

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**LORENA FUJITA RIBEIRO MAIA**

**ANÁLISE MECANÍSTICA DE UM PAVIMENTO DE CONCRETO UTILIZANDO  
ELEMENTOS FINITOS**

**GUARAPUAVA**

**2022**

**LORENA FUJITA RIBEIRO MAIA**

**ANÁLISE MECANÍSTICA DE UM PAVIMENTO DE CONCRETO UTILIZANDO  
ELEMENTOS FINITOS**

**Mechanistic analysis of a concrete floor using finite elements**

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

Orientador: Prof. Dr.Gustavo De Miranda Saleme  
Gidrão.

**GUARAPUAVA**

**2022**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

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.

**LORENA FUJITA RIBEIRO MAIA**

**ANÁLISE MECANÍSTICA DE UM PAVIMENTO DE CONCRETO UTILIZANDO  
ELEMENTOS FINITOS**

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

Data de aprovação: 15 de dezembro de 2022

---

Gustavo de Miranda Saleme Gidrão  
Doutorado em Engenharia Civil  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná-Câmpus Guarapuava

---

Diego de Oliveira Martins  
Doutorado em Engenharia Civil  
Universidade Federal de Uberlândia

---

Rubia Mara Bosse  
Doutorada em Engenharia Civil  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná-Câmpus Guarapuava

**GUARAPUAVA**

**2022**

Dedico este trabalho à minha família Dely, Elizete e João Antônio, que me deram carinho, apoio, e todo o suporte para eu terminar essa caminhada.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, primeiramente, que me deu força e sabedoria para conseguir concluir essa etapa.

Aos meus pais, Dely e Elizete, que sempre me deram força e apoio em minhas decisões, além de sempre contribuírem para o meu crescimento, sem os quais a tarefa teria sido muito mais árdua.

Ao meu irmão João Antônio e a minha cunhada Andressa, por terem me ajudado a vencer os desafios para concretizar esse sonho.

À minha avó, Tereza, por toda preocupação, e todo carinho.

Ao meu orientador Prof. Dr. Gustavo de Miranda Saleme Gidrão, por todo o suporte técnico, paciência durante a execução do trabalho e toda a sabedoria compartilhada.

À todos os professores do curso pela paciência, pela dedicação e por compartilhar a sabedoria com os alunos.

Agradeço ao Bruno Oliveira, pela paciência, pelo apoio e cuidado nos momentos de ansiedade e estresse.

Aos meus amigos, Maria Laura Rivani, Marcela Souza, Matheus Lacerda, Breendown Ferreira, Gustavo Albano, Lais Tussi, Dionatan José, Carlos Eduardo, Otávio Hoffman, Leonardo Torres, obrigada por todos os conselhos úteis, bem como as palavras motivacionais e os puxões de orelha. As risadas que compartilhei durante esse momento difícil na faculdade, também me ajudaram a passar mais rápido esses cinco anos.

À Edie e Ademar pela hospedagem em sua kitnet, e por todo cuidado e preocupação.

Ao Eliel Reis, Juliana Lacerda, Cleiton Domingues e todos da empresa Alcoa pela oportunidade de estágio e por todos os conselhos, ensinamentos, confiança e lições que levarei para vida.

Por fim, agradeço a todos que, direta ou indiretamente, fizeram parte da minha formação: muito obrigada.

“As nuvens mudam sempre de posição, mas são sempre nuvens no céu. Assim devemos ser todos os dias, mutantes, porém leais com o que pensamos e sonhamos; lembre-se, tudo se desmancha no ar, menos os pensamentos”.

(Paulo Beleki)

## RESUMO

Os pavimentos rígidos são basicamente grandes placas de concreto, unidas por barras de transferência e juntas por dilatação, sendo frequentemente empregados em situações em que se observa alto fluxo, como por exemplo a Rodovia dos Bandeirantes (SP), via Anchieta (SP) e a BR 285. Embora esta seja uma solução altamente durável em rodovias, sabe-se que ela não é vantajosa no caso específico de pistas de corrida (*Runways*) de aeroportos, pois as juntas de dilatação causam desconforto nos processos de corrida e aterrissagem. No entanto, para regimes de cargas quase estáticas, observa-se a ampla utilização desta solução, como é o caso de hangares e pátios de aeroportos, onde as aeronaves ficam por longos períodos estacionadas em pontos pré-estabelecidos. Nestes casos, os pavimentos rígidos apresentam maior durabilidade em comparação aos pavimentos asfálticos. Portanto, o presente trabalho realiza a modelagem mecânica computacional de pavimentos rígidos de concreto utilizando o *software* de elementos finitos comerciais *Abaqus CAE*. O regime de carga será o estático, similar à situação de um pavimento de concreto solicitado por uma aeronave estacionada em um pátio ou em um hangar. No início, realiza-se a simulação numérica do pavimento considerando os materiais elásticos lineares (i.e., obedecendo a lei de Hooke). Posteriormente, o modelo de *Concrete Damage Plasticity*, implementado no *ABAQUS*, será utilizado para descrever o comportamento não linear do concreto. Este modelo representará os dois mecanismos de falha do material, i.e.: tração por abertura de fissuras e compressão por esmagamento. Aplicar materiais alternativos, como por exemplo o concreto de ultra-alto desempenho reforçado por fibras (UHPC). Após esta modelagem, por fim, são identificados os possíveis pontos de danificação do pavimento, o que possibilita o aumento da segurança estrutural deste tipo de componente tão caro aos aeroportos.

**Palavras-chave:** Concreto. UHPC. Pavimentos. Simulação numérica.

## ABSTRACT

Rigid pavements are basically large concrete slabs, joined by transfer bars and expansion joints, and are often used in situations where there is high flow, such as on Rodovia dos Bandeirantes (SP), via Anchieta (SP) and the BR 285. Although this is a highly durable solution on highways, it is known that it is not advantageous in the specific case of airport Runways, as the expansion joints cause discomfort in the running and landing processes. However, for quasi-static load regimes, this solution is widely used, as is the case of hangars and airport aprons, where aircraft are parked for long periods at pre-established points. In these cases, rigid pavements have greater durability compared to asphalt pavements. Therefore, the present work performs the computational mechanical modeling of rigid concrete pavements using the commercial finite element software Abaqus CAE. The load regime will be static, similar to the situation of a concrete pavement applied by an aircraft parked in a courtyard or in a hangar. At the beginning, a numerical simulation of the pavement is carried out considering the linear elastic materials (i.e., obeying Hooke's law). Subsequently, the Concrete Damage Plasticity model, implemented in ABAQUS, will be used to describe the non-linear behavior of concrete. This model will represent the two material failure mechanisms, i.e.: tension by crack opening and compression by crushing. Apply alternative materials, such as ultra-high-performance fiber reinforced concrete (UHPC). After this modeling, finally, the possible points of damage to the pavement are identified, which makes it possible to increase the structural safety of this type of component so expensive at airports.

**Keywords:** Concrete. UHPC. Pavements. Numerical simulation.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Estrutura do pavimento rígido .....	16
Figura 2: Trincas Longitudinais .....	17
Figura 3: Ocorrência de erosão.....	19
Figura 4: Comportamento de Tração .....	26
Figura 5: Comportamento de Compressão .....	26
Figura 6: Círculo de Mohr.....	31
Figura 7: Lei constitutiva analítica .....	33
Figura 8: Modelagem da estrutura .....	38
Figura 9: Modelo das seções estudadas.....	39
Figura 10: Carga sendo aplicada sob o pavimento .....	40
Figura 11: Restrições de movimento .....	41
Figura 12: Criação da malha .....	42
Figura 13: Deformação Plástica .....	50
Figura 14: Dano à Tração.....	51
Figura 15: Deformação Plástica .....	51
Figura 16: Dano à Tração .....	52
Figura 17: Deformação Plástica .....	53
Figura 18: Dano à Tração.....	53
Figura 19: Deformação plástica.....	54
Figura 20: Dano à Tração.....	54
Figura 21: Deformação Plástica .....	55
Figura 22: Dano à Tração.....	56
Figura 23: Deformação Plástica .....	56
Figura 24: Dano à Tração.....	57
Figura 25: Deformação Plástica .....	58
Figura 26: Dano à Tração.....	58
Figura 27: Deformação Plástica .....	59
Figura 28: Dano à Tração.....	59
Figura 29: Análise na deformação Plástica .....	60
Figura 30: Análise no Dano à Tração .....	60
Figura 31: Análise na deformação plástica .....	61
Figura 32: Análise no Dano à Tração.....	61

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Propriedades Mecânicas Típicas do UHPFR .....	24
Tabela 2: Índices de durabilidade do UHPFRC .....	24
Tabela 3: Parâmetros de Plasticidade .....	30
Tabela 4: Identificação dos pavimentos .....	37
Tabela 5: Parâmetros de elasticidade .....	43
Tabela 6: Parâmetros Mohr Coulomb Plasticity .....	43
Tabela 7: Resumo das propriedades de leis constitutivas do UHPFRC .....	44
Tabela 8: Resumo das propriedades de leis constitutiva do C25 .....	45
Tabela 9: Força máxima aplicada e deslocamento de pico .....	47

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
NBR	Normas Brasileiras
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
CDP	Concrete Damaged Plascity
CRF	Resistencia à fadiga
LVDT	Transdutores de deslocamento variável linear
RT	Relação entre tensão
UHPFRC	Concreto de Ultra-alto desempenho reforçado por fibras

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
<b>1.1</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>15</b>
1.1.1	Objetivo geral .....	15
1.1.2	Objetivos específicos.....	15
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>16</b>
<b>2.1</b>	<b>Estrutura do pavimento</b> .....	<b>16</b>
<b>2.2</b>	<b>Mecânica dos pavimentos</b> .....	<b>17</b>
<b>2.3</b>	<b>Análise estrutural</b> .....	<b>21</b>
<b>2.4</b>	<b>Característica do concreto de UHPFRC</b> .....	<b>22</b>
2.4.1	Propriedades Mecânicas do UHPFRC .....	23
2.4.2	Durabilidade .....	24
<b>2.5</b>	<b>Característica não linear do concreto aplicado ao modelo <i>Concrete Damaged plasticity (CDP)</i></b> .....	<b>25</b>
<b>2.6</b>	<b>Mohr Coulomb</b> .....	<b>30</b>
<b>3</b>	<b>MODELO CONSTITUTIVO</b> .....	<b>33</b>
<b>3.1</b>	<b>Modelo constitutivo de tração</b> .....	<b>33</b>
<b>3.2</b>	<b>Modelo constitutivo de compressão</b> .....	<b>34</b>
<b>3.3</b>	<b>Lei de dano</b> .....	<b>35</b>
<b>4</b>	<b>MODELOS ANALISADOS</b> .....	<b>36</b>
<b>5</b>	<b>MODELAGEM NUMÉRICA</b> .....	<b>37</b>
<b>5.1</b>	<b>Modelagem 3D</b> .....	<b>38</b>
<b>5.2</b>	<b>Geometria dos modelos</b> .....	<b>39</b>
<b>5.3</b>	<b>Condições de contorno e carregamento</b> .....	<b>40</b>
<b>5.4</b>	<b>Malhas</b> .....	<b>41</b>
<b>6</b>	<b>MODELOS CONSTITUTIVOS DOS MATERIAIS</b> .....	<b>42</b>
<b>6.1</b>	<b>Modelos constitutivos da brita, solo, solo reforçado e solo natural</b> <b>42</b>	
6.1.1	Brita e Solo natural aplicado mohr coulomb plasticity .....	43
<b>6.2</b>	<b>Modelo constitutivo para o concreto</b> .....	<b>43</b>
6.2.1	Parâmetros de entrada para leis constituintes .....	44
<b>6.3</b>	<b>Lei constitutiva e lei de dano na compressão</b> .....	<b>45</b>
<b>6.4</b>	<b>Lei constitutiva e lei de dano na tração</b> .....	<b>46</b>
<b>6.5</b>	<b>Considerações para simulação no Abaqus</b> .....	<b>46</b>

<b>7</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>46</b>
<b>7.1</b>	<b>Resultado numérico da simulação do ensaio.....</b>	<b>46</b>
<b>7.2</b>	<b>Resposta ao dano dos modelos numéricos .....</b>	<b>49</b>
7.2.1	Resposta ao dano nos pavimentos C25.....	50
7.2.1.1	Pavimento C25 (Sub-base não reforçada) - ESP50 e ESP300.....	50
7.2.1.2	Pavimento C25 (Sub-base reforçada) .....	52
7.2.2	Resposta ao dano nos pavimentos UHPFRC .....	55
7.2.2.1	Pavimento UHPFRC (Sub-base não reforçada).....	55
7.2.2.2	Pavimento UHPFRC (Sub-base reforçada)- ESP50 e ESP300 .....	57
7.2.3	Análise dos modelos numéricos ao dano entre C25 e UHPFRC .....	59
7.2.3.1	Pavimento C25 e UHPFRC com sub-base não reforçada.....	60
7.2.3.2	Pavimento C25 e UHPFRC com sub-base reforçada.....	61
<b>8</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>62</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Os pavimentos são classificados como flexíveis, rígidos e semi-rígidos, classificação que diz respeito à sua propriedade de deformabilidade ou à sua capacidade de acompanhar os deslocamentos do subleito. O termo pavimento flexível está diretamente associado ao pavimento com revestimento asfáltico, enquanto o termo pavimento rígido associa-se ao pavimento com revestimento de concreto (JORDANA, 2019).

Os pavimentos rígidos são basicamente grandes placas de concreto, unidas ou não por barras de transferência e juntas de dilatação. Este sistema construtivo tem sido empregado em grandes estradas, portos e aeroportos, onde se observa alta amplitude de cargas e de demandas, se destacando em alguns países como a China, Japão, Estados Unidos, Inglaterra e Alemanha (VIZZONI, 2022).

No Brasil, observa-se a implementação em pátios de aeroportos, portos, grandes estradas arteriais e em corredores de ônibus. São notórios nos exemplos da Rodovia dos Bandeirantes, localizada no estado de SP, BR - 285 e da Via Anchieta, nas quais os pavimentos de concreto foram utilizados a fim de aumentar a vida útil destas importantes obras de infraestrutura rodoviária. Outro exemplo importante é a pista de corrida (RWY) do Aeroporto do Galeão no Rio de Janeiro - RJ, no qual o sistema de placas de concreto protendido foi utilizado para eliminar as juntas de dilatação da pista que causam trepidação na corrida dos aviões (VIZZONI, 2022).

Especialmente no caso de hangares e pátios de aeroportos, onde se observam regimes de cargas quase estáticas, há a ampla utilização da solução de pavimentos de concreto de cimento portland, nos quais as aeronaves ficam por longos períodos estacionadas em pontos pré-estabelecidos. Nestes casos, os pavimentos rígidos apresentam maior durabilidade em comparação aos pavimentos asfálticos.

Segundo CREA-Paraná (2022), temos que o pavimento de concreto é, além das vantagens mecânicas supracitadas por ser uma escolha econômica, inteligente e sustentável, o que resulta em um ótimo investimento. Por apresentar grande durabilidade, e, com isso, exigir pouca manutenção e proporcionar redução de congestionamento nas vias, o pavimento de concreto melhora a visibilidade por reflexão de luz, e, ainda, gera uma economia na energia elétrica.

As ilhas de calor também são de grande impacto para a saúde da sociedade, pois auxiliam na redução de calor, devido às superfícies claras. Com isso, os lugares com altas temperaturas acabam optando por substituir o asfalto, que absorve e conserva calor, pelo concreto, pois a dissipação de calor é rápida (CREA-PARANÁ, 2022).

