tensões 150% maiores, no sentido longitudinal de cisalhamento.

Resumidamente, o revestimento com espessura reduzida mostrou-se mais sensível ao aumento de carga aplicada que outras espessuras, o que pode ser determinante em pavimentos regionais brasileiros, onde a espessura da camada asfáltica é conhecidamente menor, em geral. Ainda que deve ser considerado hipoteticamente que outros fatores possam ser determinantes nesta sensibilidade, como o aumento da área de contato com o pneu, assim como a distribuição das pressões de contato.

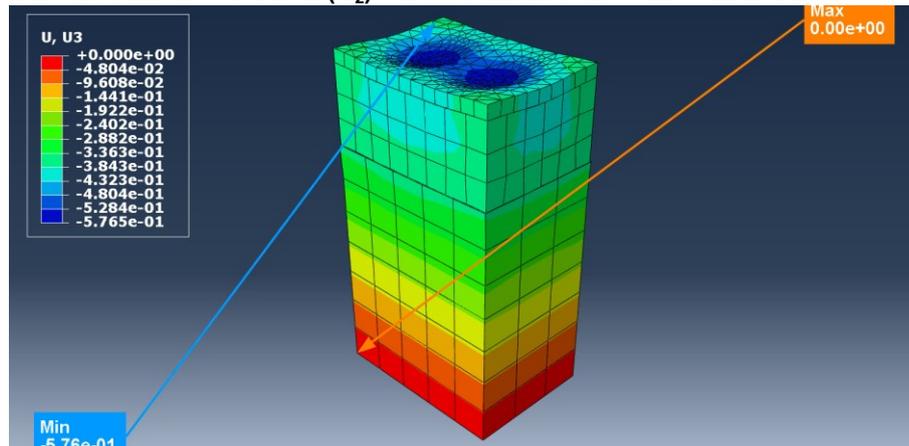
O deslocamento vertical, quando analisado próximo a superfície da camada superior do pavimento, que é objetivo do presente trabalho, pode auxiliar no estudo da tendencia para formação de deformações plásticas na superfície do revestimento, conhecidas como afundamento da trilha de roda, e que por si só constitui um defeito majoritário nos pavimentos, além de conhecidamente estar ligada ao surgimento de trincas longitudinais a partir da superfície da camada asfáltica.

**Figura 37: Deslocamento vertical ( $U_z$ ) - Revestimento de 5cm com ESRD (11,25 tf)**



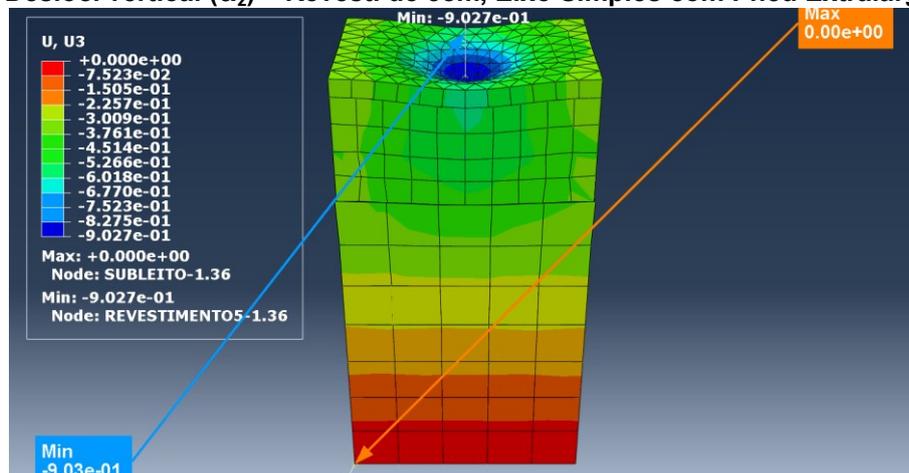
Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 38: Deslocamento vertical ( $U_z$ ) - Revestimento de 5cm com ESRD com sobrecarga



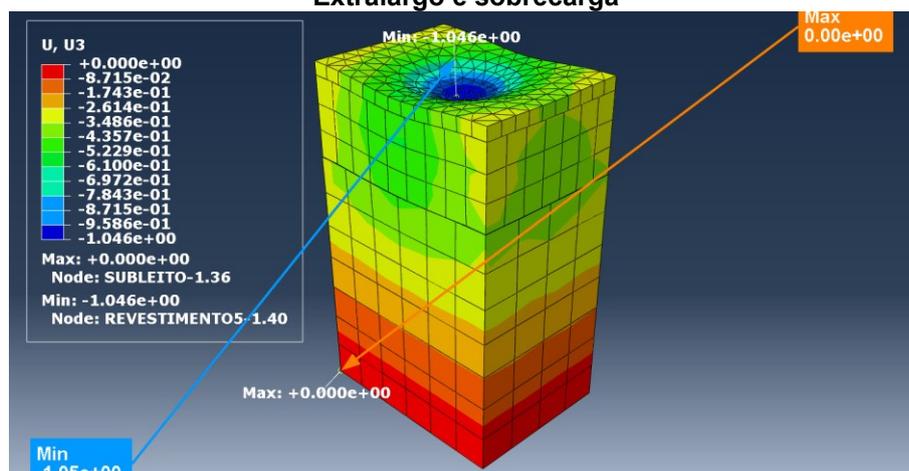
Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 39: Desloc. vertical ( $U_z$ ) – Revest. de 5cm, Eixo Simples com Pneu Extralargo (11,25 tf).



Fonte: Autoria própria (2023).

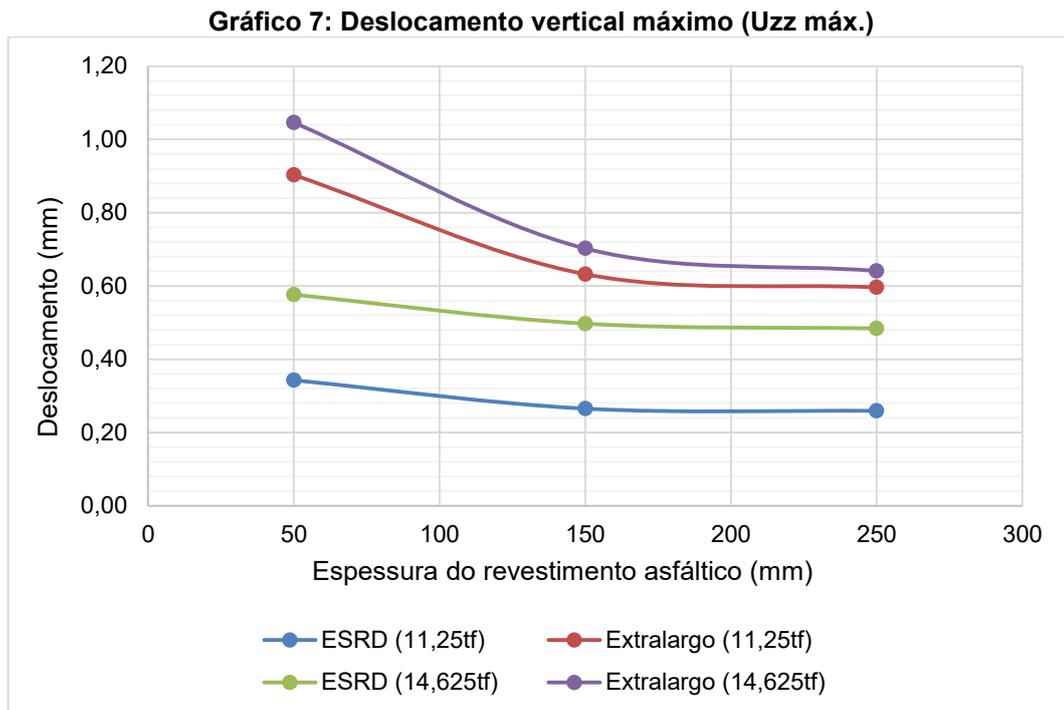
Figura 40: Deslocamento vertical ( $U_z$ ) - Revestimento de 5cm, Eixo Simples com Pneu Extralargo e sobrecarga



Fonte: Autoria própria (2023).

