

## APLICAÇÃO DO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS NA ANÁLISE DE CONCRETO ASFÁLTICO CONTENDO RAF COMO AGREGADO

### APPLICATION OF FINITE ELEMENT METHOD ANALYSIS OF HOT MIX ASPHALT WITH WFS AS AN AGGREGATE

Paulo Paiva Oliveira Leite Dyer<sup>1</sup>  
Gustavo José Lauer Coppio<sup>2</sup>  
Luciana de Simones Cividanes<sup>3</sup>  
Silvelene Alessandra Silva<sup>4</sup>  
Luis Miguel Gutierrez Klinsky<sup>5</sup>  
Dimas Betioli Ribeiro<sup>6</sup>  
Maryangela Geimba de Lima<sup>7</sup>

**Resumo:** O reuso de resíduos industriais, como Resíduo de Areia de Fundação (RAF), é uma alternativa para redução do uso de agregados minerais. Estes resíduos são similares aos agregados utilizados na pavimentação asfáltica; todavia, é preciso comprovar sua viabilidade técnica. Neste sentido, modelos computacionais por Métodos de Elementos Finitos (MEF), complementam resultados empíricos, simulando o comportamento deste pavimento alternativo. Neste artigo foi construído um modelo computacional com MEF, simulando o comportamento do Concreto Betuminoso Usinado à Quente (CBUQ) contendo RAF como agregado no ambiente do software Abaqus. O modelo foi validado ao comparar dados resposta com resultados empíricos. Em seguida foi analisando quanto ao seu comportamento mecânico e em dois estudos de caso. Os resultados obtidos foram satisfatórios quando comparados a resultados empíricos. Confirmando a aplicabilidade do MEF na engenharia rodoviária, particularmente em CBUQ contendo RAF.

**Palavras-chave:** MEF, RAF, Módulo de resiliência, Pavimentação asfáltica.

**Abstract:** Industrial waste reusing, such as Waste Foundry Sand (WFS) is an alternative to reducing mineral aggregates use. This waste is similar to the aggregates; however, it is necessary to prove its technical viability. In this sense, computational models by Finite Element Methods (FEM) complement empirical results, simulating the behavior of this alternative pave. In this paper, a computational model was built using FEM, simulating the behavior of Hot Mix Asphalt (HMA) containing WFS as an aggregate in the Abaqus software environment. This model was validated by comparing response data with empirical results. And then, analyzed for its mechanical

---

<sup>1</sup> Pesquisador do Instituto de Estudos Avançados (IEAv), Departamento de Fotônica. E-mail: paulo\_dyer@yahoo.com.

<sup>2</sup> Mestre em ciências pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica, professor pleno no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia São Paulo. E-mail: gustavocoppio@gmail.com.

<sup>3</sup> Professora plena no Instituto Tecnológico de Aeronáutica na área de Química Analítica. E-mail: lu\_civi@yahoo.com.br.

<sup>4</sup> Bolsista de Pós-Doutorado em sínteses químicas para propelentes à jato no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. E-mail: mauricio@feevale.br.

<sup>5</sup> Doutor em Engenharia de Transportes na Universidade de São Paulo. E-mail: luisgk@outlook.com.

<sup>6</sup> Doutor em Ciências pela USP, Professor pleno na USP e IFSP, Professor pleno no Instituto Tecnológico de Aeronáutica. E-mail: dimasbetioli@gmail.com.

<sup>7</sup> Professora plena no ITA e outras instituições, Pró reitora de pesquisas no Instituto Tecnológico de Aeronáutica. E-mail: magdlima@gmail.com.

behavior and in two case studies. The results obtained were satisfactory when compared to empirical results. Confirming the applicability of FEM in road engineering, particularly in HMA containing WFS.

**Key words:** FEM, WFS, Resilience Module, Asphalt paving.

## 1 INTRODUÇÃO

A análise estrutural da camada de rolamento de CBUQ possui grande importância no projeto rodoviário, uma vez que, isola fisicamente as demais camadas do projeto das ações climáticas (como pluviosidade e variações térmicas) e ainda propaga os esforços verticais do tráfego a estas camadas devido a sua susceptibilidade viscoelástica (Senço, 1997; Bernucci et al., 2008).