Diante do contexto supracitado, o presente trabalho realiza a modelagem computacional de pavimentos rígidos de concreto sob carregamento estático, considerando leis constitutivas não lineares para o solo e para o concreto. Para tanto, será utilizado o software de elementos finitos *Abaqus CAE*, disponível para a comunidade da UTFPR. O comportamento não linear será representado pela não linearidade física do *Concrete Damage Plasticity* (CDP), enquanto o solo será representado pelo modelo clássico de Mohr-Coulomb. Como modelo alternativo será utilizado o concreto de ultra-alto desempenho reforçado por fibras (UHPC). Como resultado destas modelagens, serão identificadas regiões críticas onde há acúmulo de deformações plásticas e/ou zonas de danificação, cujos dados resultantes, poderão auxiliar na avaliação da resistência de carga última do pavimento.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo geral

O objetivo principal do presente trabalho é analisar a resposta estrutural da relação que se estabelece entre força-deslocamento para um pavimento rígido de concreto simples, submetido a uma carga estática incremental, a partir do método dos elementos finitos utilizando do *software Abaqus*.

### 1.1.2 Objetivos específicos

De modo a alcançar o objetivo geral, são propostos os seguintes objetivos específicos:

- Determinar os modos de falha apresentado pelo pavimento;
- Demonstrar uma metodologia para simulação numérica de pavimentos rígidos utilizando modelos precisos de comportamento;
- Avaliar a resistência do pavimento, bem como das regiões de plastificação e de dano;
- Verificar a aplicabilidade do modelo *Concrete Damage Plasticity* para simulações em pavimentos rígidos;
- Aplicar materiais alternativos, como por exemplo o concreto de ultra-alto desempenho reforçado por fibras (UHPC), a fim de verificar as melhorias no comportamento estrutural.



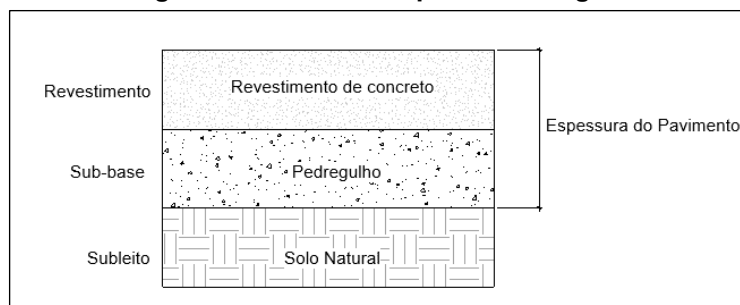
## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção serão apresentados os tipos de pavimentos que serão utilizados nesta pesquisa. Para a simulação em elementos finitos, foi utilizado o funcionamento dos modelos constitutivos implementados no *software Abaqus* (i.e., comportamento de Mohr-Coulomb para o solo natural e a brita, *Concrete Damage Plasticity* model - CDP para o concreto da camada de pavimento e o UHPFRC como modelo alternativo).

### 2.1 Estrutura do pavimento

A pavimentação rígida é toda pavimentação cuja rigidez é elevada em comparação às camadas inferiores, o que resulta em uma alta absorção das deformações provenientes do carregamento aplicado (DNIT, 2006). Na figura (1), tem-se a composição estrutural do pavimento rígido.

**Figura 1: Estrutura do pavimento rígido**



**Fonte: Resistência (2022).**

Cada camada do pavimento possui uma ou mais funções específicas, que devem proporcionar aos veículos as condições adequadas de suporte. As cargas aplicadas sobre a superfície do pavimento geram um determinado estado de tensões na estrutura, que depende, majoritariamente, do comportamento mecânico de cada uma das camadas e do conjunto destas (COSTA, 2013).

As cargas são aplicadas por veículos, bem como pelo ambiente, geralmente de modo transitório, portanto, cíclicas ou repetitivas (COSTA, 2013)

## 2.2 Mecânica dos pavimentos

O dimensionamento do pavimento é realizado com o objetivo de se determinar a espessura de cada uma de suas camadas. Os modos de falha são caracterizados por Erosão, Fadiga e Ruptura ao Estado limite último, os quais são apresentados pelo DNIT (2005). No presente trabalho, a falha por Fadiga e Erosão será apresentada segundo as prescrições do manual do PCA. No entanto, o escopo do trabalho concentra-se na ruptura por cargas estáticas, com base na NBR 6118:2014 (ABNT, 2014)

### a. Fadiga

As trincas são mais propensas nos pavimentos flexíveis, sendo a maior parte delas causadas pelo fenômeno de fadiga, ou seja, devido às ações repetidas de esforços de tração por flexão dessa camada (FONTES, 2009). Na figura (2) é possível analisar a ocorrência da fadiga no revestimento do pavimento de concreto.

**Figura 2: Trincas Longitudinais**



**Fonte: DNIT (2004)**

Segundo Almeida (2019), a fadiga é dimensionada calculando individualmente o efeito de cada carga pelo tipo de eixo, sempre considerando a relação percentual entre o número de repetições de cargas previsto para um determinado tipo de eixo, e o número de repetições admissível. Para relação entre tensões (RT) com valores >

0,55, é usada a equação (01); para RT entre 0,55 e 0,45, é usada a equação (02); já para RT < 0,45, as repetições de carga são ilimitadas, visto que elas não provocam efeitos de deterioração por fadiga no concreto (ALMEIDA, 2019).

$$\frac{0,97187 - RT}{0,0828}$$

Equação 01

$$N = \left( \frac{4,2577}{RT - 0,43248} \right)^{3,268}$$

Equação 02

Sendo:

$N$  = Número de ciclos para ruptura por fadiga;

$RT$  = Razão entre a tensão equivalente e a resistência à tração na flexão do concreto aos 28 dias.

A espessura da placa de concreto deve ser determinada, desde que o Consumo de resistência à fadiga (CRF) não ultrapasse 100%. O cálculo é realizado utilizando a equação (03), que considera o consumo de resistência à fadiga (CRF) (ALMEIDA, 2019).

$$CRF = \sum_1^n \frac{N_{p,i}}{N_{f,i}} \leq 1$$

Equação 03

### b. Erosão e escalonamento

A erosão é o nome dado à perda de material da camada de suporte da placa de concreto por ação combinada da água e pela passagem das cargas. Esse fenômeno gera deformações verticais críticas nos cantos e nas bordas longitudinais, fazendo com que se formem escalões (ALMEIDA, 2019). Esse fenômeno é demonstrado na figura (3).

**Figura 3: Ocorrência de erosão**



Fonte: DNIT, (2004)

O fenômeno erosão mede o poder que uma certa carga possui de produzir a deformação vertical na placa de concreto, cujo valor é representado pela equação 04. Segundo Pitta (1998), o fator de erosão provém de dados experimentais que apresentaram um índice de serventia final igual a 3,0, considerado um valor relativamente alto, o que provoca uma tendência ao superdimensionamento. Sendo assim, temos a seguinte expressão:

$$P = \frac{268,7p^2}{hk^{0,73}}$$

Equação 04

Sendo:

$P$  = Fator de erosão;

$p$ = Pressão vertical exercida na fundação sob o canto da placa, em psi;

$h$ = Espessura da placa em polegadas;

$k$ = Coeficiente de recalque, em libras por polegada cúbica.

Para encontrar o número admissível de repetições de eixo é utilizado a equação (5).

$$\log_{10}N = 14,524 - 6,777(C_1 * P - 9,0)^{0,013}$$

Equação 05

Sendo:

$N$ = número admissível de passagens da força;

$C_1$ = constante de ajustamento relacionada ao tipo de sub-base, igual a 1,0 se granular e cerca de 0,9 se tratada com cimento;

$P$ =fator de erosão.

O dano por erosão é calculado com a seguinte equação (6), desde que não exceda o valor de 100% a fim de que a espessura de projeto seja aceita.

$$\% = 100 \sum n_i \left( \frac{C_2}{N_i} \right)$$

Equação 06

Sendo:

$n_i$ = Número previsto de repetições de carga de eixo;

$C_2$ = Constante igual a 0,06 para pavimentos sem acostamento de concreto e 0,94 para pavimentos com acostamento de concreto;

$N_i$ = Número admissível de repetições de carga de eixo para o grupo de carga.

Considerações sobre o dano causado pelo escalonamento das juntas transversais foram inseridas no modelo de erosão (ALMEIDA, 2019). Segundo o DNIT (2005), o método usa o estudo 26 de Packard (1977) 9 e Brokaw (1973) 10, com base no qual o índice de serventia do pavimento é função do grau de escalonamento, da intensidade do tráfego e da espessura do pavimento.

Segundo Almeida (2019), o método do PCA de 1984 não considera o empenamento das placas de concreto devido às variações térmicas. Segundo o método, as informações disponíveis sobre medidas de tensões resultantes de empenamento não seriam introduzidas por não serem confiáveis (DNIT, 2005). Entretanto, após sua publicação, vários experimentos já foram realizados, o que possibilitou uma melhor caracterização do efeito descrito, o que demonstra a importância das atuações do clima.

### **2.3 Análise estrutural**

Além das falhas que consideram os altos ciclos e as baixas amplitudes, a falha por esgotamento de seção transversal sob alta amplitude também deve ser considerada. Sobretudo na situação de pavimentos de aeroportos, em que há altas cargas estáticas durante grandes períodos.

Assim, nota-se um problema estrutural de alta complexidade (i.e., condições de carregamentos, geometria, condições de contorno e comportamento não linear de materiais), em que as soluções analíticas baseadas no modelo analítico de Boussinesq são imprecisas, o que as torna inviáveis de serem aplicadas em uma alta complexidade de modelo.

Com a evolução do método dos elementos finitos (MEF), foi possível a utilização de modelos numéricos capazes de se analisar situações mais realistas, com resultados mais precisos (IOANNIDES, 1984). Alguns programas já capacitados na análise de estruturas complexas, dentre eles: SAP, PROGRAMA PARA ANÁLISE DE UM SÓLIDO PRISMÁTICO, FINITE, GEOSYS, FEACONS, SLAB, J-SLAB, ILLI-PAVE, BISAR, FIDIES, CHEVRON-ELP 15, DIPLOMAT, WESTER, RISC, ILLI-SLAB, KENSLABS, MeDiNa e Elsym 5.

No presente trabalho, portanto, utiliza-se o software *Abaqus*, devido à reconhecida capacidade de representar de forma realista e precisa os modelos em

concreto e em solo. Esse mesmo software foi utilizado em alguns trabalhos, como o de Gidrão (2020), o de H.M. Hügél, S. Henke, S. Kinzler (2008).

## **2.4 Característica do concreto de UHPFRC**

Birchall et al. (1981) e Bache (1981) introduziram um tipo de concreto que utiliza uma matriz altamente compacta, com alta resistência à flexão e baixa permeabilidade que passou a ser denominado concreto de ultra-alto desempenho (UHPC).

O trabalho de Richard e Cheyrezy (1995), na década de 90, deu origem ao concreto de ultra-alto desempenho reforçado por fibras (UHPFRC) a partir de estudos com concreto de alto desempenho, cujo procedimento de obtenção consiste na utilização de partículas finas com diâmetro máximo de 2mm como o cimento Portland; consumo elevado de adições minerais como areia fina, sílica ativa ou pó de quartzo; e de aditivos superplastificantes, condições que dão garantia de uso da menor relação 21 água/aglutinante possível, da ordem de 0,10 a 0,20 em massa (TUTIKIAN et al., 2011; OLIVEIRA, 2019).

As propriedades do UHPFRC estão intrinsecamente relacionadas com a seleção e dosagem dos componentes, a qual deve ser baseada na otimização do empacotamento de partículas, isso significa dizer que a mistura dos componentes granulares deve prover alta densidade de empacotamento, o que implica em baixa porosidade, e, conseqüentemente, na alta resistência à compressão e durabilidade. Além disso, um teor otimizado de superplastificante também é essencial para atingir a mínima relação água/aglutinante (OLIVEIRA, 2019).

A incorporação de fibras é responsável pelo aumento da ductilidade do material, e esta melhoria está diretamente associada à natureza, à dimensão, à geometria e às propriedades mecânicas das fibras introduzidas. De acordo com Casagrande (2017), a ductilidade conferida pelas fibras é resultante de diversos fatores, como por exemplo a ponte de transferência de tensões, o desvio ou interceptação das fissuras e o descolamento das fibras da matriz, devido ao consumo de uma parcela da energia.

### 2.4.1 Propriedades Mecânicas do UHPFRC

Na engenharia estrutural moderna, a resistência à compressão uniaxial ( $f_c$ ) é o principal parâmetro utilizado no estudo do comportamento estrutural de concreto do tipo UHPFRC, que pode ser assim classificado quando atinge valores superiores à 150 MPa (GRAYBEAL, 2008). O principal método de ensaio de compressão é o rompimento de corpos de prova cilíndricos ou cúbicos padronizados, entretanto, a aplicação de ensaios de compressão em concretos de resistências muito altas, representam um grande desafio à capacidade das máquinas de ensaio e à preparação das superfícies dos corpos de prova (GRAYBEAL, 2008).

O módulo de elasticidade ( $E_c$ ) é uma propriedade fundamental para a análise estrutural, para a avaliação de efeitos de segunda ordem e para as verificações de deslocamentos e análises dinâmicas (GIDRÃO, 2020). O módulo de elasticidade ( $E_c$ ) é um parâmetro determinado comumente em ensaios de compressão uniaxial. Assim como para altos valores de resistência à compressão, a medição de altos valores de módulo de elasticidade torna os métodos tradicionais pouco confiáveis. Neste contexto, os autores sugerem a utilização de mais um conjunto de transdutores de deslocamento variável linear (LVDT) para medição do comportamento pós-fissuração do concreto, já que nos ensaios consagrados ocorre tendência de rotação dos instrumentos de medição devido às tensões de cisalhamento no corpo de prova (GRANATO, 2020).

Graybeal (2007) deduziu uma equação para estimativa do módulo de elasticidade do UHPFRC em função da resistência de compressão uniaxial característica ( $f_c'$ ), para um intervalo de valores de  $f_c$  entre 126 MPa e 193 MPa. Alsalman et al. (2017) propuseram outra equação, a partir de dados da literatura, válidos para valores de  $f_c'$  entre 31 MPa e 235 MPa. A tabela (1) apresenta valores típicos para propriedades mecânicas dos UHPFRC.



**Tabela 1: Propriedades Mecânicas Típicas do UHPFR**

Propriedades	Valor
Resistência à compressão com cura térmica	150MPa
Resistência à tração sob flexão	24 MPa
Primeira Fissura em Flexão	20MPa
Módulo de Elasticidade	47MPa
Densidade	2450 Kg/m <sup>3</sup>
Retração	< 500 depois de 50 dias em cura úmida e 0 em cura com calor

Fonte: Cavil Reberstrost e Perry (2006).