Quanto ao deslocamento vertical máximo medido nas variações simuladas, sua magnitude é praticamente constante a todas as combinações, variando linearmente numa faixa restrita. Excepcionalmente, quando o pneu extralargo é

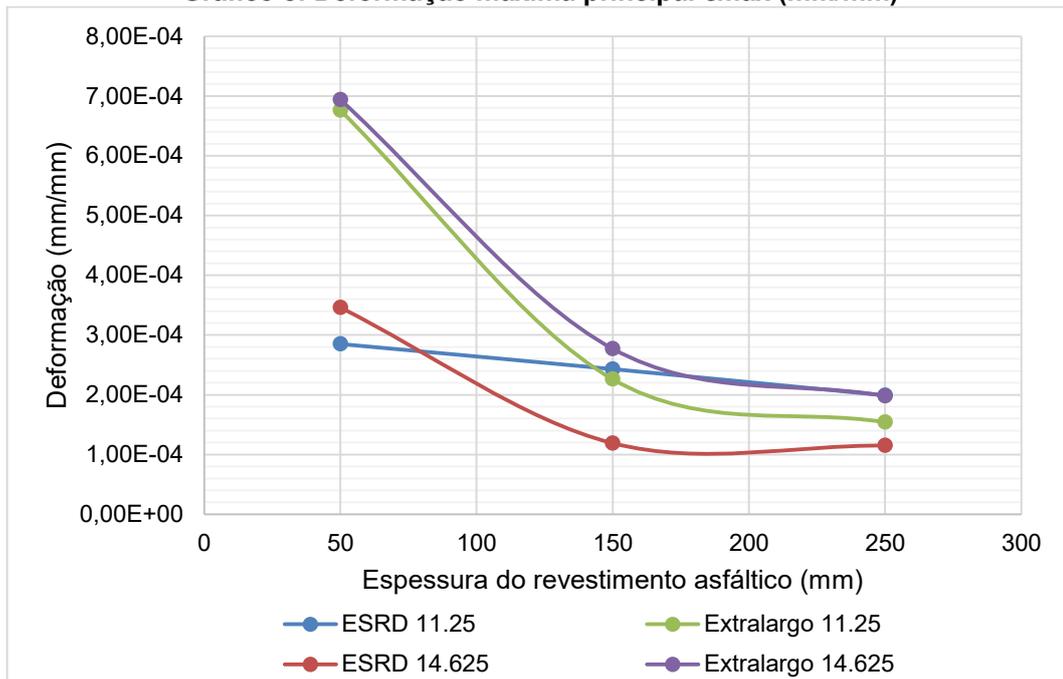
aplicado em camadas de revestimento menos espessas, é visto um grande aumento no deslocamento vertical máximo, de aproximadamente 45%, o que se mostra um fator determinante. A configuração de área de contato do pneu extralargo simples, bem como a respectiva distribuição de pressões, se mostra um fator determinante para maiores deslocamentos verticais.



**Fonte: Autoria Própria (2023).**

Os resultados de deformação máxima, um dos principais parâmetros utilizados em equações de previsão de desempenho, demonstram que a configuração dos pneus é muito mais influente que a carga propriamente dita, em especial na utilização de pneus extralargos, em substituição ao conjunto de pneus duplos. Esse fenômeno é suavizado a medida em que se aumentou a espessura do revestimento.

**Gráfico 8: Deformação máxima principal  $\epsilon_{\text{máx}}$  (mm/mm)**



**Fonte: Autoria Própria (2023).**

Observa-se que na comparação entre os pneus duplos, a maior carga obteve deformação máxima principal menor, principalmente nas maiores espessuras de revestimento. Este fato pode ser resultado da configuração na interface entre as camadas, consideradas com aderência total, e poderia ser comparado com outra configuração de aderência, para efeito de investigação das causas de não-linearidade entre os casos.

## 5 QUADRO RESUMO DE RESULTADOS OBTIDOS

**Quadro 3: Tensões principais máximas obtidas.**

Configuração de eixo	Espessura do revestimento (mm)	Carregamento total do eixo (tf)	
		11,25	14,625
		$\sigma$ principal máx. (kPa)	
Eixo Simples de Rodas Duplas (ESRD)	50	1,240	1,350
		-1,120	-1,440
	150	0,304	0,334
		-0,552	-0,694
	250	0,369	0,271
		-0,499	-0,562
Eixo Simples c/ Pneu Extralargo	50	2,920	2,690
		-3,190	-3,040
	150	0,753	0,909
		-1,580	-1,710
	250	0,452	0,417
		1,140	-1,230

**Quadro 4: Deformações principais máximas obtidas.**

Configuração de eixo	Espessura do revestimento (mm)	Carregamento total do eixo (tf)	
		11,25	14,625
		$\epsilon$ principal máx. (mm/mm)	
Eixo Simples de Rodas Duplas (ESRD)	50	2,85E-04	3,46E-04
		-9,75E-05	-1,22E-04
	150	2,43E-04	1,19E-04
		-4,23E-05	-8,25E-05
	250	1,99E-04	1,15E-04
		-3,07E-05	-4,65E-05
Eixo Simples c/ Pneu Extralargo	50	6,76E-04	6,94E-04
		-2,60E-04	-2,36E-04
	150	2,26E-04	2,77E-04
		-1,70E-04	-1,85E-04
	250	1,54E-04	1,98E-04
		-8,83E-05	-1,24E-04

**Quadro 5: Tensões cisalhantes longitudinais máximas obtidas.**

Configuração de eixo	Espessura do revestimento (mm)	Carregamento total do eixo (tf)	
		11,25	14,625
		$\sigma_{yz}$ máx. (kPa)	
Eixo Simples de Rodas Duplas (ESRD)	50	257,0	317,0
	150	194,0	192,0
	250	187,0	168,0
Eixo Simples c/ Pneu Extralargo	50	642,0	560,0
	150	479,0	469,0
	250	343,0	375,0

**Quadro 6: Tensões cisalhantes transversais máximas obtidas.**

Configuração de eixo	Espessura do revestimento (mm)	Carregamento total do eixo (tf)	
		11,25	14,625
		$\sigma_{xz}$ máx. (kPa)	
Eixo Simples de Rodas Duplas (ESRD)	50	310,0	440,0
		-371,0	-445,0
	150	256,0	270,0
		-294,0	-270,0
	250	231,0	263,0
		-268,0	-263,0
Eixo Simples c/ Pneu Extralargo	50	517,0	618,0
		-489,0	-576,0
	150	449,0	515,0
		-444,0	-497,0
	250	347,0	404,0
		-320,0	-376,0

**Quadro 7: Deslocamentos verticais máximos obtidos.**

Configuração de eixo	Espessura do revestimento (cm)	Carregamento total do eixo (tf)	
		11,25	14,625
		Deslocamento máx. (mm)	
Eixo Simples de Rodas Duplas (ESRD)	50,00	0,3425	0,5760
	150,00	0,2650	0,4970
	250,00	0,2590	0,4840
Eixo Simples c/ Pneu Extralargo	50,00	0,9030	1,0460
	150,00	0,6321	0,7023
	250,00	0,5960	0,6410

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

De acordo com a revisão sobre surgimento de trincas na superfície do pavimento, os principais fatores que causam esse fenômeno são as tensões cisalhantes na superfície do revestimento, sendo estas transversais ou longitudinais; o efeito da variação de temperatura; as distribuições da pressão de contato entre o pneu e o pavimento; e a relação com o afundamento da trilha de rodas.

Ao comparar o efeito da carga e da pressão de enchimento na pressão de contato, mostra-se que a carga influencia predominantemente nas bordas externas do pneu. Os resultados obtidos para tensão e deformação sugerem que as trincas surgidas na superfície estão ligadas majoritariamente com as tensões localizadas na interface do revestimento com a borda externa do pneu. Conclui-se então, que o surgimento das trincas de cima para baixo está relacionada diretamente com a carga e sobrecarga aplicadas no pavimento.

Entre as tensões cisalhantes, aquelas geradas no sentido longitudinal tiveram maior distribuição para as camadas inferiores da estrutura, sejam elas de revestimento ou de base/subleito, e, portanto, podendo ligá-las a defeitos surgidos nas camadas de baixo, especialmente trincas por fadiga.

As tensões cisalhantes no sentido transversal geraram maiores deformações na camada superior do revestimento, ou não foram distribuídas no caso de revestimento fino. Esta constatação vai de encontro ao sugerido pelas principais referências, que já citam como principal causa de trincas surgidas na superfície.

A análise de pavimentos utilizando um software de elementos finitos como o Abaqus, pode auxiliar na previsão de desempenho, pois há liberdade da entrada de parâmetros e dimensões que possibilitam a análise estrutural de diversas hipóteses. Os resultados são obtidos na forma de valores de tensão, deformação e deslocamentos, que podem ser utilizados em equações de previsão de desempenho.

Com os resultados obtidos, também se conclui que a utilização do pneu extralargo causou maior deformação máxima, comparado com a mesma carga distribuída em conjunto de pneus duplos.

## 6.1 SUGESTÕES DE TRABALHOS

- Aplicação das deformações geradas nos resultados, em equações de previsão de desempenho, para avaliação na forma de número de repetições ( $N_f$ ) e análise mecânica;
- Desenvolvimento de simulações com aplicação de cargas dinâmicas no software, para estudar o efeito da velocidade e aceleração nos pavimentos;
- Variação de outros fatores considerados essenciais no estudo do trincamento de cima para baixo, como a variação de temperatura, em especial para temperaturas baixas a médias, simulando as condições reais na região sul do Brasil;
- Estudo aplicado a outras configurações de eixo e variação de carga, como eixo tandem duplo e triplo;
- Modelação dos pavimentos na versão completa do Abaqus, sem a limitação de nós, ou então reduzindo a dimensão da base e subleito, afim de aumentar o detalhe na propagação das tensões e deformações;
- Aplicação dos modelos com aderência parcial entre as camadas, especialmente nas camadas inferiores, com intuito de simular as condições reais encontradas nos pavimentos.