Bernucci et al. (2008) explicam que a estruturação do projeto se resume em um terreno que passou por terraplanagem, com camadas granulares depositadas e compactadas sobre este, sendo finalizado por uma camada de rolamento de CBUQ; constituído por uma mistura de agregados minerais e cimento asfáltico. De acordo com Motta (1991), esta configuração, amplamente difundida e utilizada, tem por objetivo distribuir uniformemente cargas normais do tráfego de veículos, através das camadas até o solo. Com isso, a capacidade resiliente do CBUQ é um fator determinante para a longevidade da vida útil do projeto; contribuindo para estimativas da elasticidade e módulo de Young do CBUQ através do ensaio de MR, determinando a capacidade de resistir e propagar esforços (Yoder & Witczak, 1975, Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes [DNIT], 2018).

Apesar de difundida, a estruturação destes projetos impõe um alto custo ao meio ambiente, pelo consumo de agregados minerais, afirmam Willett (2020). Assim, o emprego de materiais alternativos contribui para a redução de impactos ambientais; porém, ainda deverão manter os requisitos técnicos de resiliência (Dyer et al. 2021). Neste contexto, os RAF, são potenciais alternativas aos agregados minerais empregados em CBUQ; uma vez que são classificados como resíduos não perigosos com características físico-químicas muito próximas aos agregados minerais (Associação Brasileira de Normas Técnicas [ABNT], 2004; Bonet, 2002). Ademais, o RAF é produzido em grandes quantidades no Brasil, acompanhando a produção de peças metálicas fundidas; contribuindo para o aumento da vida útil dos aterros, visto que o RAF deve ser descartado nestes locais (Associação Brasileira de Fundação [ABIFA], 2021, Bonet, 2002).

Na literatura, ensaios empíricos demonstraram viabilidade técnico e ambiental, do emprego de RAF (originário de siderurgias e aterros sanitários) em CBUQ em taxas (em peso) de 5 a 100% de substituição em relação ao agregado mineral (Bonet, 2002; Coutinho Neto, 2004; Costa, 2008; Coutinho Neto & Fabbri, 2005, Luvizão, 2008, Garcia et al., 2018, Dyer et al., 2020). Demonstrando que além de tecnicamente viável, conforme critérios técnicos (DNIT, 2006), se trata de técnica ambientalmente segura, uma vez que a matriz asfáltica envolve e isola as partículas de RAF, evitando a liberação de substâncias por lixiviação; cujas taxas de substituição de 50% apresentaram os resultados de MR mais satisfatórios (Dyer et al., 2021a).

Neste contexto, ferramentas computacionais contribuem para a projeção de cenários empíricos; sendo capazes de simular deformações decorrentes de esforços doravante do tráfego de veículos, auxiliando na compreensão do comportamento físico do material estudado, salientam Masad et al. (2016). Para tanto, o software Simulia Abaqus v6.7 se apresenta como uma ferramenta computacional com uma

extensa gama de aplicações em problemas de engenharia no âmbito dos elementos finitos (MEF), para obtenção de soluções aproximadas de variáveis como comportamento resiliente (Liu et al., 2017; Elseifi et al., 2018).

Uma vez explanado este problema de pesquisa, o objetivo deste artigo foi a criação e validação de um modelo computacional, utilizando o software Simulia Abaqus v6.7, simulando o comportamento mecânico de um pavimento asfáltico contendo RAF como agregado frente a aplicação de cargas normais.