#### 2.4.2 Durabilidade

Resplendino (2004) observa que a alta durabilidade do UHPFRC é explicada pela comparação de seus índices de durabilidade com aqueles encontrados em concretos convencionais e de alta resistência, como indica a tabela (2). Desse modo, a porosidade praticamente nula garante vida útil muito mais longa quando comparado aos concretos usuais, evitando a entrada de agentes agressivos (GRAYBEAL, 2008; TANESI, 2008; TOLEDO FILHO et al., 2012)

**Tabela 2: Índices de durabilidade do UHPFRC**

Índice	Convencional	Alta resistência	UHPFRC
Índice de vazios [%]	14 – 20	10 - 13	1,5 - 5
Permeabilidade ao Oxigênio [m <sup>2</sup> ]	10-16	10-17	< 10-19
Difusão ao íon Cl-	2.10-11	2.10-12	2.10-14

Fonte: RESPLENDINO (2004)

Um caso notável de durabilidade do UHPFRC é descrito por Graybeal e Tanesi (2008), que demonstram a aplicação bem sucedida do material em pavimentos rodoviários submetidos a alta ciclagem mecânica e térmica. Após alguns meses de vida útil do elemento solicitado sob tráfego intenso e mudanças climáticas, observou-

se que o UHPFRC com  $V_f = 3\%$  de fibras metálicas apresentou considerável durabilidade.

Portanto, qualifica-se o UHPFRC como uma alternativa econômica, sustentável e adequada para proteger as armaduras imersas no concreto, sobretudo para situações em que a falha por durabilidade é crítica, como por exemplo as usinas nucleares, estruturas marinhas, tabuleiros rodoviários, etc. (GIDRÃO, 2017).

## **2.5 Característica não linear do concreto aplicado ao modelo *Concrete Damaged plasticity (CDP)***

Gidrão (2020) afirma que o comportamento não linear do concreto pode ser representado por meio de modelos de dano elástico não linear e dano elasto-plástico. Para representar um carregamento monotônico, estes dois modelos são capazes de representar, de forma satisfatória, o de força-deslocamento. No entanto, estes modelos não são capazes de representar com precisão ramos de carga e descarga do material. Assim, o modelo de *Concrete Damage Plasticity (CDP)* serve para representar o comportamento cíclico e monotônico do material de forma mais realista.

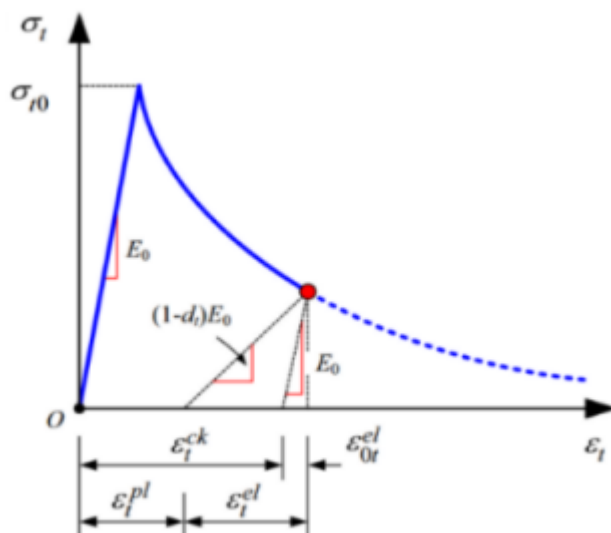
Assim, o CDP contempla o acúmulo de plasticidade bem como a degradação do módulo de elasticidade, sendo um modelo elasto-plástico com dano acoplado, baseado nas formulações de Lubliner (1989). O modelo admite dois mecanismos de falha: a ruptura por tração e o esmagamento por compressão.

O dano do *Concrete Damaged Plasticity* é avaliado pelos parâmetros de dano, sendo eles, danos de compressão ( $d_c$ ) e dano de tração ( $d_t$ ). Nesta situação o comportamento do concreto simples é considerado como independente das armaduras.

As figuras (4) e (5) ilustram o comportamento teórico das curvas de tensão *versus* deformação do CDP à compressão, disponível no manual do *software Abaqus*. Pode-se, então, constatar as variáveis de dano em função das deformações plásticas  $\varepsilon_{t,pl}$  e  $\varepsilon_{c,pl}$ , que são deformações plásticas na tração e na compressão. Observa-se, assim, que é assumido um comportamento linear somente no primeiro trecho do gráfico, que são as deformações elásticas. Para tração, admite-se o comportamento elástico até a tensão limite de resistência  $\sigma_{t,0}$ , enquanto na compressão até  $\sigma_{c,0}$ . as

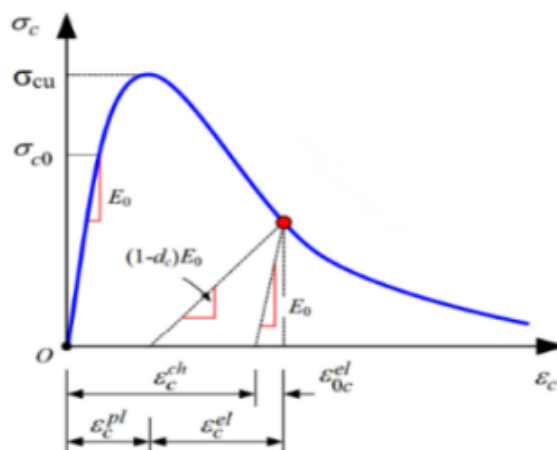
primeiras fissuras, e, conseqüentemente, a queda da curva tensão x deformação, surgem quando esses valores são ultrapassados.

Figura 4: Comportamento de Tração



Fonte: Gidrão (2020).

Figura 5: Comportamento de Compressão



Fonte: Gidrão (2020).

Sendo:

$E_0$  : Módulo de elasticidade inicial;

$d$ : Índice de dano;

$\sigma_t$ : Máxima tensão de tração no limite elástico;

$\sigma_{c,0}$ : Limite de elasticidade na compressão uniaxial;

$\sigma_{c,u}$  Máxima tensão de compressão uniaxial.

Vale ressaltar que a hipótese de equivalência em deformações pode ser escrita conforme a equação (07).

$$\varepsilon = \varepsilon_{el} + \varepsilon_{in} \quad \text{Equação 07}$$

$$\varepsilon_{in} = \varepsilon_{pl} + \varepsilon_{dan} \quad \text{Equação 08}$$

$$\varepsilon_{pl} = \varepsilon_{in} - \left( \frac{d}{1-d} \right) \frac{\sigma}{E_0} \quad \text{Equação 09}$$

Sendo:

$\varepsilon$ : Deformação total;

$\varepsilon_{el}$ : Deformação elástica;

$\varepsilon_{in}$ : Deformação inelástica;

$d$ : Índice de dano;

$\sigma$ : Tensão do concreto;

$E_0$  Módulo de elasticidade intacta do concreto.

$\varepsilon_{el}$ : Deformações plásticas.

O modelo de plasticidade é composto pelo potencial plástico e pela superfície de plastificação, assumindo um fluxo não associativo. A lei de fluxo é associada quando o potencial plástico é coincidente com função de plastificação, e não associativa no caso contrário. O potencial plástico  $G$  usado para este modelo é a função hiperbólica, conforme a equação (10):

$$G = \sqrt{(m\sigma_{t_0} \tan\psi)^2 + q^{-2} \underline{p} \cdot \tan\psi - fc} \quad \text{Equação 10}$$

Sendo:

$\psi$ : Ângulo de dilatação medido no plano meridional;

$\sigma_{t_0}$ : Tensão de tração no estado uniaxial;

$m$ : Excentricidade;

$\underline{p}$ : Tensão hidrostática

$f_c$ : Resistência uniaxial de tração ou de compressão do concreto;

$q$ : Tensão efetiva de Mises.

A função de plasticidade do CDP, desenvolvida por Lubliner(1989), é demonstrada pela equação (11):

$$f(\underline{\sigma}, k) = \frac{1}{1-\alpha} [q - 3\alpha \underline{p} + \beta(\tilde{\epsilon}^P) \langle \underline{\sigma}_{max} \rangle \mathcal{D} \langle -\underline{\sigma}_{max} \rangle] - \underline{\sigma}_c(\tilde{\epsilon}^P) = 0 \text{ Equação 11}$$

Onde a variável  $\underline{q}$ , dada pela equação 12, é comumente conhecida como tensão efetiva equivalente de Von Mises;

$$\underline{q} = \sqrt{\frac{3}{2} \cdot S : S} \quad \text{Equação 12}$$

E que  $\underline{p}$  é dado pela equação 13.

$$\underline{p} = -\frac{1}{3\bar{\sigma}} \quad \text{Equação 13}$$

Sendo:

Onde:  $f(\bar{\sigma}, k)$  = função plasticidade;

$\bar{q}$  = tensão efetiva equivalente de Von Mises;

$\bar{p}$  = tensor de tensão hidrostático;

$\bar{\sigma}$  = tensão inicial de escoamento na compressão;

$\bar{\sigma}_{\text{máx}}$  = autovetor do tensor de tensão;

$k$  = variáveis de dano ( $d_t$  e  $d_c$ );

$S$  = Invariante de tensão da superfície de ruptura;

$\alpha, \beta, \gamma$  = constantes dependentes dos resultados experimentais.

Pela função de resistência, é possível ativar os parâmetros de acordo com o operador das condições de Macaulay  $\langle x \rangle = \frac{|x|+x}{2}$ . Em que:

$$\begin{aligned} &\langle \underline{\sigma}_{max} \rangle \geq \{ \underline{\sigma}_{max} \text{ se } \underline{\sigma}_{max} \geq 0, \beta \text{ é introduzido } 0 \text{ se } \underline{\sigma}_{max} < 0 \\ &\langle -\underline{\sigma}_{max} \rangle \geq \{ \underline{\sigma}_{max} \text{ se } \underline{\sigma}_{max} \geq 0, \mathcal{P} \text{ é introduzido } 0 \text{ se } \underline{\sigma}_{max} > 0 \end{aligned}$$

O parâmetro  $\beta$  é baseado na lei de encruamento/amolecimento de Lee e Fenves (1998), de acordo com a equação (14):

$$\beta(\bar{\varepsilon}_c^p) = (1 - \alpha) \cdot \frac{fc0(\bar{\varepsilon}_c^p)}{ft(\bar{\varepsilon}_c^p)} - (1 + \alpha) \quad \text{Equação 14}$$

A equação (15) determina o parâmetro  $\mathcal{P}$ , que depende da  $K_c$ , uma constante que governa o espaçamento entre os meridianos de compressão e de tração, bem como e da superfície de ruptura do plano desviatório, cujos valores limites ficam entre 0,5 e 1.

$$\gamma = \frac{3(1 - k_c)}{2k_c - 1} \quad \text{Equação 15}$$

A relação entre a direção da deformação plástica e a taxa de deformação plástica, é determinada pela regra de fluxo plástico de Prandtl-Reuss, conforme a equação (16).

$$\varepsilon_{ij}^p = \lambda \cdot \frac{\delta G}{\delta \sigma_{ij}} \quad \text{Equação 16}$$

Onde:

$\varepsilon_{ij}^p$ : Regra de fluxo;

$\lambda$ : Multiplicador plástico;

G: Evolução do potencial plástico (Drucker-Prager).

Os valores de  $f_c$  e  $f_t$  correspondem às resistências uniaxiais de tração e de compressão do concreto. A função de potencial plástica é comumente representada no plano p-q, em que p é o plano de tensão hidrostática e q é a tensão equivalente de Von Mises.

Sendo assim, os parâmetros de entrada para a plasticidade foram calibrados por GIDRÃO (2020), para o modelo de *Concrete Damage Plasticity* (CDP), e encontram-se apresentados, ainda que de forma sucinta, na tabela (3).

**Tabela 3: Parâmetros de Plasticidade**

<b>Parâmetros</b>	<b>Valores</b>
Ângulo de dilatação( $\psi$ )	55
Excentricidade( $m$ )	0,1
$\frac{f_{c,0}}{f_{b,c0}}$	1,07
$K_c$	0,666

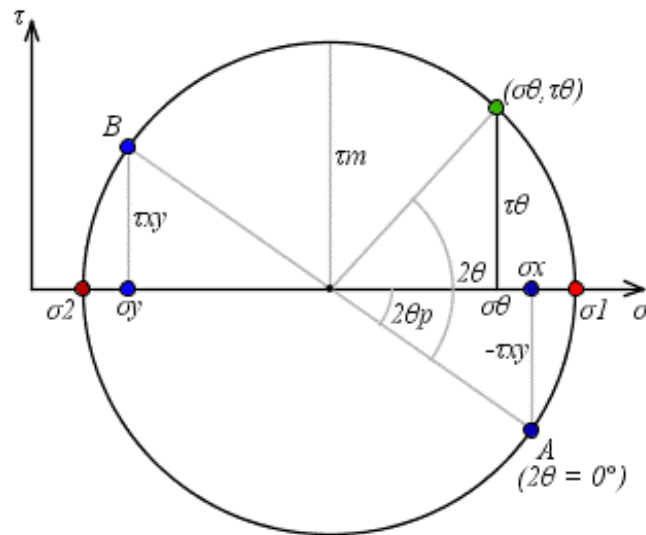
Fonte: Gidrão (2020)

## 2.6 Mohr Coulomb

O círculo de Mohr é representado por dois eixos: um vertical, referente às tensões de cisalhamento, e outro horizontal, para as tensões normais. A abscisa e a ordenada de cada ponto do círculo representam as tensões normais e tangenciais, que atuam sobre um sistema de coordenadas rotacionado. O círculo, portanto, é o conjunto dos estados de tensões sobre planos individuais em todas as suas

orientações, em que os eixos representam os planos onde as tensões principais ocorrem (BEZERRA, 2022). Na figura (6), é possível observar a demonstração do círculo de Mohr.

Figura 6: Círculo de Mohr



Fonte: Julia Suzuki Bezerra, (2004).

Segundo Bezerra (2022), o círculo de Mohr é um método gráfico bidimensional representativo do Teorema de Cauchy. Essa Lei é representada na equação (16), que é construída em relação ao equilíbrio de um elemento infinitesimal contínuo, e estabelece equações para a determinação das tensões normais e de cisalhamento em qualquer plano dado por um ângulo  $\theta$  para um estado de tensão  $(\sigma_x, \sigma_y$  e  $\tau_{xy})$ . Para se obter o estado de tensão é utilizado a equação (18), (19) e (20).

$$[T_x \ T_y \ T_j] = [\sigma_x \ \tau_{xy} \ \tau_{xz} \ \tau_{yx} \ \sigma_y \ \tau_{yz} \ \tau_{xz} \ \tau_{yz} \ \sigma_z]$$

Equação 17

$$\sigma_x = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{(\sigma_x - \sigma_y)}{2} \cos \cos 2\theta + \tau_{xy} \sin \sin 2\theta$$

Equação 18



$$\underline{\sigma}_y = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{(\sigma_x - \sigma_y)}{2} \cos \cos 2\theta - \tau_{xy} \sin \sin 2\theta$$

Equação 19

$$\underline{\tau}_{xy} = \frac{\sigma_y - \sigma_x}{2} \sin \sin 2\theta + \tau_{xy} \cos \cos 2\theta$$

Equação 20

Observa-se nas expressões ( $\underline{\sigma}_x$  e  $\underline{\sigma}_y$ ) que o ângulo  $\theta$  pode ser substituído pela equação (21).

$$\alpha = \theta + 90^\circ$$

Equação 21

Com o auxílio das equações acima (18, 19 e 20), criaram-se outras para calcular as tensões normais máximas, representada pela equação (22), a tensão mínima demonstrada pela equação (23), e também a de cisalhamento máximo, representada pela equação (24). (BEZERRA, 2022)

$$\sigma_1 = \frac{(\sigma_x + \sigma_y)}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}$$

Equação 22

$$\sigma_2 = \frac{(\sigma_x + \sigma_y)}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}$$

Equação 23

$$\tau_m = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}$$

Equação 24

Com os valores obtidos nas equações anteriores (22, 23 e 24), é possível representar esses valores por um círculo - Círculo de Mohr, em um sistema de duas coordenadas: componentes de tensão normal e tangencial (BEZERRA, 2022).