## REFERÊNCIAS

- ALBANO, J. F. **EFEITOS DA VARIAÇÃO DA CARGA POR EIXO, PRESSÃO DE INFLAÇÃO E TIPO DE PNEU NA RESPOSTA ELÁSTICA DE UM PAVIMENTO**. 1998. 155 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil. 1998.
- AL-QADI I. L., YOO P. J., ELSEIFI M. A., JANAJREH I. **EFFECTS OF TIRE CONFIGURATIONS ON PAVEMENT DAMAGE**. Journal of the Association of Asphalt Pavement Technologists, vol. 58, Long Beach CA, United States, 2005.
- AL-QADI, I. L., A. LOULIZI, I. JANAJREH, AND T. E. FREEMAN. **PAVEMENT RESPONSE TO DUAL AND NEW WIDE-BASE TIRES AT THE SAME TIRE PRESSURE**. In: Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1806, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., pp. 38–47, 2002.
- BALADI, G. Y.; SCHORSCH, M.; SVASDISANT, T. **DETERMINING THE CAUSES OF TOP-DOWN CRACKS IN BITUMINOUS PAVEMENTS**. Michigan State University Department of Civil and Environmental Engineering, Michigan, June 2002.
- BALBO, José Tadeu. **PAVIMENTAÇÃO ASFÁLTICA: MATERIAIS, PROJETO E RESTAURAÇÃO**. Oficina de Textos. São Paulo, SP, 2007.
- BERNUCCI, L.L.B.; MOTTA, L.M.G.; CERATTI, J.A.P.; SOARES, J.B. **PAVIMENTAÇÃO ASFÁLTICA: FORMAÇÃO BÁSICA PARA ENGENHEIROS**. Rio de Janeiro: PETROBRAS, ABEDA, 2ª ed., 2022.
- BOSSO, Mariana. **USO DA TECNOLOGIA WEIGH-IN-MOTION PARA A CARACTERIZAÇÃO DO TRÁFEGO RODOVIÁRIO E DO EXCESSO DE CARGA EM VEÍCULOS COMERCIAIS**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018. doi:10.11606/D.3.2018.tde-31102018-153636.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTE. **PESQUISA CNT RODOVIAS 2019**. Relatório Gerencial. 2019.
- DAMBRÓS FERNANDES, Wagner. **ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS DO BRASIL E O MÉTODO DA AASHTO**. PPGECC, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2016.
- DE BEER M., C. FISHER C., KANNEMEYER L. **TYRE-PAVEMENT INTERFACE CONTACT STRESSES ON FLEXIBLE PAVEMENTS – QUOVADIS?** In: 8th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa (CAPSA'04), ISBN Number: 1-920-01718-6 Sun City, South Africa, set., 2004.

DE BEER M., SADZIK E. M., FISHER C., COETZEE C. H. **TYRE-PAVEMENT CONTACT STRESS PATTERNS FROM THE TEST TYRES OF THE GAUTRANS HEAVY VEHICLE SIMULATOR (HVS) MK IV+**. In: 24 th Southern African Transport Conference (SATC 2005) ISBN Number: 1-920-01712-7, Pretoria, South Africa, jul, 2005.

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. **MANUAL DE PAVIMENTAÇÃO**. 3.ed. – Rio de Janeiro, 2006.

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. **MANUAL DE RESTAURAÇÃO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS - 2. ed.** Rio de Janeiro, 2005.

DOS SANTOS, A. G.; DE ASSIS, R. K. M.; FERNANDES JÚNIOR, J. L. Efeito da aderência entre camadas na previsão de desempenho de pavimentos asfálticos. **TRANSPORTES**, [S. l.], v. 27, n. 2, p. 89–101, 2019.

ELSEIFI M. A, AL-QADI I. L., YOO P. J., JANAJREH I. **QUANTIFICATION OF PAVEMENT DAMAGE CAUSED BY DUAL AND WIDE-BASE TIRES**. In: Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1940, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., pp. 125–135, 2005.

FERNANDO, Emmanuel G.; MUSANI, Dilip; PARK, Dae-Wook; LIU, Wenting. Determine **EFFECTS OF TIRE SIZE AND INFLATION PRESSURE ON TIRE CONTACT PRESSURE AND PRIMARY PAVEMENT RESPONSES TO LOADING**. Report Date: June 2006; Texas Transportation Institute, College Station, TX, United States.

FERNANDES JÚNIOR, José Leomar. **Investigação dos efeitos das solicitações do tráfego sobre o desempenho de pavimentos**. 1994. Tese (Doutorado em Transportes) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1995. doi:10.11606/T.18.2018.tde-09042018-102257.

FONTENELE, Heliana Barbosa. **REPRESENTAÇÃO DO TRÁFEGO DE VEÍCULOS RODOVIÁRIOS DE CARGA ATRAVÉS DE ESPECTROS DE CARGA POR EIXO E SEU EFEITO NO DESEMPENHO DE PAVIMENTOS**. Tese (Doutorado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes), Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

FRANCO, F.A.C.P., **MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO MECANÍSTICO-EMPÍRICO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS – SISPAV**. Tese de D.Sc. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2007.

GETACHEW, M.D. **FINITE ELEMENT ANALYSIS OF PERMANENT DEFORMATION AND RESPONSES UNDER DIFFERENT VEHICULAR LOAD SPEEDS**. Addis Abba, 2020.

HADI, M. A. S.; AL-SHERRAWI, M. H. **THE INFLUENCE OF BASE LAYER THICKNESS IN FLEXIBLE PAVEMENTS**. Engineering, Technology & Applied Science Research, Greece, v. 11, n. 6, p. 7904–7909, 2021.

HANSEN, R.W.; BERTRAND, C.; MARSHEK, K.M.; HUDSON, W.R. **TRUCK TIRE PAVEMENT CONTACT PRESSURE DISTRIBUTION CHARACTERISTICS FOR SUPER SINGLE 18-22.5 AND SMOOTH 11R224.5 TIRES**. Texas State Department of Highways and Public Transportation. University of Texas at Austin. Austin, Texas. July 1989.

HUANG, Y. H. **PAVEMENT ANALYSIS AND DESIGN**. Second Edition. Pearson Education, 2004.

KERN, Camila. **ANÁLISE DE TENSÕES CISALHANTES EM PAVIMENTOS ASFÁLTICOS NA INCIDÊNCIA DE TRINCAMENTO TOP-DOWN**. Trabalho de Conclusão de Curso. UNISC. Santa Cruz do Sul, RS, 2014.

KLAMT, R. A.; SPECHT, L. P.; BUDNY, J.; KNIERIM, L. da S. A INFLUÊNCIA DA SOBRECARGA NOS PAVIMENTOS E A IMPORTÂNCIA DA FISCALIZAÇÃO DE PESAGEM VEICULAR NAS RODOVIAS BRASILEIRAS. *Revista CIATEC-UPF, [S. l.]*, v. 9, n. 2, p. 52-65, 2017. DOI: 10.5335/ciatec.v9i2.7569.

MATOS, Gisnári de Fátima Alves **ESTUDO DO TRINCAMENTO TIPO TOP DOWN EM PAVIMENTOS FLEXÍVEIS**. PPGMM / UNIJUÍ. Ijuí, RS, 2011.

MATTOS, João Rodrigo Guerreiro. **MONITORAMENTO E ANÁLISE DE DESEMPENHO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS DA AMPLIAÇÃO DA RODOVIA BR – 290 / RS – A IMPLANTAÇÃO DO PROJETO REDE TEMÁTICA DE ASFALTO NO RIO GRANDE DO SUL**. Tese de doutorado. PPGECC / UFRGS. Porto Alegre, RS, 2014

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. **MECÂNICA DOS PAVIMENTOS**. 3ª Ed. Editora Interciência. Rio de Janeiro, RJ, 2015.

Ministério da Infraestrutura/Conselho Nacional de Trânsito. **RESOLUÇÃO CONTRAN Nº 882, DE 13 DE DEZEMBRO DE 2021**. Diário Oficial da União Publicado em: 24/12/2021. Edição: 242. Seção: 1. Página: 153. Brasil

NÚÑEZ, W. P.; CERATTI, J. A. P.; PINTO, P. R. R. **AFINAL PORQUE PAVIMENTOS NOVOS ESTÃO ROMPENDO PRECOCAMENTE? UM ESTUDO SOBRE CAUSAS DE DEGRADAÇÕES PREMATURAS NA SUPERFÍCIE DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS**. PPGECC / Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS, 2011.