## 2 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

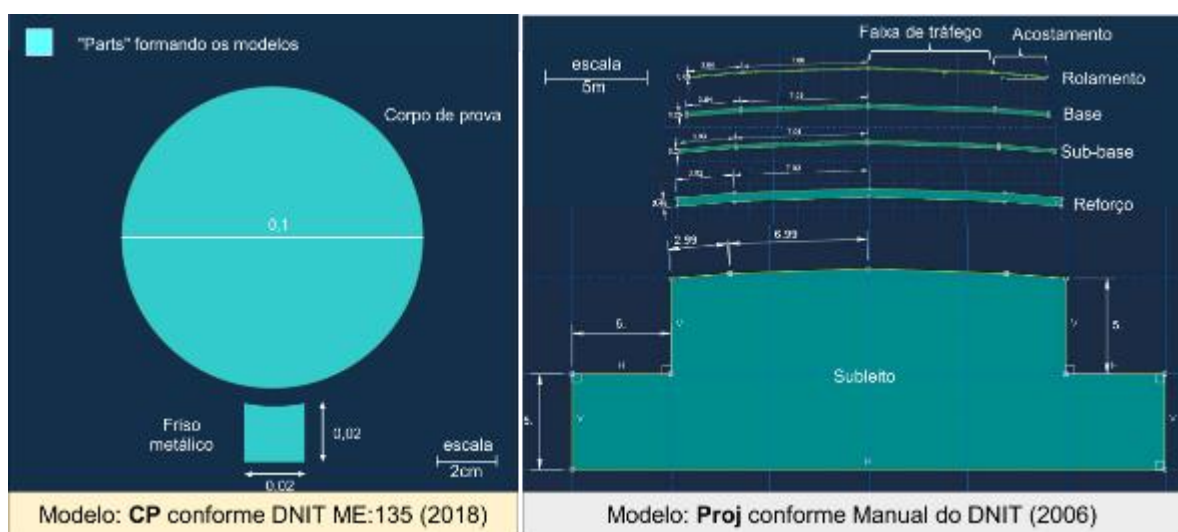
Neste estudo, foram concebidos dois modelos computacionais distintos utilizando o software Simulia Abaqus v6.7. Consistindo de um conjunto de elementos sólidos (aqui denominados “parts”), formando as estruturas: corpo de prova de CBUQ (CP) e camadas de um projeto rodoviário (Proj); objetivando avaliar qual teria a resposta mais precisa em comparação a ensaios empíricos de MR.

Após a escolha do modelo “CP” ou “Proj”, foram realizadas simulações da aplicação de forças de cargas normais constantes “FN”, analisando a resposta mecânica. Em seguida, foram simulados dois cenários em estudos de caso.

### 2.1 CONCEPÇÃO DOS MODELOS

Os modelos; aqui definidos como: “Proj” e “CP”; foram construídos através de etapas típicas do software Abaqus, compostas por pré-processamento, processamento e pós-processamento com Elementos Finitos (EF). O dimensionamento destes foi análogo as definições de projetos rodoviários do Manual da Pavimentação do DNIT (2006); para “Proj”; e corpos de prova cilíndricos de CBUQ; para “CP”; conforme o método de ensaio DNIT ME:135 (2018), como mostra a Tabela 1 e as secções transversais apresentadas pela Figura 1.

Figura 1 - Procedimento de construção do modelo Projeto.



Fonte: Elaborado pelos autores.

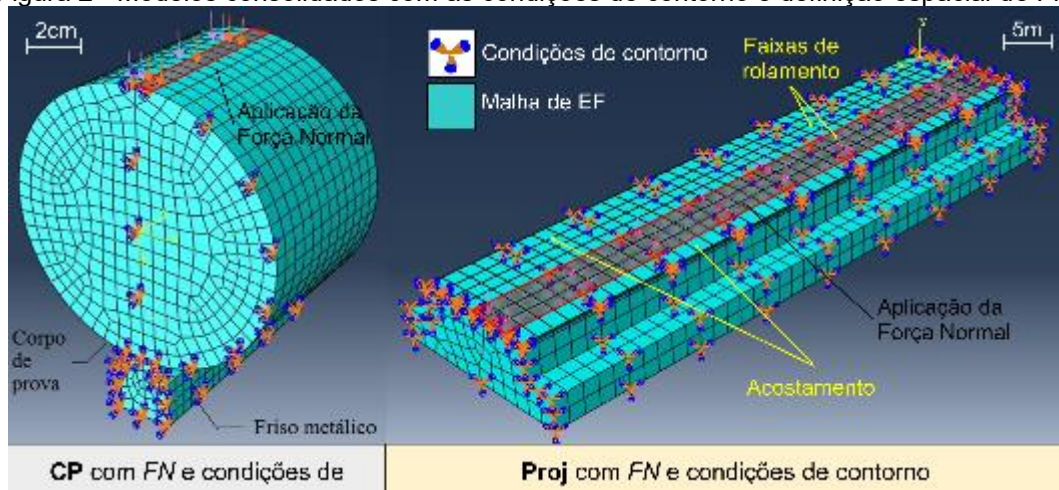
Tabela 1 - Dimensões das “parts”, conforme os modelos.