### 3 MODELO CONSTITUTIVO

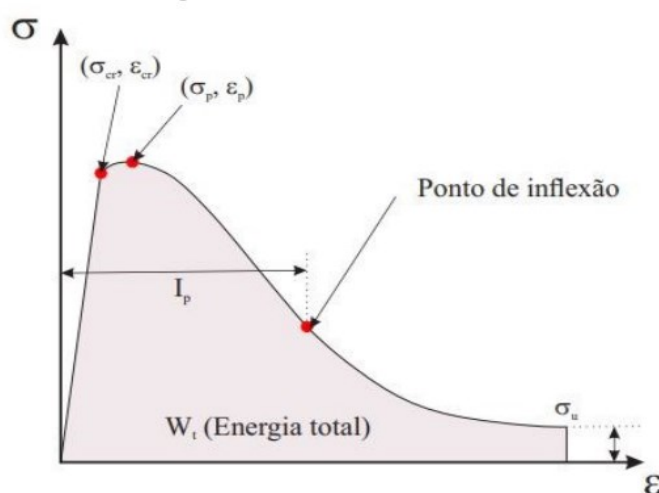
Os modelos de tração e compressão utilizados no presente trabalho foram disponibilizados pelo professor Gustavo Gidrão (2020), em que o modelo constitutivo de compressão tem como base o estudo de Carreira e Chu (1985), enquanto o modelo constitutivo de tração tem como referência o estudo de Krahl, Carrazedo e Debs (2018). No presente trabalho, a proposta de modelo de Carreira e Chu (1995), obteve um ótimo desempenho nas análises realizadas no pavimento rígido de concreto de UHPFRC.

A lei de dano de tração ( $d_t$ ) e compressão ( $d_c$ ), tem como referência a proposta de Birtel e Mark (2006).

#### 3.1 Modelo constitutivo de tração

O primeiro modelo constitutivo abordado será a tração, onde na figura (7), é demonstrado o estudo desenvolvido por Krahl, Carrazedo e Debs (2018).

Figura 7: Lei constitutiva analítica



Fonte: Gidrão (2020).

Para a definição da tensão de tração é utilizado a equação (25).

$$\sigma_t(\varepsilon) = \frac{w_t}{I_p \sqrt{\frac{\pi}{2}}} e^{\frac{-2(\varepsilon - \varepsilon_{pico})}{I_p^2}} \quad \text{Equação 25}$$

Sendo:

$\sigma_t(\varepsilon)$  = Tensão de Tração;

$w_t$  = Energia de Deformação;

$I_p$  = Deformação de Inflexão;

$\varepsilon$  = Deformação Total;

### 3.2 Modelo constitutivo de compressão

O modelo constitutivo de compressão tem como referência a proposta de Carreira e Chu (1985), conforme apresentado na equação (26).

$$\sigma = \sigma_0 \left[ \frac{k_1 \beta \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}}{k_1 \beta - 1 + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right) k_2 \beta} \right] \quad \text{Equação 26}$$

Sendo o  $\beta$  representado pela equação (27).

$$\beta = \frac{1}{1 - \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0 E_{C0}}} \quad \text{Equação 27}$$

Sendo:

$\sigma$  = Tensão Total;

$\sigma_0$  = Tensão Inicial;

$k_1$  e  $k_2$  = Variáveis de Dano;

$\beta$  = Parâmetro de Encruamento/Amolecimento;

$\varepsilon$  = Deformação Total;

$\varepsilon_0$  = Deformação Inicial.

### 3.3 Lei de dano

A lei de dano utilizada na tração( $d_t$ ) e compressão( $d_c$ ), tem como base a metodologia proposta por Birtel e Mark (2006), conforme representado nas equações (28) e (30).

Para a lei de dano na tração:

$$d_t = 1 - \frac{\sigma_t E_c^{-1}}{\varepsilon_t^{pl} \left( \frac{1}{b_t - 1} \right) + \sigma_t E_c^{-1}} \quad \text{Equação 28}$$

Substituindo o  $b_t$ , pela seguinte equação:

$$b_t = \frac{\varepsilon_t^{pl}}{\varepsilon_t^{in}} \quad \text{Equação 29}$$

Sendo:

$\sigma_t$  = Tensão de Tração;

$E_c$  = Módulo de Elasticidade Intacto do Material;

$b_t$  = Parâmetro de Calibração (0 a 1).

Para a lei de dano na compressão:

$$d_c = 1 - \frac{\sigma_t E_c^{-1}}{\varepsilon_c^{pl} \left( \frac{1}{b_c - 1} \right) + \sigma_c E_c^{-1}} \quad \text{Equação 30}$$

Substituindo o  $b_c$  pela seguinte equação:

$$b_c = \frac{\varepsilon_c^{pl}}{\varepsilon_c^{in}} \quad \text{Equação 31}$$

Sendo:

$\sigma_c$  = Tensão de Compressão;

$E_c$  = Módulo de Elasticidade Intacto do Material;

$b_c$  = Parâmetro de Calibração (0 a 1).

#### 4 MODELOS ANALISADOS

O trabalho tem, como objetivo a simulação de dois tipos de pavimentos rígidos de concreto, sendo uma delas constituída de concreto classe C25, e a outra constituída de concreto de UHPFRC, com resistência característica à compressão, com perfil retangular, separada por camadas. Essas camadas seriam a de revestimento, a de base, a de sub-base a do solo.

A respeito dos pavimentos constituídos pelos materiais C25 e UHPFRC, realizou-se algumas análises na espessura da camada de concreto, com foco nas dimensões de 50mm e 300mm. Além da análise, foi adotado para a camada da sub-base dois tipos de material, sendo eles: reforçado e o não reforçado. Para facilitar a compreensão das estruturas adotadas, foi utilizada a tabela (4) para a identificação dos tipos de pavimentos.

**Tabela 4: Identificação dos pavimentos**

ID	Espessura (mm)	Material do Pavimento	Sub-base
ESP50C25-SN	50	C25	Solo Natural
ESP300C25-SN	300	C25	Solo Natural
ESP50C25-REF	50	C25	Reforçado
ESP300C25-REF	300	C25	Reforçado
ESP50UHPFRC-SN	50	UHPFRC	Solo Natural
ESP300UHPFRC-SN	300	UHPFRC	Solo Natural
ESP50UHPFRC-REF	50	UHPFRC	Reforçado
ESP300UHPFRC-REF	300	UHPFRC	Reforçado

Fonte: Autoria própria (2022)

Para obter a resistência dos modelos propostos, foi necessária a simulação de uma aeronave estacionada sobre a estrutura do pavimento. A aplicação de força se deu através de um regime estático, aplicado no centro da camada de concreto.

## 5 MODELAGEM NUMÉRICA

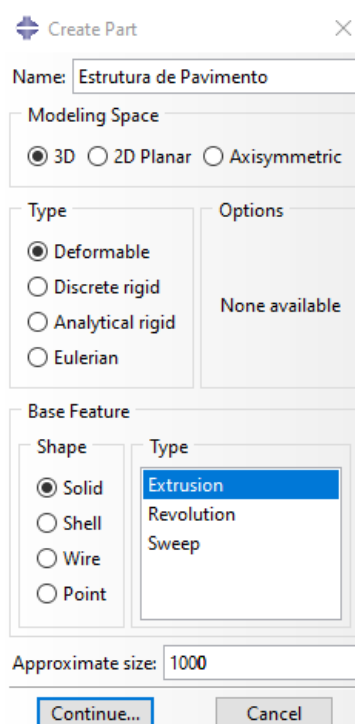
Para a modelagem numérica foi utilizado o método dos elementos finitos (MEF), desenvolvida através do *software Abaqus*. Dentre os parâmetros da simulação, pode-se destacar os modelos constitutivos dos materiais, como o modelo de dano, as malhas e as condições de contorno utilizadas, tudo isso visando a premissa da não linearidade do concreto.

Por meio da análise da modelagem numérica, ela permite um estudo aprofundado do comportamento das estruturas complexas em diversas situações, possibilitando a comparação dos resultados de outras estruturas.

## 5.1 Modelagem 3D

Para criação da modelagem da estrutura foram inseridos alguns dados no *software Abaqus*, conforme a figura (8). Vale ressaltar que a modelagem de cada camada será realizada por partes, para que no final sejam unidas todas as camadas para formar um pavimento.

**Figura 8: Modelagem da estrutura**

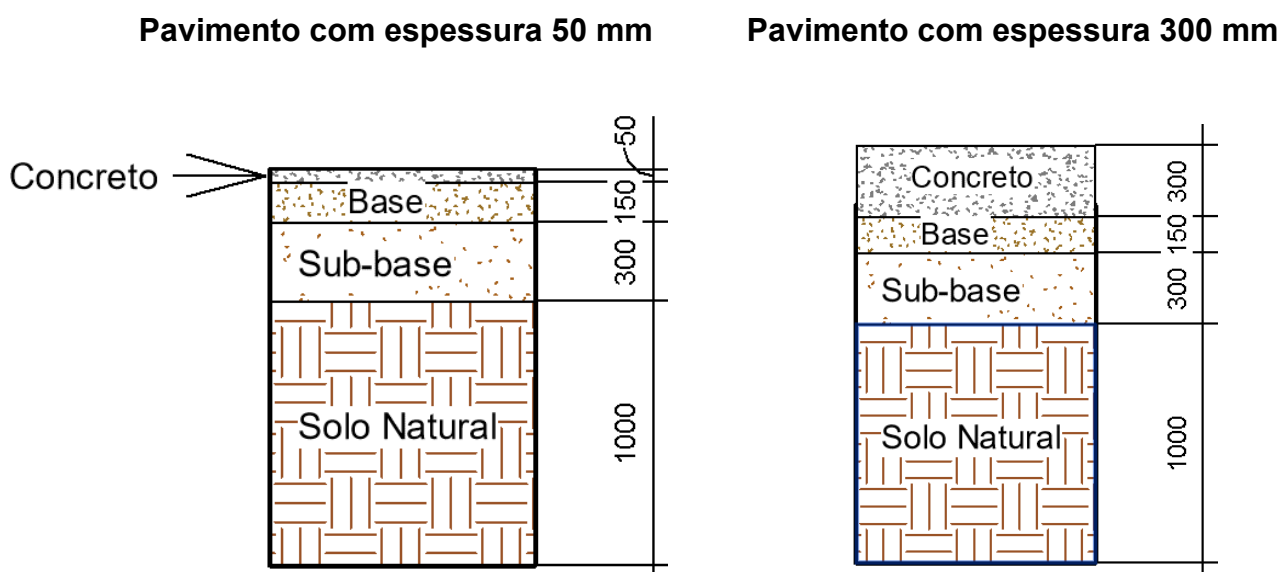


**Fonte: Autoria própria (2022).**

## 5.2 Geometria dos modelos

A figura (9) apresenta as dimensões do modelo analisado, adotados em milímetros.

Figura 9: Modelo das seções estudadas



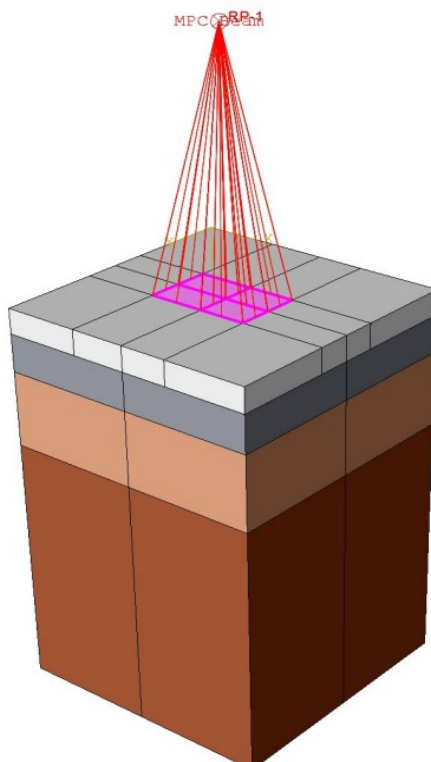
Fonte: Autoria própria (2022).



### 5.3 Condições de contorno e carregamento

As condições de contorno e carregamento adotadas foram iguais para todas as estruturas e seguiram o modelo adotado por GIDRÃO (2020). Para aplicação do deslocamento no eixo Z com um valor de 200 kN, determinou-se um ponto de referência no centro da camada de concreto, o qual foi associado com barras MPC por apresentar rigidez infinita e chegar o mais próximo da realidade para simular o avião estacionado, com formato de retângulo (38,98cm X 25,19cm), conforme ilustrado na figura (10).

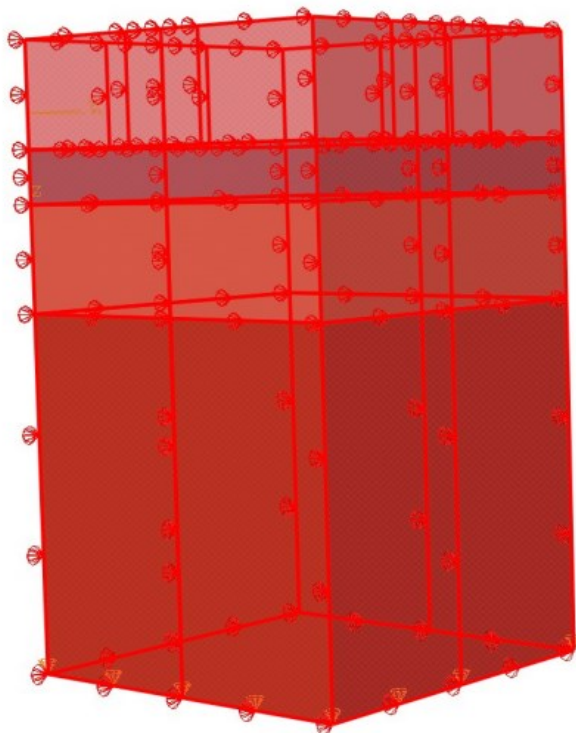
**Figura 10: Carga sendo aplicada sob o pavimento**



Fonte: Autoria própria (2022).

Os modelos de pavimentação são aplicados às restrições de movimento nos planos da base e na lateral da estrutura, visando produzir a deformação mais próxima da realidade, conforme ilustrado na figura (11).

**Figura 11: Restrições de movimento**

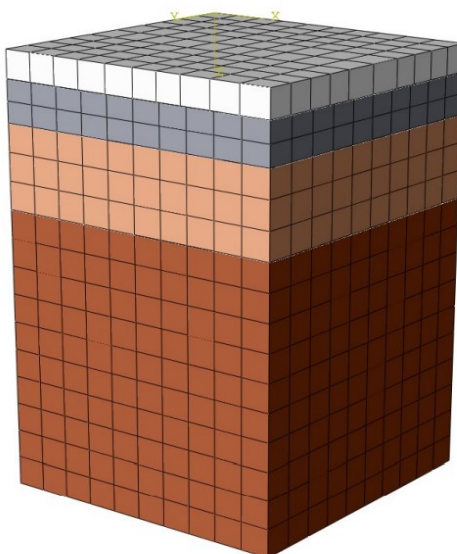


**Fonte: Autoria própria (2022).**

#### **5.4 Malhas**

Para todas as camadas da estrutura foram adotadas malhas regulares com tamanho de 100 mm, para assim evitar problemas de distorções, principalmente na camada de concreto, na qual será aplicado o deslocamento. A figura (12) representa a estrutura com as malhas já aplicadas.