PACHECO, Lysiane Menezes. **ANÁLISE PARAMÉTRICA DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE MISTURAS ASFÁLTICAS**. PPGECC. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

RÉUS, T. F.; DA SILVA JÚNIOR, C. A. P.; FONTENELE, H. B. Análise empírico-mecânica do efeito do excesso de carga veículos comerciais. (DOI: 10.5216/reec.v9i2.29489). **REEC - Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, Goiânia, v. 9, n. 2, 2014. DOI: 10.5216/reec.v9i2.29489

S&T. Ministério dos Transportes. Agência Nacional de Transportes Terrestres; Triunfo; Concepa. **ANÁLISE DOS EFEITOS DE EXCESSOS DE CARGAS E DE ALTERAÇÕES NA COMPOSIÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS NO**

**DESEMPENHO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS TÍPICOS DA REGIÃO SUL DO PAÍS: RELATÓRIO FINAL. 2012.**

SU, K.; SUN, L.; HACHIYA, Y.; MAEKAWA, R. **ANALYSIS OF SHEAR STRESS IN ASPHALT PAVEMENTS UNDER ACTUAL MEASURED TIRE-PAVEMENT CONTACT PRESSURE.** In: ICPT, 6, 2008. Sapporo, Japan, 2008.

UHLMEYER, Jeff & WILLOUGHBY, Kim & PIERCE, Linda & MAHONEY, Joe. (2000). **TOP-DOWN CRACKING IN WASHINGTON STATE ASPHALT CONCRETE WEARING COURSES.** Transportation Research Record. 1730. 110-116. 10.3141/1730-13.

VALE, Aline; PAIS, J.C. **O TIPO DE MODELAÇÃO DOS PNEUS DOS VEÍCULOS PESADOS NA AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DOS PAVIMENTOS.** Anais do XVI CILA – Congresso Ibero-Latinoamericano do Asfalto. Rio de Janeiro, Brasil, 2011.

WANG, G.; ROQUE, R.; MORIAN, D. **EFFECTS OF SURFACE RUTTING ON NEAR-SURFACE PAVEMENT RESPONSES BASED ON A TWO-DIMENSIONAL AXLE-TIRE-PAVEMENT INTERACTION FINITE ELEMENT MODEL.** Journal of Materials in Civil Engineering, n. 24, 1388-1395, Nov. 2012.

WANG, L. B.; MYERS, L. A.; MOHAMMAD, L. N.; FU, Y. R. **A MICROMECHANICS STUDY ON TOP-DOWN CRACKING.** Transportation Research Board Annual Meeting, Washington, DC, n. 82, 2003.

# Revest. 5cm; ESRD; 27.6 kN; 104 psi

## 1. Overview

*This report was generated by user Victor Bortolon on 2023-06-07 15:51:05 Hora oficial do Brasil from output database file C:/Users/vtodb/OneDrive/Área de Trabalho/5\_esrd\_limit.odb.*

The information included in this report reflects the options selected in the HTML Report Generator plug-in when the report was generated. Therefore, the report does not necessarily include all of the model and results data available in the output database (.odb) file. In addition, this report may include information in 3D XML format; to view the 3D XML content properly, you must use Internet Explorer as your browser.

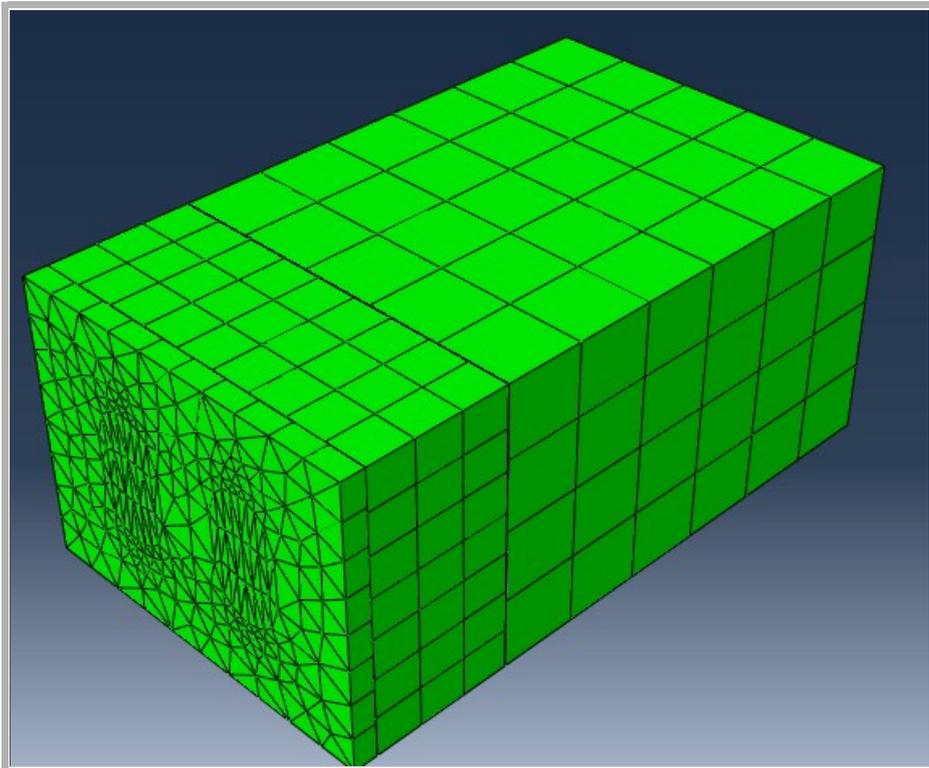
You can distribute this report by copying all of the files listed in the [File Summary](#).

This report is organized into sections that match the organization of modules in Abaqus/CAE:

### Table of Contents

- [Assembly Information](#)
- [Material Information](#)
- [Results](#)
- [File Summary](#)

### Basic Model Information



User's name	Victor Bortolon
Output database	C:/Users/vtodb/OneDrive/Área de Trabalho/5_esrd_limit.odb
Time created	Wed Jun 07 15:38:12 Hora oficial do Brasil 2023
Solver	Abaqus/Standard Learning Edition 2022
Precision	SINGLE_PRECISION

Work directory C:/Users/vtodb/OneDrive/Área de Trabalho  
HTML directory C:/Users/vtodb/OneDrive/Área de Trabalho/htmlReport  
Image directory C:/Users/vtodb/OneDrive/Área de Trabalho/htmlReport/images

---

## 2. Assembly Information

This section includes the following information about the part instances in the assembly:

- [Instance Table](#)
- [3DXML for Instances in the Model](#)
- [Figures Containing All Instances](#)

**Table 2.1 Instance Table**

Instance Name	Color	# Elements	# Nodes	Element type (# elements)
REVESTIMENTO5-1		432	470	<a href="#">C3D6 : (432),</a>
SUBLEITO-1		120	210	<a href="#">C3D8R : (120),</a>
BASE-1		189	320	<a href="#">C3D8R : (189),</a>

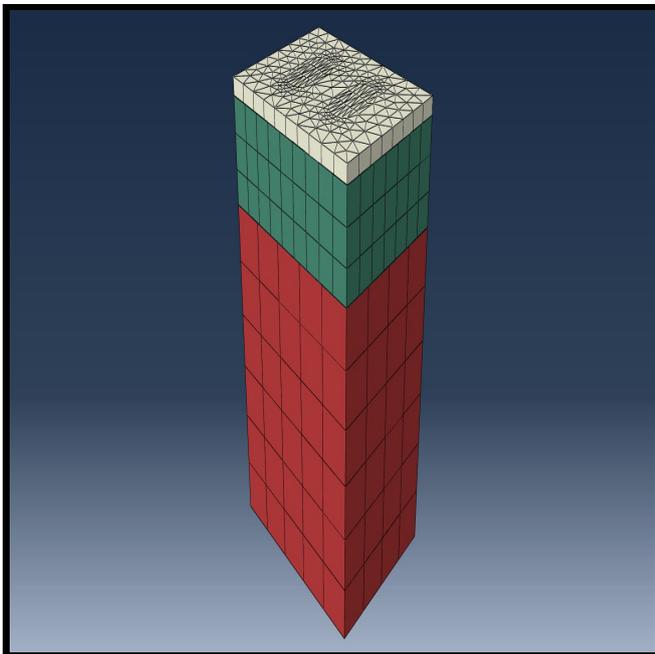
[^ back](#)

### 3DXML for Instances in the Model

**Note:** The "artificial ground" in the 3DXML is a visual artifact and not part of the model

[^ back](#)

### Figures Containing All Instances



**Figure 2.1 Figures Containing All Instances User-1 view**

[^ back](#)

### Element Details

- **C3D6** : 6-node linear triangular prism
- **C3D8R** : 8-node linear brick, reduced integration, hourglass control

[^ Back to Table of Contents](#)

---

## 3. Material Information

This section includes figures that display the material information in the model. The default view orientations are provided, along with any user-defined views requested, and these figures are color coded according to the material definitions. A key to material definitions and their corresponding colors is provided after the figures. Hyperelastic material properties are included in the figures, if they are available.

- [Material Color Table](#)
- [Elastic Behaviour](#)
- [3DXML for material data](#)
- [Figures Containing Material Information](#)

**Table 3.1 Material Color Table**

Material	Color
REVESTIMENTO	
BASE	
SUBLEITO	

**Table 3.2 Elastic Behaviour**

Material	dependencies	moduli	noCompression	noTension	temperatureDependency	type
REVESTIMENTO	0	LONG_TERM	OFF	OFF	OFF	ISOTROPIC
BASE	0	LONG_TERM	OFF	OFF	OFF	ISOTROPIC
SUBLEITO	0	LONG_TERM	OFF	OFF	OFF	ISOTROPIC

[^ back](#)

**Table 3.3 Elastic Table**

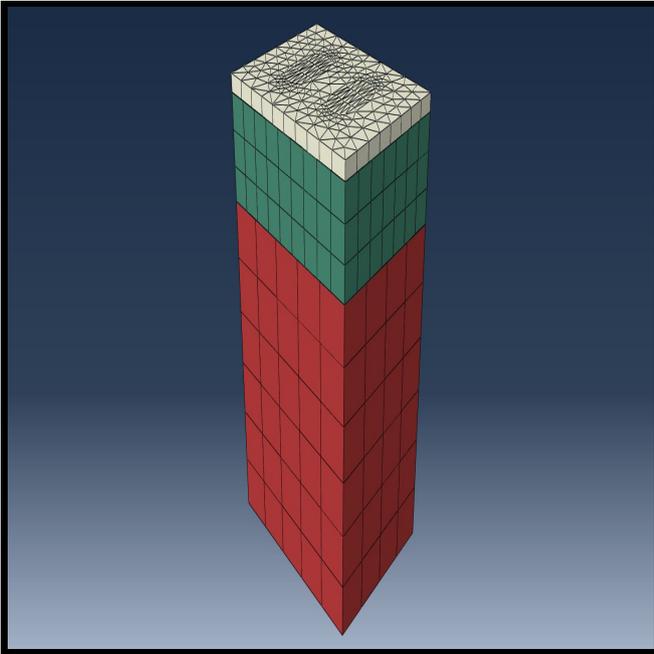
Material	Young's modulus	Poisson's ratio	Temp
REVESTIMENTO	3000.0	0.3	
BASE	300.0	0.4	
SUBLEITO	150.0	0.45	

[^ back](#)

### 3DXML for material data in the model

**Note: The "artificial ground" in the 3DXML is a visual artifact and not part of the model**

### Figures Containing Material Information



**Figure 3.1 Figures Containing Material Information User-1 view**

[^ back](#)

[Back to Table of Contents ^ back](#)

---

## 4. Results

This section displays results data requested from the output database file, including the maximum and minimum values for selected output variables. This section also includes any X-Y plots saved to the output database and requested for inclusion in the report.

- [E33 results step = Load increment = 1](#)
- [E13 results step = Load increment = 1](#)
- [E23 results step = Load increment = 1](#)
- [S33 results step = Load increment = 1](#)
- [S13 results step = Load increment = 1](#)
- [S23 results step = Load increment = 1](#)
- [U3 results step = Load increment = 1](#)
- [E Max. Principal results step = Load increment = 1](#)
- [S Mises results step = Load increment = 1](#)
- [S Max. Principal results step = Load increment = 1](#)
- [U Magnitude results step = Load increment = 1](#)

### 3DXML for E33 results

**Note: The "artificial ground" in the 3DXML is a visual artifact and not part of the model**

[^ back](#)

**Figures Containing E33 Results step= Load increment= 1**

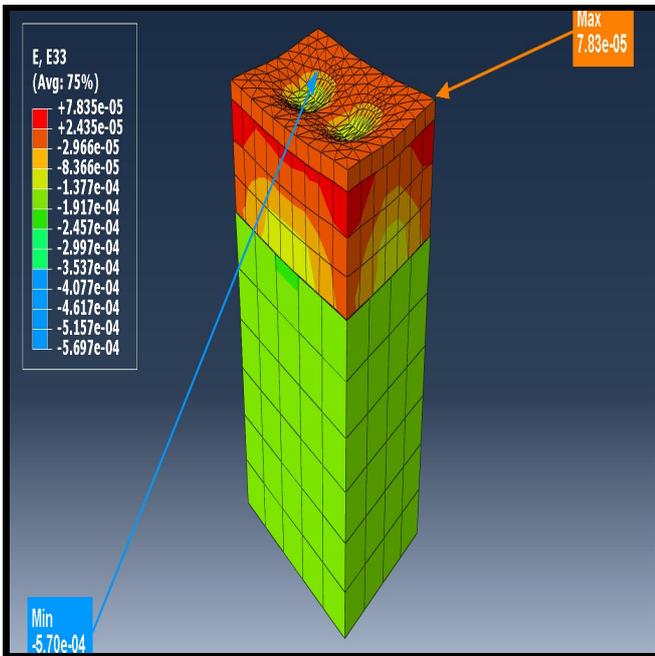


Figure 4.1 Figures Containing E33 Results User-1 view

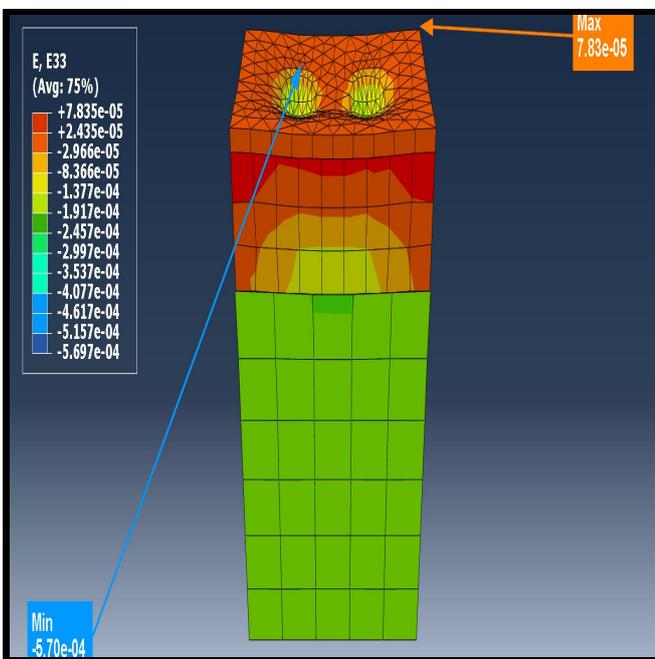


Figure 4.2 Figures Containing E33 Results User-2 view

[^ back](#)

### 3DXML for E13 results

**Note: The "artificial ground" in the 3DXML is a visual artifact and not part of the model**

[^ back](#)

Figures Containing E13 Results step= Load increment= 1

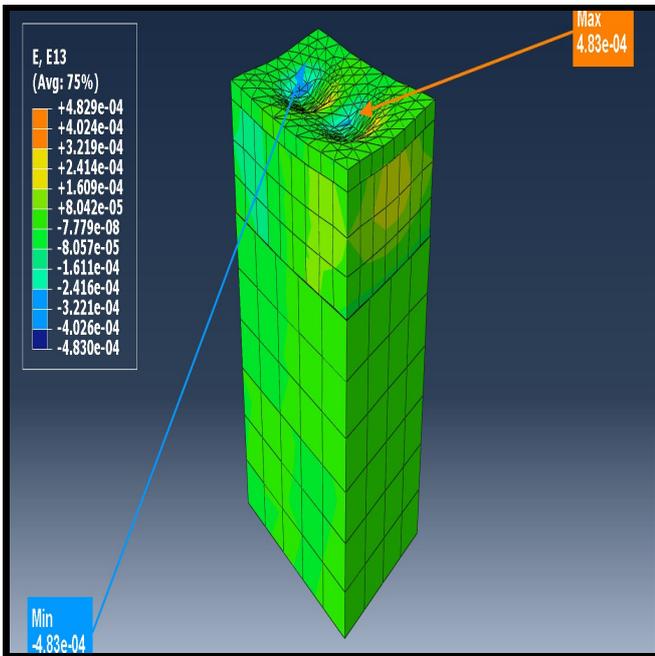


Figure 4.3 Figures Containing E13 Results User-1 view

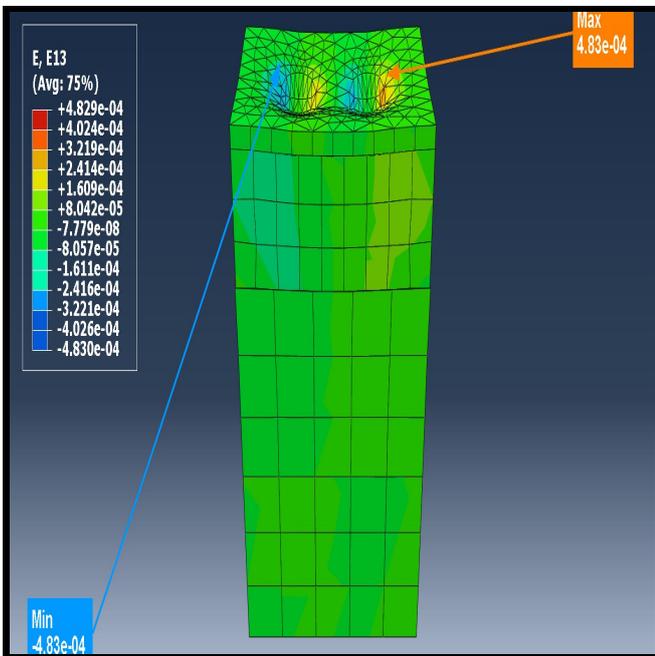


Figure 4.4 Figures Containing E13 Results User-2 view

[^ back](#)