**Figura 12: Criação da malha**



Fonte: Autoria própria (2022).

## **6 MODELOS CONSTITUTIVOS DOS MATERIAIS**

Nesta etapa, serão apresentados as informações dos materiais constituídos na estrutura.

### **6.1 Modelos constitutivos da brita, solo, solo reforçado e solo natural**

A tabela (5) apresenta os parâmetros utilizados para a elasticidade do modelo, obtidos por Gidrão (2020).

**Tabela 5: Parâmetros de elasticidade**

Material	Módulo de Elasticidade (N/mm)	Coefficiente de Poisson (Adm)
Concreto	30670	0,2
Brita	65000	0,3
Solo	10000	0,15
Solo Reforçado	20000	0,3
Solo Natural	182	0,15

Fonte: Repositório (2020)

### 6.1.1 Brita e Solo natural aplicado Mohr Coulomb Plasticity

Para a aplicação do método de *Mohr Coulomb Plasticity* à brita e ao solo natural, foram utilizados os parâmetros, obtidos por Jesus (2022) apresentados na tabela (6).

**Tabela 6: Parâmetros Mohr Coulomb Plasticity**

Material	Ângulo de atrito( $\phi$ )	Ângulo de dilatância( $\psi$ )	Coesão
Brita	43	5	0,1
Solo natural	46	4	0,5

Fonte: Jesus (2022)

## 6.2 Modelo constitutivo para o concreto

Para o modelo constitutivo do concreto serão demonstrados os parâmetros utilizados e os modelos de compressão, de tração e das leis de dano para a modelagem numérica. Da mesma forma, serão apresentadas as leis constituintes na tração, na compressão e no dano.

### 6.2.1 Parâmetros de entrada para leis constituintes

Os parâmetros utilizados para os modelos de C25 e UHPFRC foram disponibilizados por Gidrão (2020), sendo apresentados na tabela (7) os parâmetros de danos e plasticidade para o modelo UHPFRC. Para o modelo C25 os dados de danos e plasticidade, sendo representado na tabela (8).

**Tabela 7: Resumo das propriedades de leis constitutivas do UHPFRC**

<b>Propriedade</b>	<b>Valor</b>
$\varepsilon_{0,c}$	0,038
$\varepsilon_L$	0,0047
$f_{c'}$ (MPa)	104
$E_0$ (GPa)	32,850
$E_{SC}$ (GPa)	27,290
$bc$	0,7
$bt$	0,3
$\psi(^{\circ})$	55
$\frac{f_{b0}}{f_{c0}}$	1,16
$K$	0,66
Viscosidade	0,0001

Fonte: Adaptado Gidrão (2022).

Tabela 8: Resumo das propriedades de leis constitutiva do C25

Propriedade	Valor
$Gf$ (N/mm)	0,130
$w_1$ (mm)	0,0631
$w_2$ (mm)	0,284
$\varepsilon_{pico}$	0,00006
$\varepsilon_{0,c}$	0,038
$\varepsilon_L$	0,0047
$f_{c'}$ (MPa)	104
$E_0$ (GPa)	32,850
$E_{SC}$ (GPa)	27,290
$bc$	0,7
$bt$	0,3
$\psi(^{\circ})$	45
$\frac{f_{b0}}{f_{c0}}$	1,07
$K$	0,6667
$m$	0,1
Viscosidade	0,0001

Fonte: Adaptado Gidrão (2022)

### 6.3 Lei constitutiva e lei de dano na compressão

Em relação aos parâmetros utilizados na lei constitutiva, eles foram referenciados pelo modelo de CARREIRA e CHU (1985). A lei de dano de foi determinada segundo o modelo de BIRTEL e MARK (2006), cujo coeficiente é  $bc=0,7$ .

#### 6.4 Lei constitutiva e lei de dano na tração

O comportamento constitutivo foi referenciado pelo modelo de Krahl (2018) e a lei de dano utilizou o modelo de BIRTEL e MARK (2006) com coeficiente  $bt=0,3$ .

#### 6.5 Considerações para simulação no Abaqus

Por fim, para obter a análise do *software Abaqus*, foram utilizados incrementos de no mínimo  $1E-15$  e máximo  $0,01$ , com um número máximo de incrementos sendo  $1E05$ . Para a realizar o critério de parada, a simulação foi realizada de maneira que pudesse ser atingido o deslocamento máximo ou até o momento que o modelo falhará, ou até que o incremento mínimo fosse menor que  $1E-15$ .

### 7 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esta seção apresenta os resultados e discussões deste trabalho, provenientes da modelagem numérica dos pavimentos rígidos de concreto, da análise dos resultados analíticos, e da análise dos gráficos (danos causados nos modelos).

#### 7.1 Resultado numérico da simulação

Na tabela (9), é demonstrada a força de pico e o deslocamento máximo no pavimento. Dentre os valores apresentados na tabela, é possível identificar que o pavimento constituído pelo material de UHPFRC, com sub-base reforçada, apresenta vantagem tanto em relação a força máxima quanto ao deslocamento máximo.

Os gráficos apresentados neste trabalho, correlacionam os valores de força máxima numérica, obtida através da simulação dos modelos no *Abaqus*. No gráfico (1), é possível observar que, com o material UHPFRC, o modelo consegue suportar a força de  $46,47$  kN, uma vez que possui bom desempenho quando comparado com os outros modelos nos quais foram utilizados o material C25.

Já no gráfico (2), nota-se a vantagem na utilização da espessura de concreto com  $300$  mm, com um solo reforçado, uma vez que, com material de UHPFRC, ele

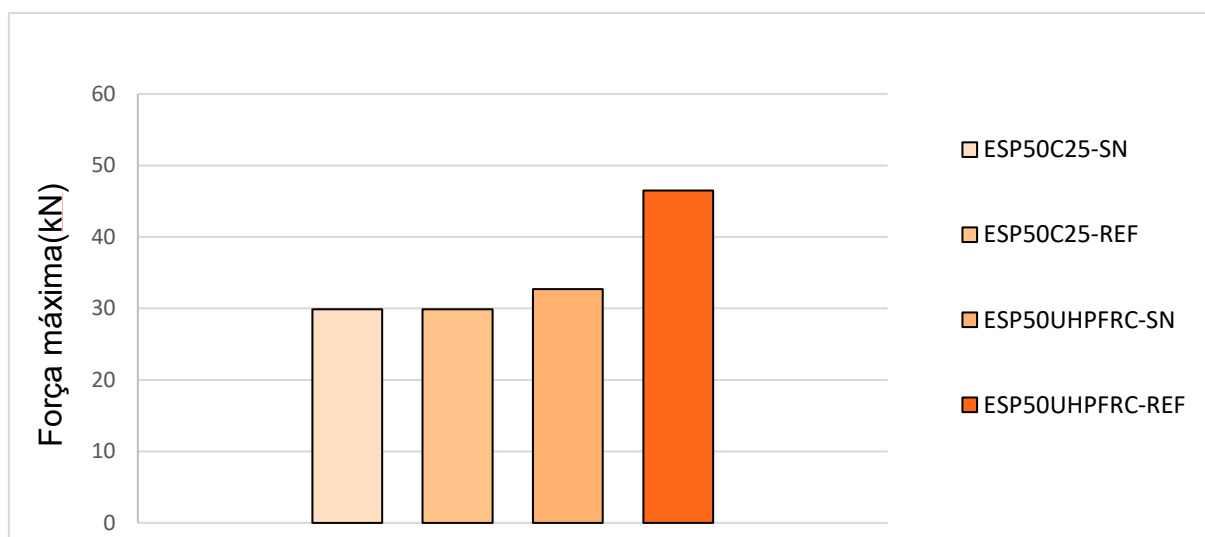
terá um bom desempenho, conseguindo suportar a maior força em relação aos outros modelos, de até 197,49 kN.

**Tabela 9: Força máxima aplicada e deslocamento de pico**

ID	Espessura (mm)	Material do Pavimento	$\delta_{pico}$ (mm)	$F_{m\acute{a}x}$ (kN)
ESP50C25-SN	50	C25	4,35	28,63
ESP300C25-SN	300	C25	9,53	58,40
ESP50C25-REF	50	C25	5,43	29,87
ESP300C25-REF	300	C25	13,29	77,99
ESP50UHPFRC-SN	50	UHPFRC	6,53	32,69
ESP300UHPFRC-SN	300	UHPFRC	14,29	79,77
ESP50UHPFRC-REF	50	UHPFRC	8,56	46,47
ESP300UHPFRC-REF	300	UHPFRC	29,86	197,49

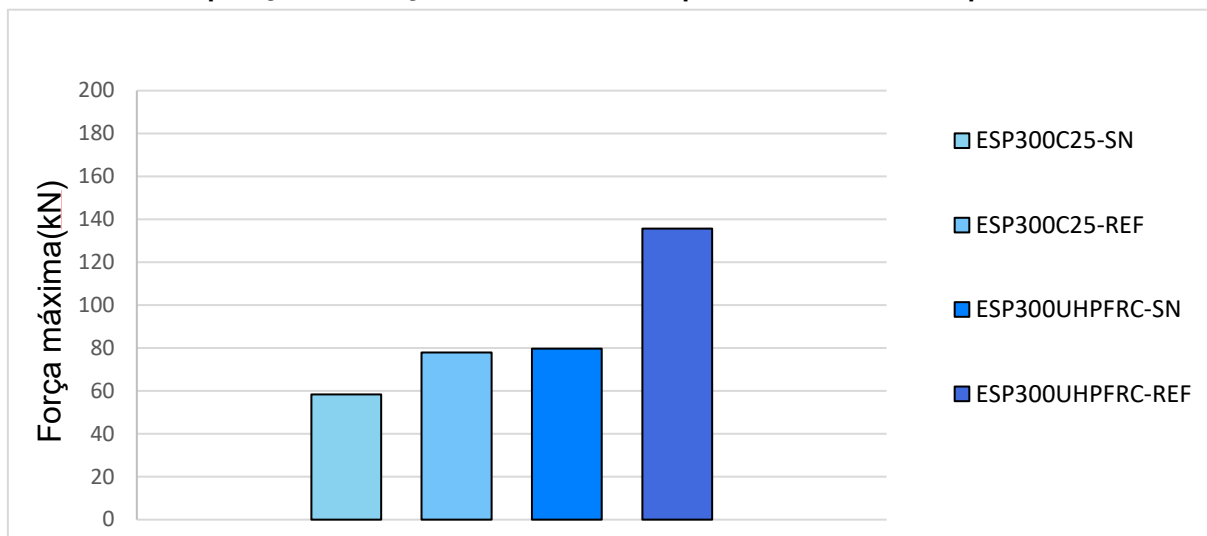
Fonte: Autoria própria (2022).

**Gráfico 1: Comparação das forças máximas obtidas pelos modelos com espessura de 50mm**



Fonte: Autoria própria (2022).

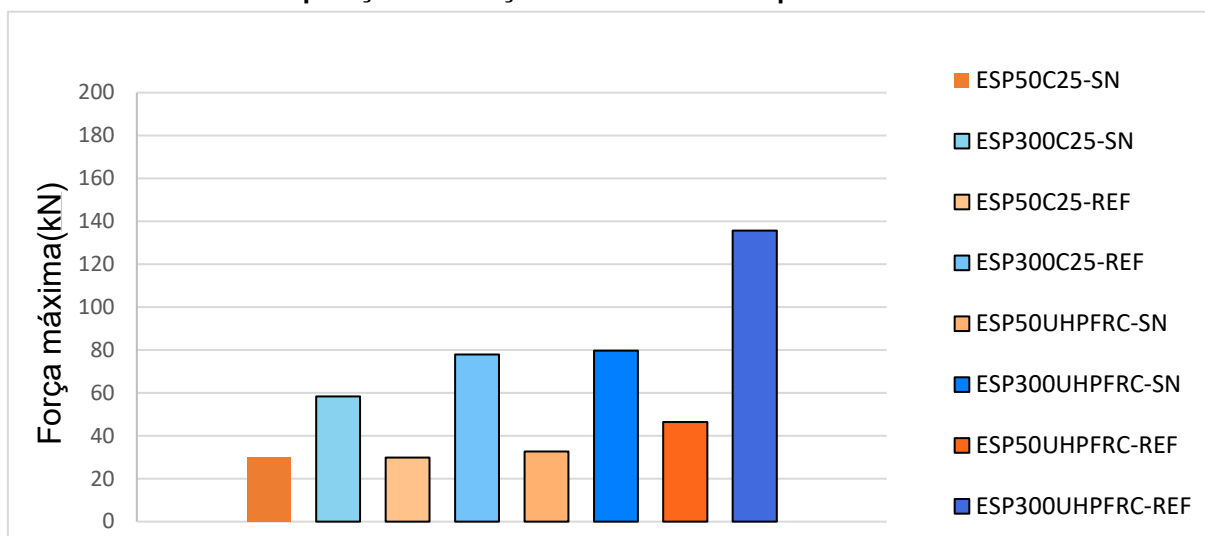


**Gráfico 2: Comparação das forças máximas obtidas pelos modelos com espessura de 300mm**

Fonte: Autoria própria (2022).

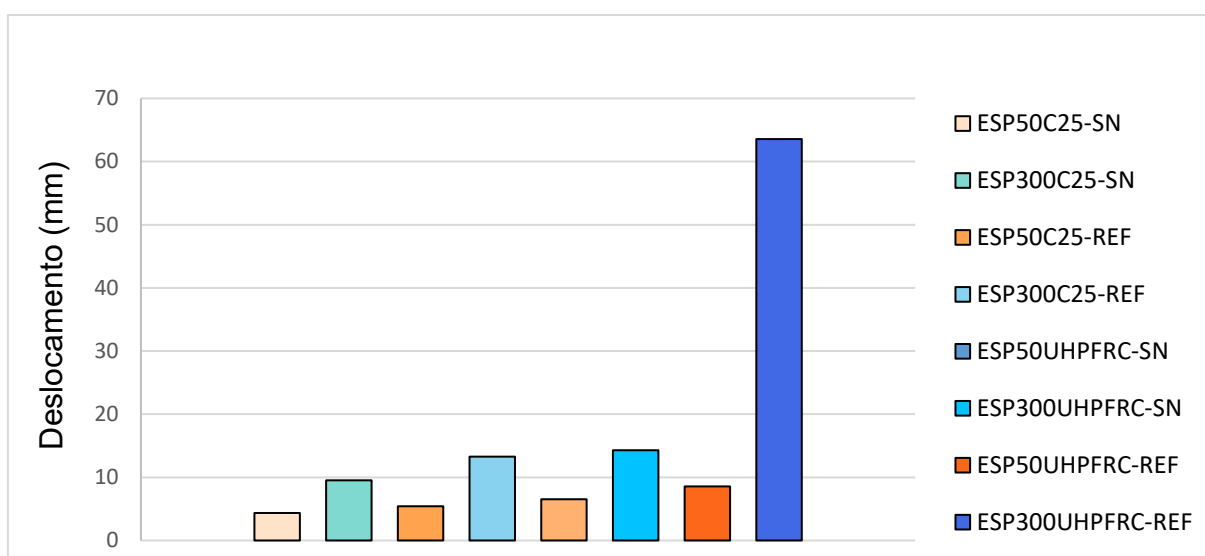
Por fim, o gráfico 3 contém todos os tipos de modelos analisados no trabalho, por meio do qual é possível notar que ao utilizar espessura de 300 mm, com solo reforçado, garante-se um ótimo desempenho em comparação com o modelo de 50 mm, que com o solo não reforçado e utilizando o material C25, não oferece um bom desempenho, obtendo uma força máxima de 28,63 kN. Para o gráfico (4), apresenta os dados dos deslocamentos obtidos durante a aplicação da força.