### 3DXML for E23 results

**Note: The "artificial ground" in the 3DXML is a visual artifact and not part of the model**

[^ back](#)

Figures Containing E23 Results step= Load increment= 1

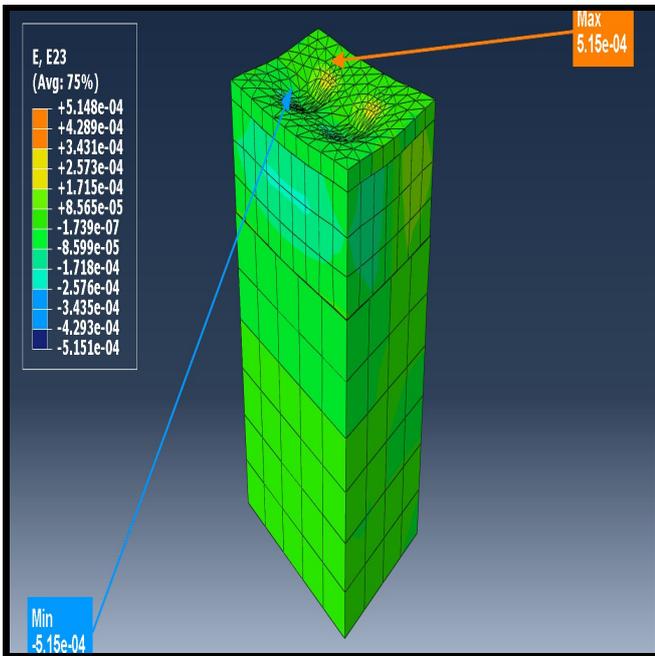


Figure 4.5 Figures Containing E23 Results User-1 view

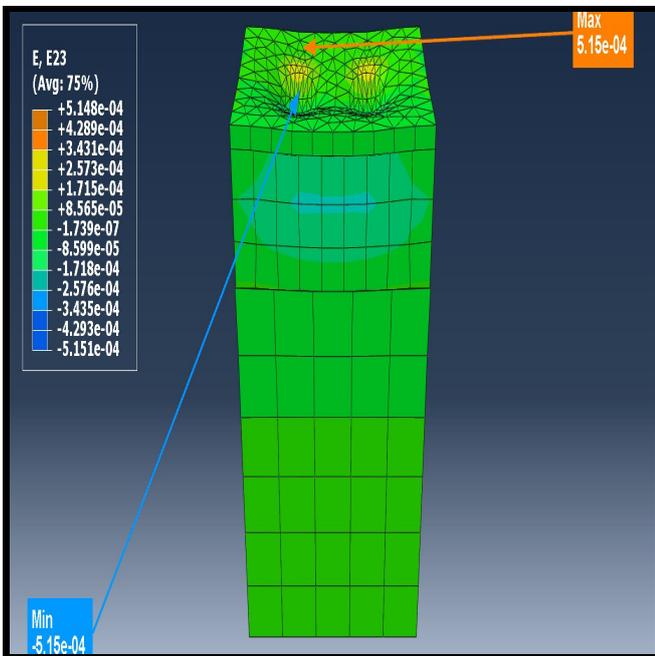


Figure 4.6 Figures Containing E23 Results User-2 view

[^ back](#)

### 3DXML for S33 results

**Note: The "artificial ground" in the 3DXML is a visual artifact and not part of the model**

[^ back](#)

Figures Containing S33 Results step= Load increment= 1

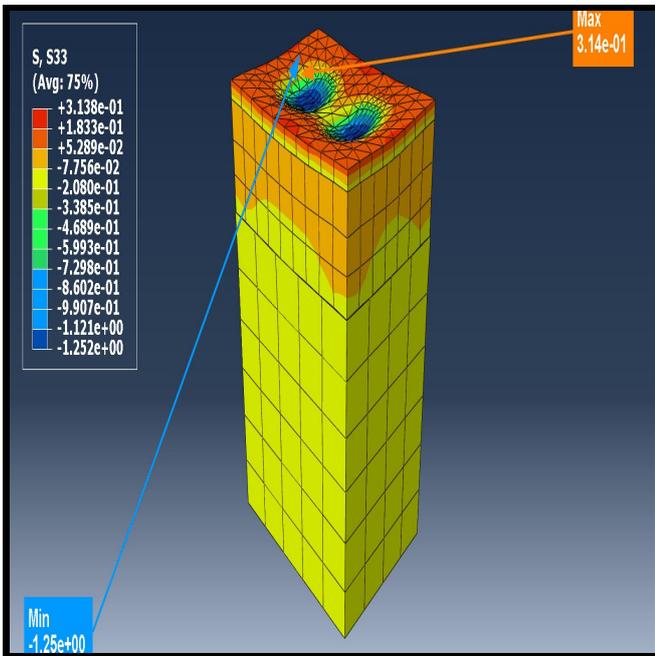


Figure 4.7 Figures Containing S33 Results User-1 view

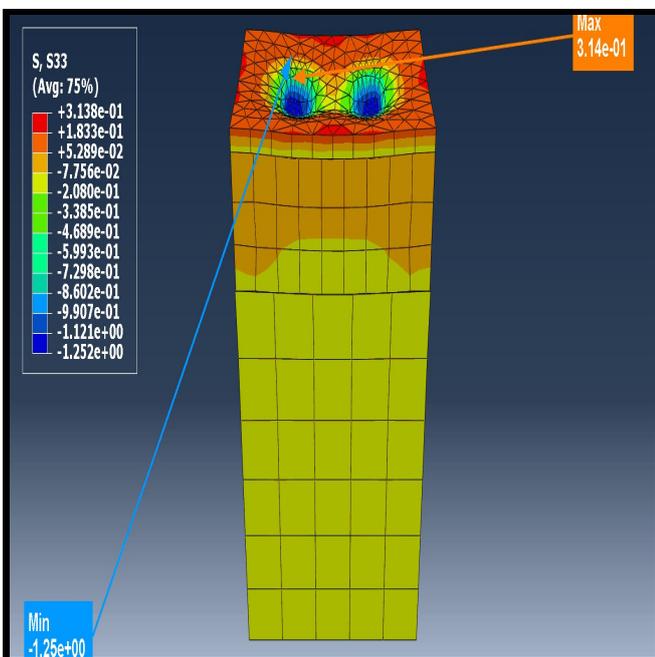


Figure 4.8 Figures Containing S33 Results User-2 view

[^ back](#)

### 3DXML for S13 results

**Note: The "artificial ground" in the 3DXML is a visual artifact and not part of the model**

[^ back](#)

Figures Containing S13 Results step= Load increment= 1

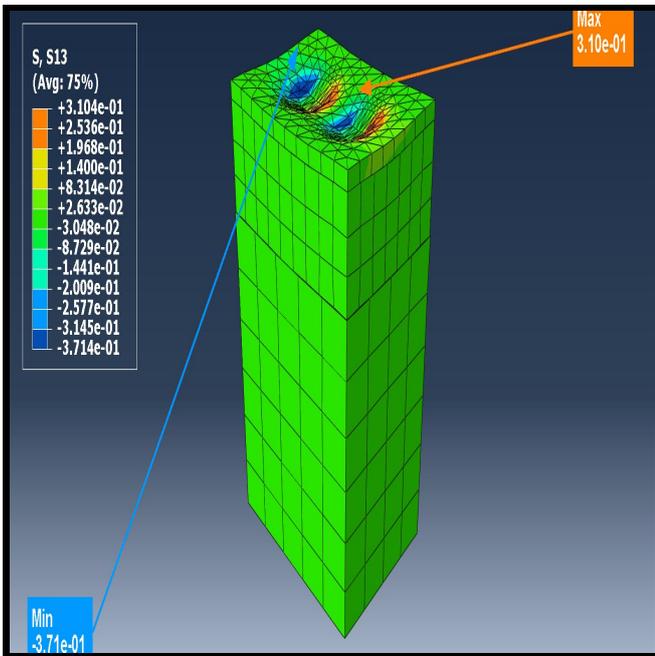


Figure 4.9 Figures Containing S13 Results User-1 view

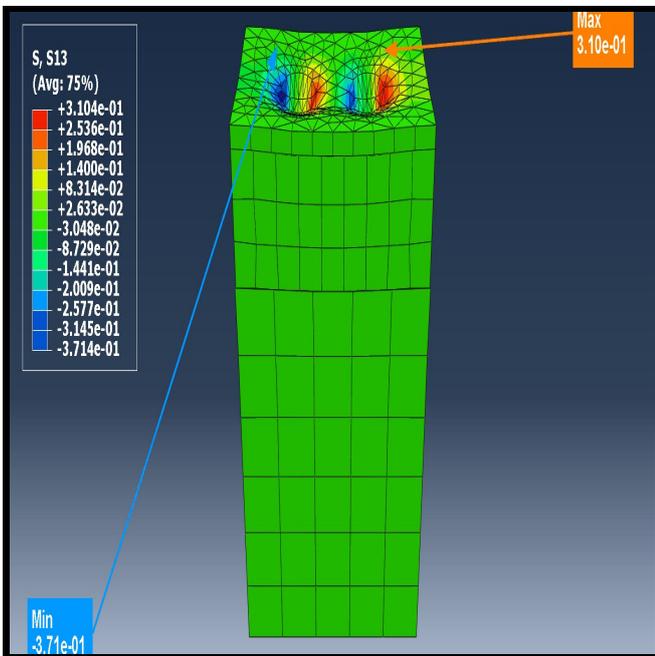


Figure 4.10 Figures Containing S13 Results User-2 view

[^ back](#)

3DXML for S23 results

Note: The "artificial ground" in the 3DXML is a visual artifact and not part of the model

[^ back](#)

Figures Containing S23 Results step= Load increment= 1

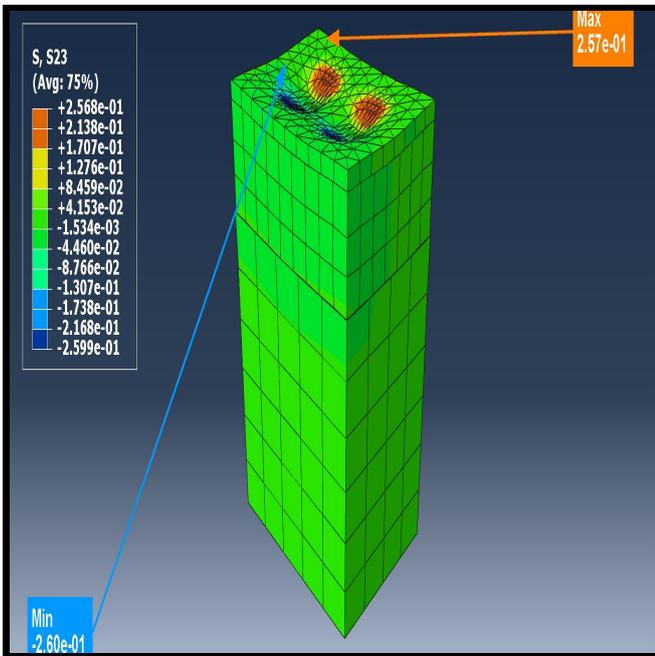


Figure 4.11 Figures Containing S23 Results User-1 view

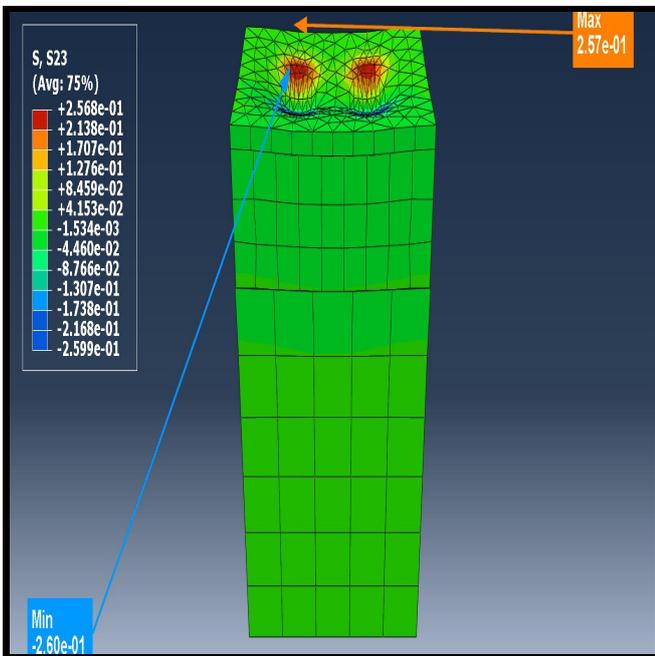


Figure 4.12 Figures Containing S23 Results User-2 view

[^ back](#)

### 3DXML for U3 results

**Note: The "artificial ground" in the 3DXML is a visual artifact and not part of the model**

[^ back](#)

**Figures Containing U3 Results step= Load increment= 1**

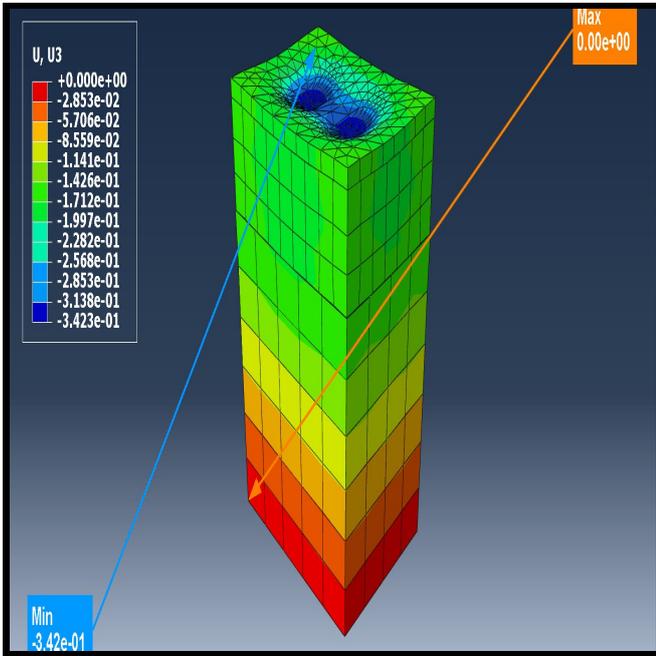


Figure 4.13 Figures Containing U3 Results User-1 view

[^ back](#)

### 3DXML for E Max. Principal results

Note: The "artificial ground" in the 3DXML is a visual artifact and not part of the model

[^ back](#)

Figures containing E Max\_principal Results step=Load increment=1

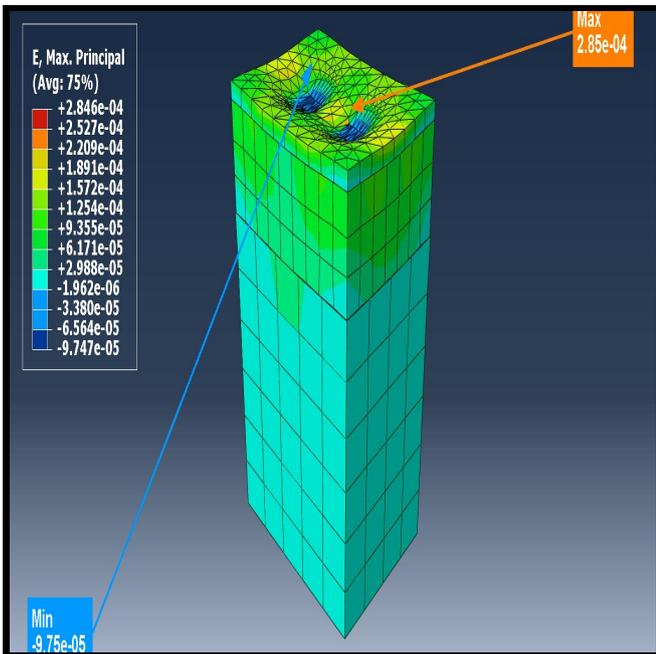


Figure 4.14 Figures containing E Max\_principal Results User-1 view

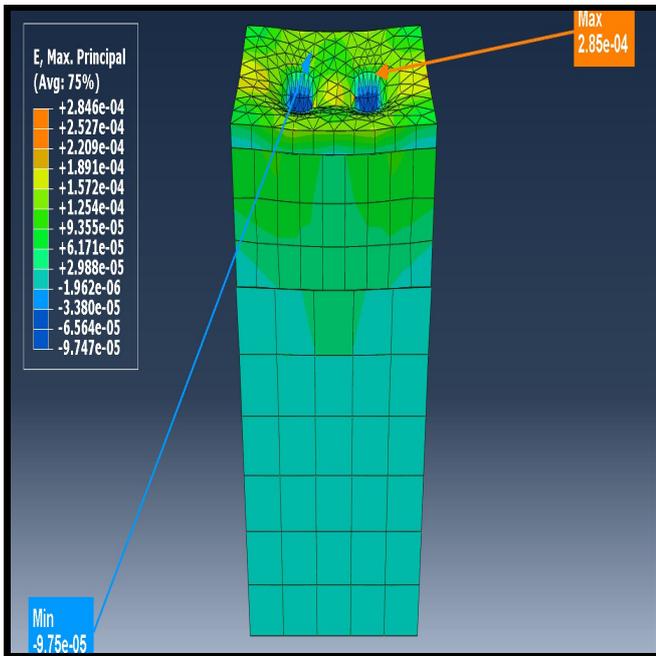


Figure 4.15 Figures containing E Max\_principal Results  
User-2 view

[^ back](#)