Gráfico 3: Comparação das forças máximas obtidas pelos modelos numéricos



Fonte: Autoria própria (2022).

Gráfico 4: Comparação dos deslocamentos obtidas pelos modelos numéricos



Fonte: Autoria própria (2022).

## 7.2 Resposta ao dano dos modelos numéricos

Nesta seção serão apresentadas as imagens das respostas dos modelos numéricos, referente aos danos causados pelo deslocamento aplicado, para as

condições com sub-base reforçada e para a alteração na espessura da camada de concreto.

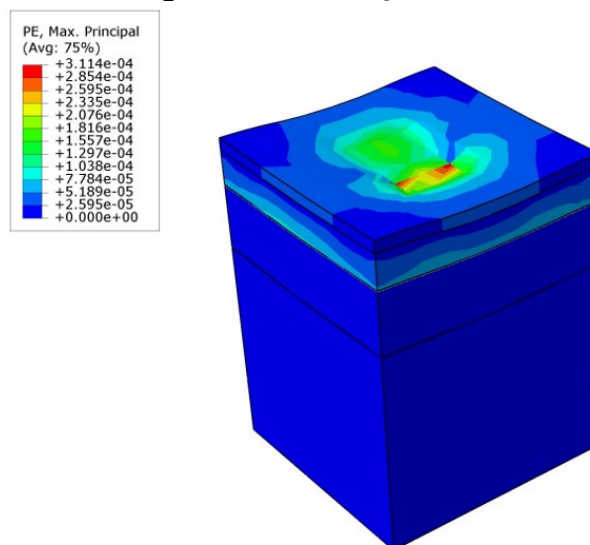
### 7.2.1 Resposta ao dano nos pavimentos C25

Nesta seção serão apresentadas as figuras obtidas pelo *software Abaqus*, dos danos causados pelo deslocamento aplicado com o valor de 200 kN.

#### 7.2.1.1 Pavimento C25 (Sub-base não reforçada) - ESP50 e ESP300

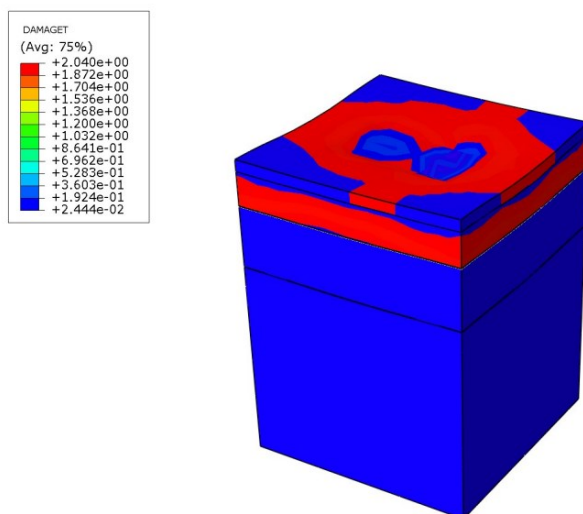
Com a apresentação da figura (13) e (14), o resultado da deformação plástica e da tração demonstram que a força aplicada na camada de concreto transfere para a base, o que finda por gerar as fissuras, isso significa dizer que o material C25 não suporta a carga aplicada.

**Figura 13: Deformação Plástica**



Fonte: Autoria própria (2022).

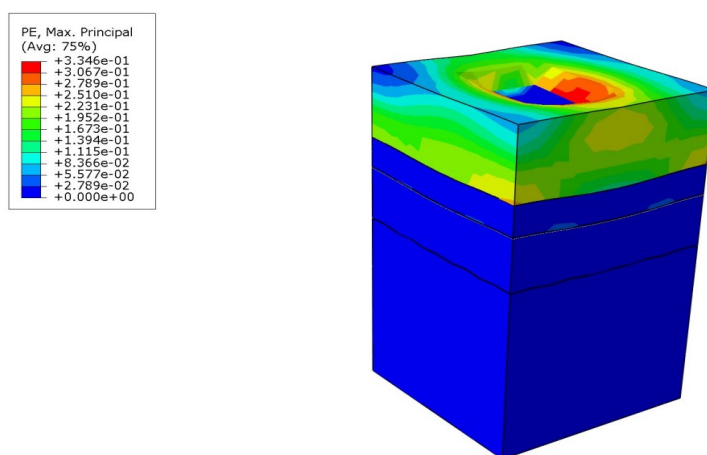
**Figura 14: Dano à Tração**



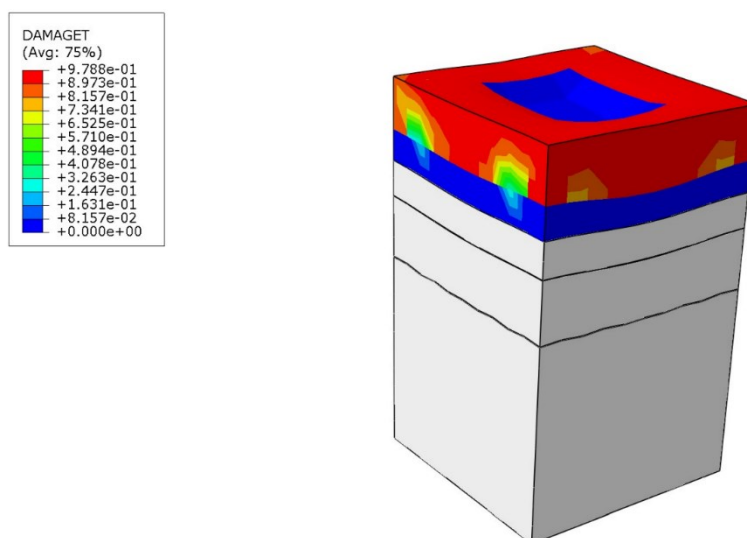
Fonte: Autoria própria (2022).

Com a espessura de 300 mm, o pavimento se comporta de maneira oposta à espessura de 50 mm, o que podemos observar nas figuras (15), (16), as quais demonstram que o deslocamento aplicado na camada de concreto, ocasiona grande parte das fissuras no revestimento. Nesse caso, há a transferência somente para a base, de poucas deformações.

**Figura 15: Deformação Plástica**



Fonte: Autoria própria (2022).

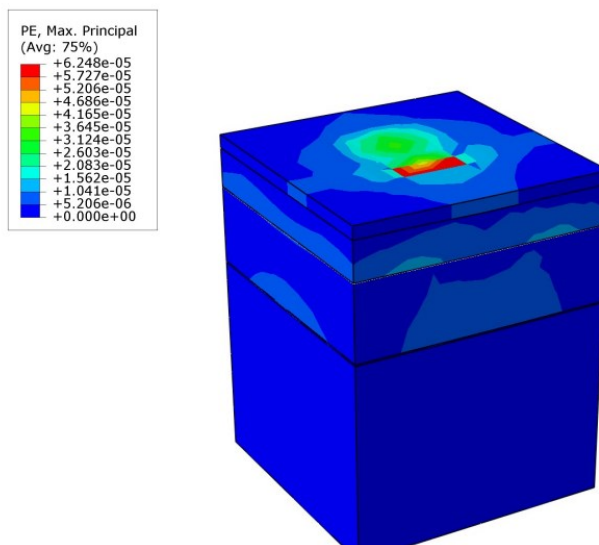
**Figura 16:Dano à Tração**

Fonte: Autoria própria (2022).

#### 7.2.1.2 Pavimento C25 (Sub-base reforçada)

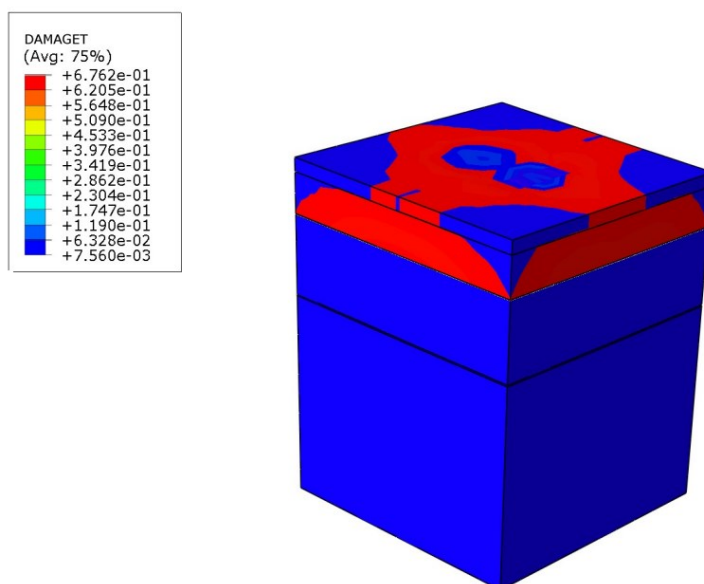
Para esse tipo de situação, o pavimento com espessura de 50 mm, representado na figura (17) e (18), demonstra a deformação plástica e a tração. É possível, pois, notar o alto índice de deformação e o surgimento de fissuras no revestimento do concreto. Assim, pode-se afirmar que a deformação começa pelo concreto, apesar do auxílio da sub-base reforçada a deformação é transferida para as outras camadas.

Figura 17: Deformação Plástica



Fonte: Autoria própria (2022).

Figura 18: Dano à Tração

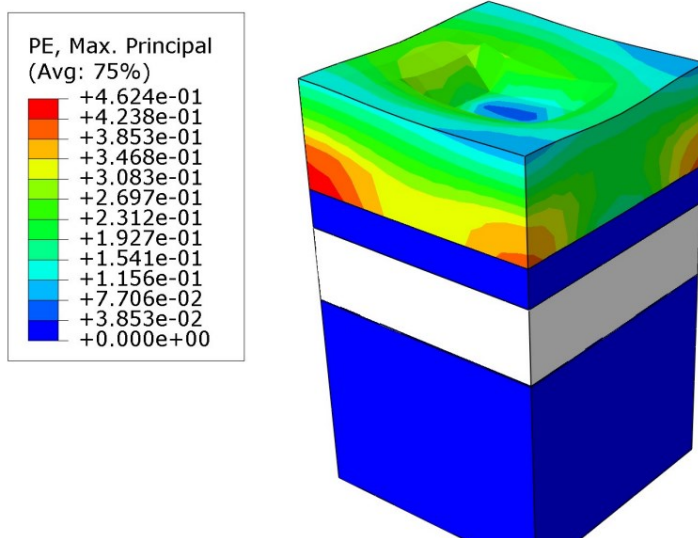


Fonte: Autoria própria (2022).

Para a espessura de 300 mm, conforme as figuras (19) e (20), há a presença de deformações e fissuras na camada de concreto. Isso pode ser justificado pela

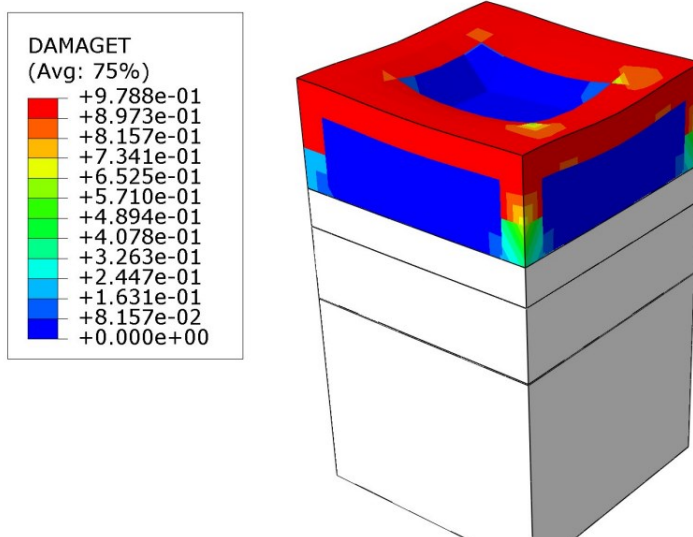
grande espessura, que faz com que o deslocamento permaneça concentrado no revestimento.

**Figura 19: Deformação plástica**



Fonte: Autoria própria (2022).

**Figura 20: Dano à Tração**



Fonte: Autoria própria (2022).

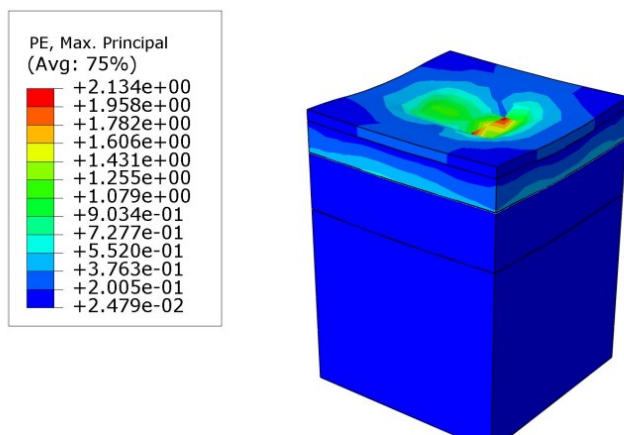
## 7.2.2 Resposta ao dano nos pavimentos UHPFRC

Nesta seção serão apresentadas as imagens dos danos causados para o deslocamento de 200 kN, utilizando o material UHPFRC, com parâmetros de espessura de concreto.

### 7.2.2.1 Pavimento UHPFRC (Sub-base não reforçada)

Observa-se na figura (21) e (22) uma alta concentração de deformação e tração localizada na base. O presente modelo apresenta uma camada mais fina, realçando as chances de a camada de concreto não suportar, e, por isso, transferir o esforço que está recebendo para a outra camada (base).

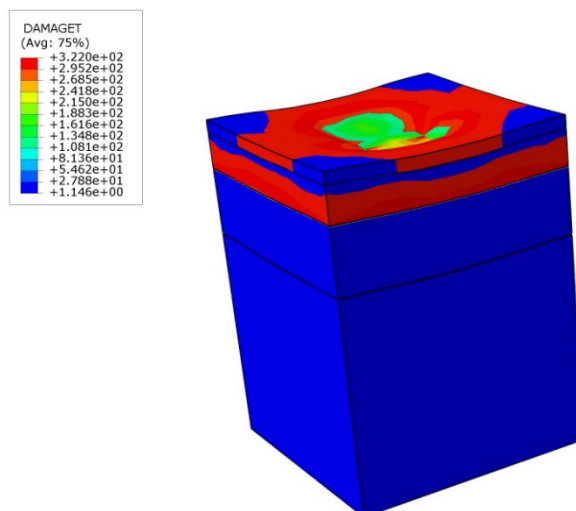
**Figura 21: Deformação Plástica**



Fonte: Autoria própria (2022).