### 3DXML for S Mises results

Note: The "artificial ground" in the 3DXML is a visual artifact and not part of the model

[^ back](#)

Figures containing S Mises Results step=Load increment=1

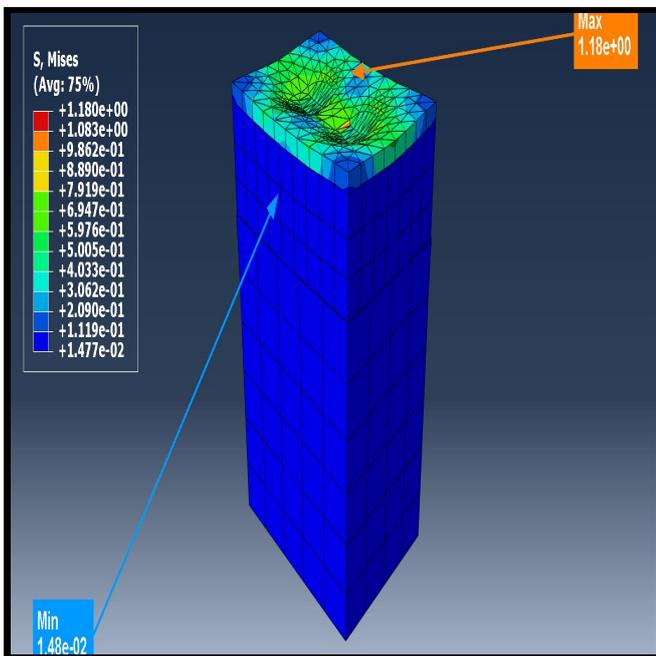


Figure 4.16 Figures containing S Mises Results User-1 view

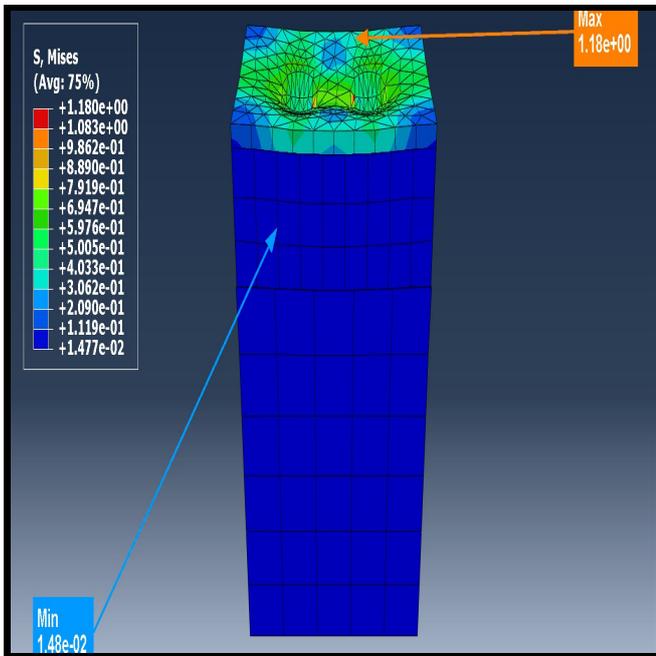


Figure 4.17 Figures containing S Mises Results User-2 view

[^ back](#)

### 3DXML for S Max. Principal results

Note: The "artificial ground" in the 3DXML is a visual artifact and not part of the model

[^ back](#)

Figures containing S Max\_principal Results step=Load increment=1

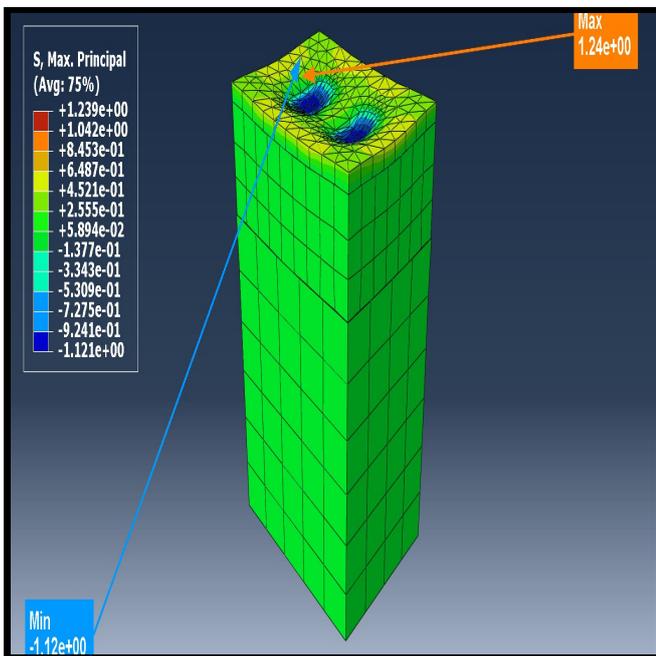


Figure 4.18 Figures containing S Max\_principal Results User-1 view

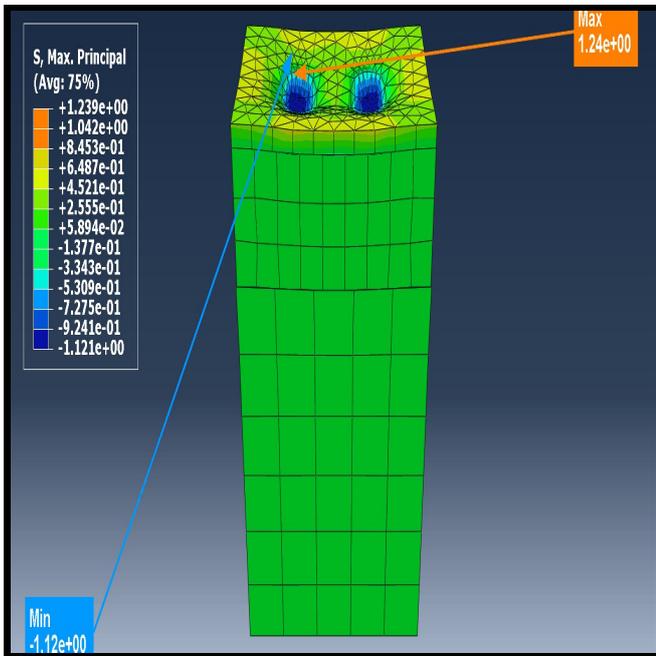


Figure 4.19 Figures containing S Max\_principal Results  
User-2 view

[^ back](#)

### 3DXML for U Magnitude results

Note: The "artificial ground" in the 3DXML is a visual artifact and not part of the model

[^ back](#)

Figures containing U Magnitude Results step=Load  
increment=1

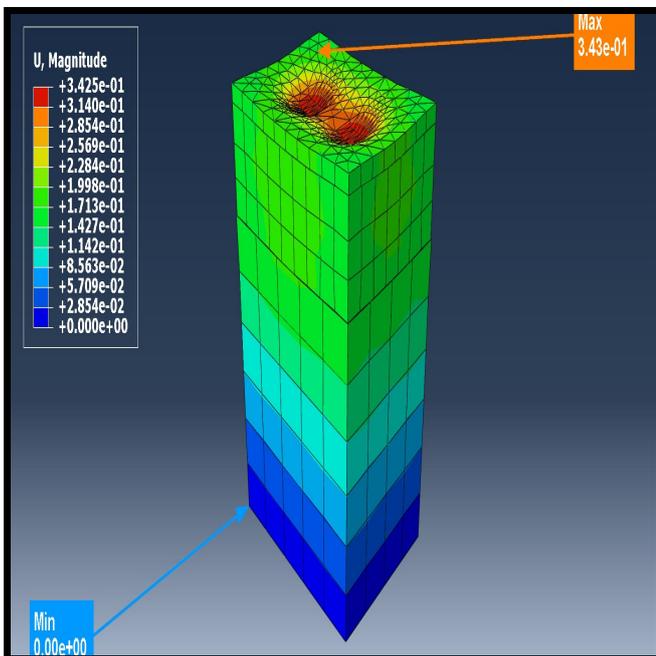


Figure 4.20 Figures containing U Magnitude Results User-1  
view

[^ back](#)

[Back to Table of Contents](#)

## 5. File Summary

To transfer this report, following files and directories must be copied:

- htmlReport\image

- `htmlReport\additionalImages`
- `htmlReport\additionalFiles`
- `htmlReport\abaqus.css`
- `htmlReport\htmlReport.html`

[Back to Table of Contents](#)

---