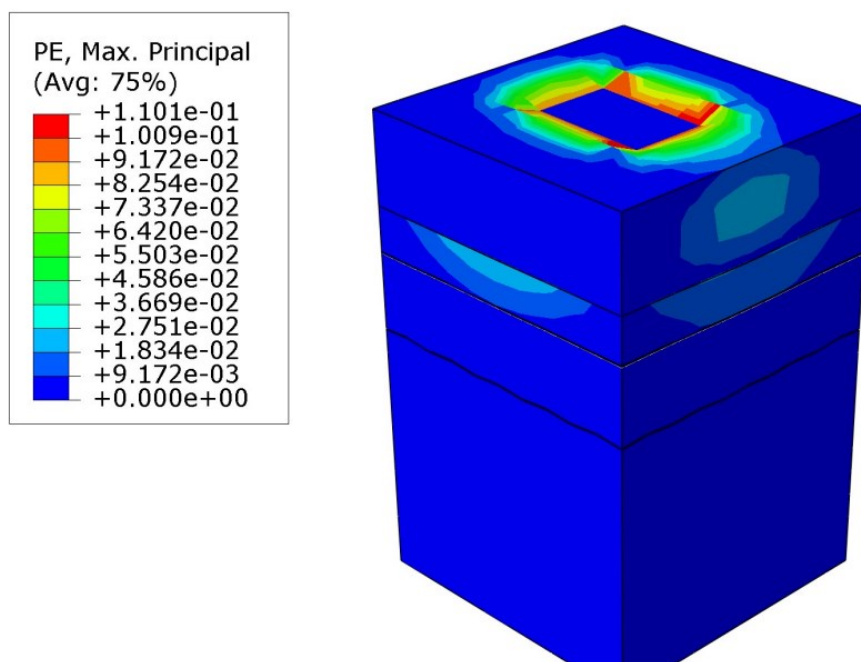
**Figura 22: Dano à Tração**



Fonte: Autoria própria (2022).

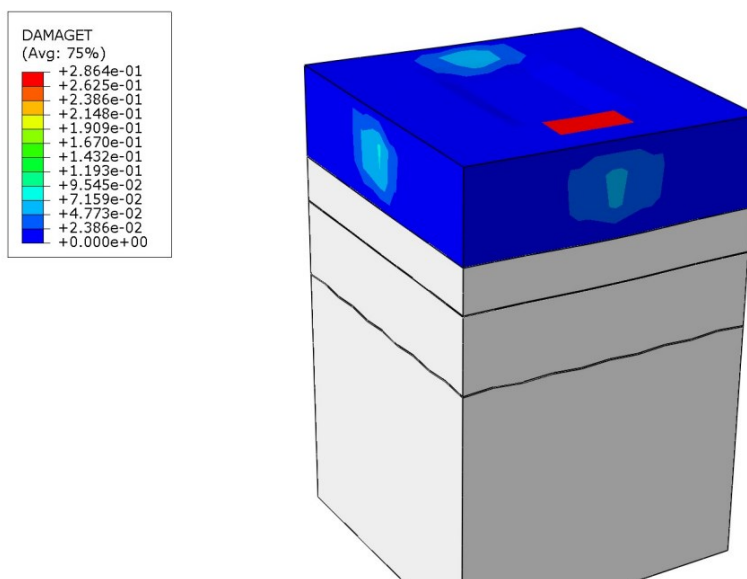
Para o modelo de espessura de 300 mm, apresentado pela figura (23), nota-se o surgimento de deformação plástica no revestimento de concreto, a qual é transferida para a base do pavimento. Na figura (24), apresenta-se a baixa concentração de fissuras localizadas na camada de concreto.

**Figura 23: Deformação Plástica**



Fonte: Autoria própria (2022).

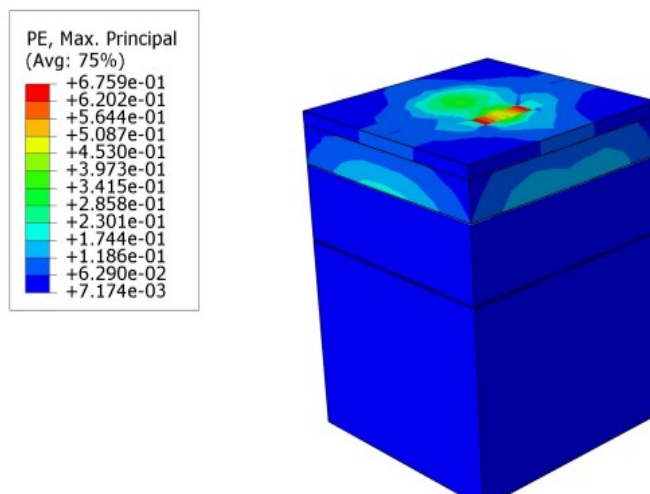
**Figura 24: Dano à Tração**



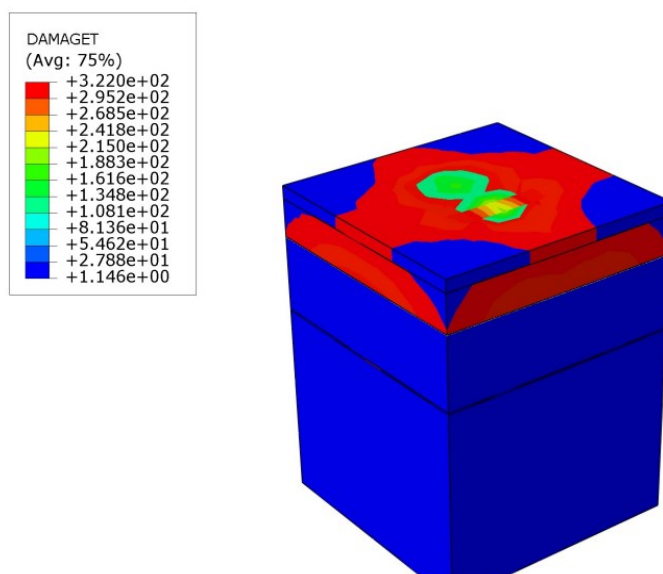
Fonte: Autoria própria (2022).

### 7.2.2.2 Pavimento UHPFRC (Sub-base reforçada)- ESP50 e ESP300

Com a sub-base reforçada, como é possível observar nas figuras (25) e (26), tem-se que o dano é menor quando comparado com os modelos em que a sub-base não é reforçada (figura 23). Ou seja, o efeito das fibras de concreto auxilia para que as tensões de tração sejam distribuídas em torno das regiões de concentração dos esforços, o que possibilita a transferência das tensões para as outras camadas do pavimento. O reforço na sub-base auxilia para que o modelo não tenha uma alta deformação no pavimento, como representado nas figuras (27) e (28). Observa-se, nas figuras (27) e (28), a ocorrência de esmagamento em torno do local onde o deslocamento é aplicado.

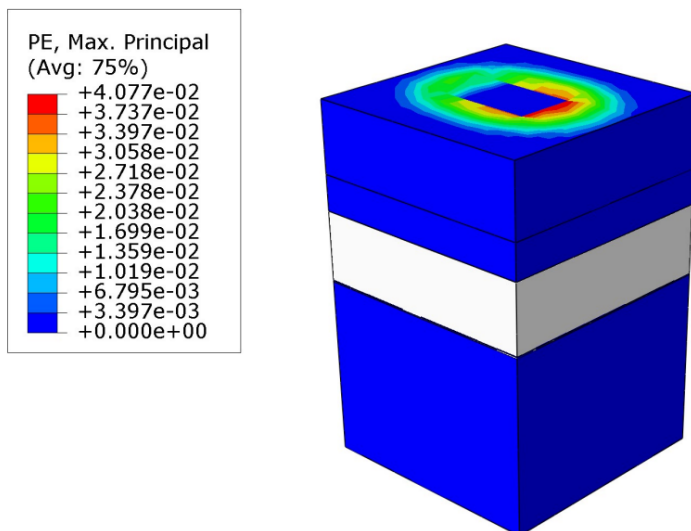
**Figura 25: Deformação Plástica**

Fonte: Autoria própria (2022).

**Figura 26: Dano à Tração**

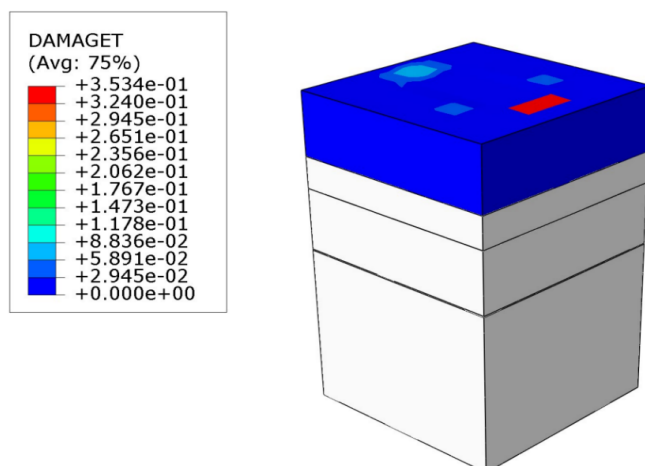
Fonte: Autoria própria (2022).

**Figura 27: Deformação Plástica**



Fonte: Autoria própria (2022)

**Figura 28: Dano à Tração**



Fonte: Autoria própria (2022).

### 7.2.3 Análise dos modelos numéricos ao dano entre C25 e UHPFRC

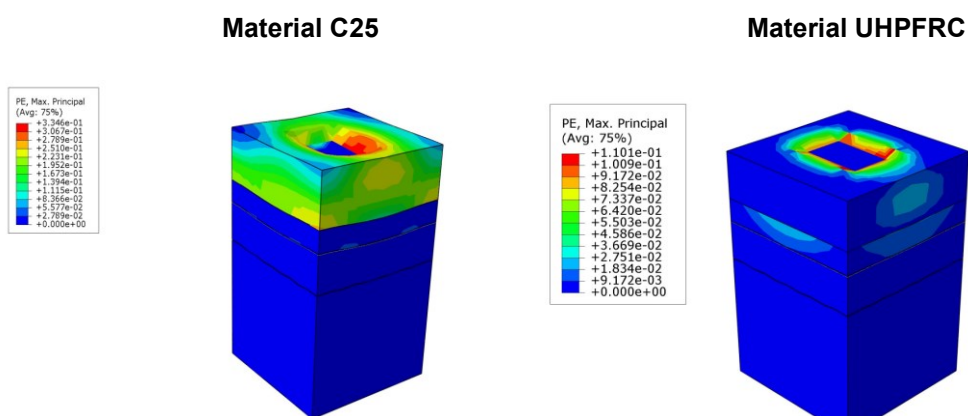
Nesta seção serão apresentadas as imagens dos danos causados para o deslocamento de 200 kN, momento em que é realizada uma comparação entre os materiais C25 e UHPFRC, com foco na espessura de 300 mm. Com base nas figuras, é perceptível que os danos causados pelo deslocamento no pavimento de UHPFRC

são menores quando comparados com o material C25, o que é possível, pois apresenta uma resistência à tração muito baixa.

### 7.2.3.1 Pavimento C25 e UHPFRC com sub-base não reforçada

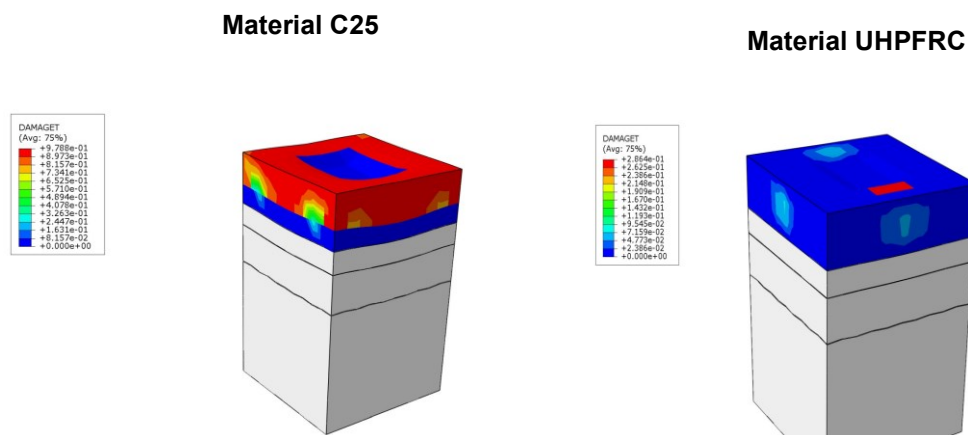
Observa-se nas figuras (29) e (30) que o material C25 apresenta mais danos quando comparado com o material UHPFRC.

**Figura 29: Análise na deformação Plástica**



Fonte: Autoria própria (2022).

**Figura 30: Análise no Dano à Tração**

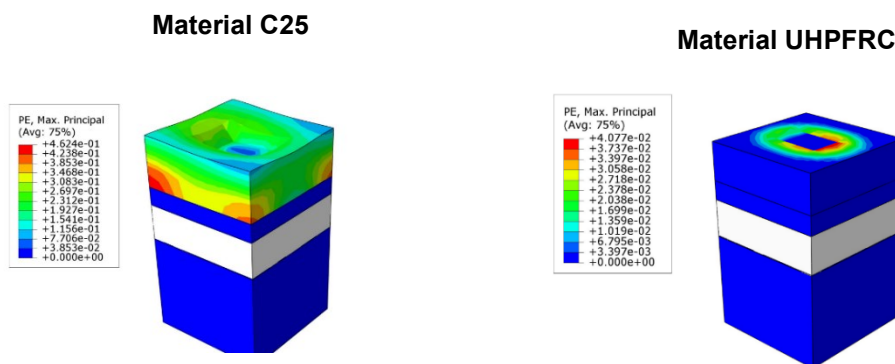


Fonte: Autoria própria (2022).

### 7.2.3.2 Pavimento C25 e UHPFRC com sub-base reforçada

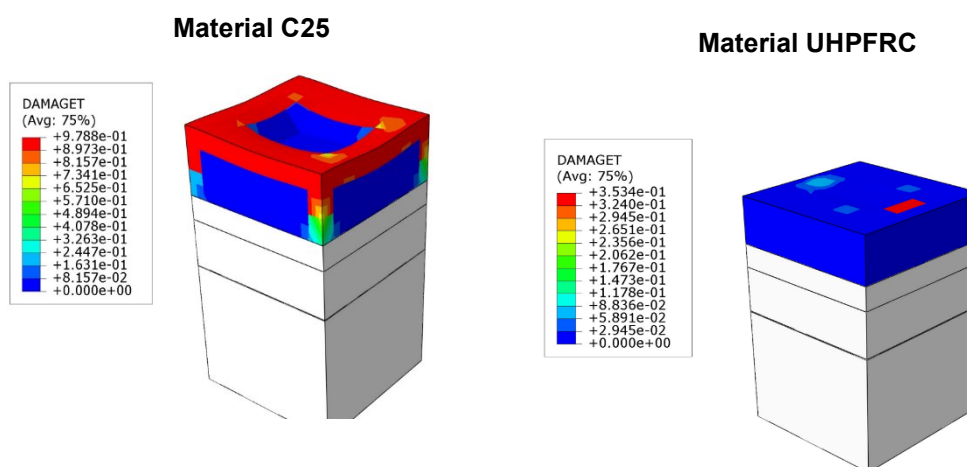
Para o modelo com sub-base reforçada, como pode ser observado nas figuras (31) e (32), ocorre a deformação plástica e a solicitação de tração no material C25. Nota-se, a grande quantidade de deformação, fissuras e esmagamento. Quanto ao material UHPFRC, a deformação do modelo é quase inotável. Sendo assim, apesar dos materiais serem diferentes, é possível notar que, em ambos os modelos, há o surgimento de fissuras e de deformações. Logo, esses problemas ocorrem somente na camada de concreto, ou seja, não é transferido para as outras camadas.

**Figura 31: Análise na deformação plástica**



Fonte: Autoria própria (2022).

**Figura 32: Análise no Dano à Tração**



Fonte: Autoria própria (2022).

## 8 CONCLUSÃO

Nesta seção serão apresentadas as conclusões sobre os resultados da simulação numérica, dos modelos de pavimento constituído de concreto classe C25 e do concreto de alto desempenho reforçado por fibras (UHPFRC). Sendo o principal foco formalizar um estudo comparativo do UHPFRC com concreto C25, com sub-base não reforçada ou reforçada. Ao alterar a espessura do concreto, foi aplicado um carregamento com regime estático, em seguida, foi realizada uma análise de como será o comportamento do modelo.

A partir das discussões dos resultados obtidos, pode-se concluir que os modelos numéricos demonstram precisão, sendo fornecidos por Gidrão (2022). A resistência dos pavimentos constituída pelo material UHPFRC foi maior em comparação com os modelos C25. Além disso, com os resultados de deformação plástica, nos modelos de UHPFRC, foi visualmente menor em comparação com os modelos C25. Para os modelos com sub-base reforçada, é possível observar que a deformação é visualmente menor, independente do material, apesar de que para o material UHPFRC as fissuras e a deformação são quase inotáveis.

Sendo assim, é importante destacar a presença das fibras no UHPFRC, mostrando-se um fator relevante na resistência máxima no pavimento, pois a fibra distribui as tensões, atuando como micro-reforço, como pode ser observado nas imagens de dano.

Sobre o modo de falha nos pavimentos de concreto de classe C25, falham por cisalhamento e por tensão normal, devido à resistência à tração muito baixa, o que gera a falha. Com os resultados obtidos pode-se concluir que fica inviável produzir pavimentos com concretos C25, com espessura de 50mm, por apresentar baixo desempenho.

Com os resultados obtidos, então, conclui-se que o pavimento UHPFRC com sub-base reforçada pode ser uma solução eficiente para aeroportos de pequeno porte, suportando os jatinhos, Dassault, Pilatus PC-24 e Bombardier Challenger 350, justamente por apresentar uma solução eficiente para a utilização e com uma elevada resistência.

## REFERÊNCIAS

ABCP, Agência brasileira de cimento Portland. SNIC SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DE CIMENTO. Pavimento de concreto amplia presença no país. Disponível em: . Acesso em: mar. 11AD.

ABCP, Agência brasileira de cimento Portland. Folheto Estradas de concreto: este é o caminho. São Paulo: São Paulo, 2013. 20 p.

ABCP, Associação brasileira de cimento Portland. Dimensionamento dos pavimentos rodoviários de concreto. 10.ed. São Paulo,1998. 44p. (ET-14)

ABCP, Associação brasileira de cimento Portland. Construção de pavimentos de concreto simples. 3.ed. São Paulo, Associação Brasileira de Cimento Portland, 1998. 88 p. (ET-81)

**ABNT NBR 6118:2014:** projeto de estruturas de concreto .: procedimento. Projeto de estruturas de concreto — Procedimento. Disponível em: <https://docente.ifrn.edu.br/valtencirgomes/disciplinas/construcao-de-edificios/abnt-6118-projeto-de-estruturas-de-concreto-procedimento>. Acesso em: 18 jun. 2022

ALMEIDA, Jordana Vieira de. **MODELAGEM NUMÉRICA TRIDIMENSIONAL DE PAVIMENTOS DE CONCRETO SUBMETIDOS ÀS CARGAS DO TRÁFEGO E AO EMPENAMENTO TÉRMICO.** 2019. Disponível em: <https://pantheon.ufrj.br/handle/11422/14013>. Acesso em: 05 abr. 2022.

ALSALMAN, A. et al. Evaluation of modulus of elasticity of ultra-high performance concrete. Construction and Building Materials, Elsevier Ltd, v. 153, p. 918–928, 2017. ISSN 09500618. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.07.158. Disponível em: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061817315015>.

BACHE, H. Densified cement ultrafine particle-based materials. 2 nd Int. Conf. on Superplasticizers in concrete, Ottawa, p 33. 1981.

BALBO, J. T. “Pavimentação Asfáltica – Materiais, Projeto e Restauração”. Oficina de textos, São Paulo, 2007

BALBO, J.T. **Pavimentos de Concreto.** Oficina de Textos. São Paulo,2009

BEZERRA, Julia Suzuki. **Website do Círculo de Mohr para estado plano de tensões.** Disponível em: <http://www.puc->



rio.br/ensinopesq/ccpg/pibic/relatorio\_resumo2019/download/relatorios/CTC/CIV/CIV-Julia%20Suzuki%20Bezerra.pdf. Acesso em: 02 abr. 2022.

BIRCHALL, J., HOWARD, A., KENDALL, K. Concrete approach to the energy crisis. Metallurgist and Materials Technologist, 1983

CALORI, Leonardo Mateus. MODELAGEM NUMÉRICA E ANÁLISE COMPARATIVA EM VIGAS I PROTENDIDAS CONSTITUÍDAS DE UHPFRC. **Tese de Conclusão de Curso**, Guarapuava, v. 1, n. 1, p. 1, dez./2021.

CASAGRANDE, C. A. Desempenho de microfibras de aço funcionalizadas com silanos em concreto de ultra-alto desempenho reforçado com fibras. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2017.

CARREIRA; CHU. Stress-strain relationship for plain concrete in compression. ACI Journal, 82(6), n. 6, p. 797–804, 1985.

CAVILL, B; REBENTROST, M; PERRY, V. Ductal®: An Ultra-High Performance material for resistance to blasts and impacts. 1st Specialty Conference on Disaster Mitigation (CSCE), p. 1–10, 2006. CHI, Y.; YU, M.; HUANG, L.; XU, L. Finite element modeling of steel-polypropylene hybrid fiber reinforced concrete using modified concrete damaged plasticity. Engineering Structures, 2017.

Chequer Jabour Chequer. **MANUAL DE PAVIMENTAÇÃO**: dnit. DNIT. Disponível em: [https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/6810663/mod\\_resource/content/1/Manual%20de%20Pavimenta%C3%A7%C3%A3o%20-%20DNIT%20%282006%29.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/6810663/mod_resource/content/1/Manual%20de%20Pavimenta%C3%A7%C3%A3o%20-%20DNIT%20%282006%29.pdf). Acesso em: 15 ago. 2022.

COSTA, Jochezan da Silva. **ANÁLISE COMPARATIVA DE ALTERNATIVAS PARA PAVIMENTAÇÃO DE RODOVIAS: PAVIMENTO FLEXÍVEL X PAVIMENTO RÍGIDO**. 2013. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/36201#:~:text=Concluiu%20que%20a%20pavimenta%C3%A7%C3%A3o%20r%C3%ADgida,e%20de%20elabora%C3%A7%C3%A3o%20mais%20sOfisticada..> Acesso em: 15 abr. 2022.

DAS, B. M. Fundamentos de Engenharia Geotécnica. 7o ed. São Paulo, 2014.

DINATO, Antonio Carlos. ANÁLISE DOS PERFIS LONGITUDINAIS TRANSVERSAL DE PISTA DE POUSO DE DECOLAGEM COM A UTILIZAÇÃO DO GPS EM AEROPORTOS. **DISSERTAÇÃO**, SÃO CARLOS, v. 1, n. 1, p. 1, jun./2001.

Diretoria de Planejamento e Pesquisa / IPR. **Pavimento rígido – Defeitos – Terminologia**. Disponível em: [https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/terminologia-ter/dnit\\_061\\_2004\\_ter-1.pdf](https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/terminologia-ter/dnit_061_2004_ter-1.pdf). Acesso em: 10 jun. 2022.

GIDRÃO, G. D. M. S. Estudo numérico e experimental do comportamento cíclico de vigas I protendidas de concreto de altíssimo desempenho. **TCC**, SÃO CARLOS, v. 1, n. 1, p. 1-281, jul./2020.

GIDRÃO, E.C. Estudo numérico e experimental do comportamento cíclico de vigas I protendidas de concreto de altíssimo desempenho. 2020. Tese de Doutorado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2020.

GIDRÃO, T. M. M. E. D. G. D. M. S. **APOSTILA ABAQUS**. 1. ed. Guarapuava: [s.n.], 2021.

GIDRÃO, G.M.S.; KRAHL, P.A.; CARRAZEDO, P. Numerical modeling and design of precast prestressed UHPFRC I beams. *Rev. IBRACON Estrut. Mater.*, vol. 14, no. 3, e14310, 2021.

GONDIM, Yêda Cordeiro. **DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS DE CONCRETO UTILIZANDO O PROGRAMA COMPUTACIONAL KENSLABS 2004 E COMPARAÇÃO COM O MÉTODO DA PCA 1984**. 2008. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/4078>. Acesso em: 12 maio 2022.

GRANATO, E.C. Reforço de vigas de concreto armado utilizando concreto de ultra alto desempenho reforçado com fibras. 2020 Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Universidade Estadual de Campinas. 2020.

GRAYBEAL. Compressive behavior of Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete. *ACI Materials Journal*, v. 104, n. 2, 2007. DOI: 10.14359/18577

GRAYBEAL, B.; TANESI, J. A Cementitious Long-Life Wearing Course to Reduce Frequency of Maintenance Works on High-Traffic Roads. *Transport Research Arena Europe 2008*. Anais.Ljubljana: 2008.

KOH, K. et al. Shrinkage Properties of Ultra-High Performance Concrete (UHPC). *Advanced Science Letters*, v. 4, n. 3, p. 948–952, 1 mar. 2011.

KRAHL; CARRAZEDO; DEBS, El. Mechanical damage evolution in UHPFRC: Experimental and numerical investigation. *Engineering Structures*, v. 170, 2018. ISSN 18737323. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.05.064.

LUBLINER, J. et al. A plastic-damage model for concrete. *International Journal of Solid and Structures*, v.25, n.3, p.299-326, 1989. ISSN 00207683. DOI: 10.1016/0020-7683(89)90050-4.

MAIA, B. R. C. E. R. D. PAVIMENTOS RIGIDOS EM RODOVIAS. **Monografia**, Minas Gerais, v. 1, n. 1, p. 1-45, dez./2014.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concreto: microestrutura, propriedades e materiais. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2014, 782 p. OLIVEIRA, C.O. Estudo numérico e experimental da distribuição das fibras de aço em vigas de UHPFRC. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. 2019.

OLIVEIRA, Elias Enes de. **MODELAGEM GEOMECÂNICA PARA REATIVAÇÃO DE FALHAS GEOLÓGICAS EM RESERVATÓRIOS DE ÁGUAS PROFUNDAS**. 2018. Disponível em: <https://app.uff.br/riuff/handle/1/7084>. Acesso em: 18 out. 2022.

PARANÁ. Engº Alexsander Maschio. Crea-Pr. **Vantagens do pavimento de concreto**: infraestrutura, mobilidade e transporte. Infraestrutura, Mobilidade e Transporte. Disponível em: [vantagens do pavimento de concretohttps://agendaparlamentar.crea-pr.org.br](https://agendaparlamentar.crea-pr.org.br) >. Acesso em: 01 maio 2022.

PINTO, C. DE S. Curso Básico de Mecânica dos Solos. 3o ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006

PITTA, M.R. “Dimensionamento de Pavimentos Rodoviários e Urbanos de Concreto pelo Método PCA (1984)”. ET-97, 3ed, publicação Associação Brasileira de Cimento Portland, São Paulo, 1998.

PITTA, M.R. “Concreto Rolado: Aplicações em Pavimentação”. ET-10, 7ed, publicação Associação Brasileira de Cimento Portland, São Paulo, 1998. PITTA, M.R. “Construção de Pavimentos de Concreto Simples”. ET-81, 3ed, publicação Associação Brasileira de Cimento Portland, São Paulo, 1998.

REDA, M. M.; SHRIVE, N. G.; GILLOTT, J. E. Microstructural investigation of innovative UHPC. v. 29, n. April 1998, p. 323–329, 1999.

RESPLENDINO, J. First recommendations for Ultra-High-Performance Concretes and examples of application. Proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete. Anais...Kassel: 2004.

RESISTÊNCIA DE PAVIMENTOS DOS AERÓDROMOS IAC 157-1001. Disponível em:

<http://professor.pucgoias.edu.br/SiteDocente/admin/arquivosUpload/14878/material/Aula%2012%20-%20RESIST%C3%8ANCIA%20DE%20PAVIMENTOS.pdf>. Acesso em: 12 jun. 2022.

REZENDE, Carlos William de Almeida. **ESTUDO DO IMPACTO DURANTE O POUSO DE AERONAVES MODERNAS PESADAS EM PAVIMENTOS FLEXÍVEIS DE PISTAS DE AEROPORTOS**. 2018. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/59663>. Acesso em: 26 maio 2022.

RICHARD, P.; CHEYREZY, M. Composition of reactive powder concretes. Cement and Concrete Research, v.25, n.7, p.1501-1511, 1995.

RUFINO, D.M.S. “Estudo dos Procedimentos de Dimensionamento e dos Novos Programas de Análise de Tensões em Pavimentos de Concreto”. Tese de Mestrado, COPPE/ UFRJ, Rio de Janeiro, 1997.

SANTOS, J. S. D. D; OLIVEIRA, M. D. S. C. D. DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS DE CONCRETO PARA AEROPORTOS REGIONAIS. **19º Congresso Nacional de Iniciação Científica**, Mauá, v. 1, n. 1, p. 1-4, set./2021.

SILVA, Lauro Lúcio Martins. **Avaliação Superficial de Pavimentos, usando o método IGG, (Índice de Gravidade Global): Um estudo de caso, em um trecho na Av. Anhanguera, em Goiânia, Goiás.**: um estudo de caso, em um trecho na av. anhanguera, em goiânia, goiás.. Um estudo de caso, em um trecho na Av. Anhanguera, em Goiânia, Goiás.. 2019. Disponível em: <https://repositorio.ifg.edu.br/handle/prefix/380?mode=full>. Acesso em: 15 mar. 2022.

SIMULA ABAQUS. ABAQUS 2017: Analysis User’s Guide. Dassault Systemes Simulia Corp, Providence, RI, USA, 2017.

TOLEDO FILHO, R. D. et al. Performance assessment of Ultra High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites in view of sustainability. *Materials and Design*, v. 36, p. 880–888, 2012.

TUTIKIAN, B.F.; ISAIA, G.C; HELENE, P. Concreto de Ultra-Alto Desempenho. In: ISAIA, Geraldo Cechella (Ed.). *Concreto: Ciência e Tecnologia.*: IBRACON, 2011.

UNESP. **Apostila de aeroportos**. 1. ed. Ilha Solteira: [s.n.], 2016. p. 1-26.

VIZZONI, Eng.O Ronaldo. **PAVIMENTO DE CONCRETO**: solução sustentável e custo competitivo. SOLUÇÃO SUSTENTÁVEL E CUSTO COMPETITIVO. Disponível em: <https://abcic.org.br/Arquivos/j3yu0bt3.pdf>. Acesso em: 10 maio 2022.

WIRTGEN GROUP. **Construção de novos aeroportos**. Disponível em: <https://www.wirtgen-group.com/pt-br/aplicacoes/construcao-de-aeroportos/construcao-de-novos-aeroportos/>. Acesso em: 28 abr. 2022.

YANG; JOH; KIM. Flexural strength of large-scale ultra-high performance concrete prestressed T-beams. *Canadian Journal of Civil Engineering*, v. 38, n. 11, p. 1185–1195, 2011. ISSN 03151468. DOI: 10.1139/I11-078