Modelo	Parts	Dimensões (m)			Referência
		Espessura (H)	Diâmetro (D)	Comprimento (C)	
Proj	Camada de:				
	Rolamento	0,08	20,02		
	Base	0,20	20,02		
	Sub-base	0,20	20,14	100,00	DNIT (2006)
	Reforço	0,46	20,10		
	Subleito	10,00	20,96		
CP	Friso de metal	0,02	0,02	0,07	DNIT ME:135 (2018)
	Corpo de prova	0,10	0,10	0,07	

Fonte: Elaborado pelos autores.

Conforme apresentado pela Tabela 1 e Figura 1, cada modelo foi composto de um conjunto de “parts”. Com “CP” composto por um cilindro (corpo de prova) e friso metálico; tal como ocorre no ensaio de MR (DNIT, 2018). “Proj”, por outro lado, consiste de um conjunto de “parts” representando as camadas de um projeto rodoviário; considerando uma espessura definida para o subleito, mesmo que esta possua uma espessura infinita (Senço, 1997). E assim, as “parts” para ambos os modelos foram conectadas pelas secções transversais, conforme a disposição espacial destas, utilizando a iteração “contato direto” ou “hard-contact” do software.

Em seguida foram definidas regiões de atuação de fatores externos e condições de contorno. Em “CP” foi definida a área superior do corpo de prova, analogamente ao ensaio de MR; com atuação de uma força normal ( $FN$ ) como fator externo. Já em “Proj”, foi tomada uma das faixas de rolamento para aplicação de  $FN$ , simulando o tráfego de veículos. As condições de contorno, por outro lado, foram dispostas de modo a “confinar” as repercussões de  $FN$  somente às “parts”, evitando possíveis distorções; sendo que tal prerrogativa foi a que apresentou o resultado mais coerente. A Figura 2 representa a aplicação de  $FN$  e condições de contorno.

Figura 2 - Modelos consolidados com as condições de contorno e definição espacial de  $FN$ .

Fonte: Elaborado pelos autores.

Os modelos foram convertidos em malhas, utilizando métodos de soluções lineares e quadráticas. Com a definição do número EF por modelo e tipo de deformações, após diversas tentativas em testes de malha, como mostra a Tabela 2. Em teste de malha, um número superior de EF não produziu um refinamento significativo, já um número inferior produziu erros muito elevados. Outrossim, a

aplicação de dois métodos de solução objetivou refinar a escolha do modelo.

Tabela 2 - Dados de entrada para implementação da modelagem para os modelos CP1 e Projeto.

Modelo	Malha Dimensão unitária (m)	EF Número total (n)	Tipo de Elemento		Interações	Deformação
			Linear	Quadrático		
CP	0,0045 x 0,006	3627	Bloco linear de 8 nós com resolução por integrada reduzida e controle de perturbações tipo ampulheta	Bloco quadrático de 20 nós com resolução por integrada reduzida	Iterações: "Hard Contact" ou contato direto	Isotrópica e Homogênea
Proj	2,5x2,5	3160				

Fonte: Elaborado pelos autores.

Em seguida, foram atribuídas as propriedades mecânicas das "parts" e valores para  $FN$  para análise dos modelos. Para "CP" foram atribuídas propriedades de um CBUQ contendo RAF, segundo Dyer et al. (2021a) para o corpo de prova; e propriedades do aço, segundo Callister Jr. (2002) para frisos metálicos. Em "Proj", no entanto, foram atribuídas as mesmas propriedades do corpo de prova de "CP" para camada de rolamento; e propriedades típicas de camadas granulares (base, sub-base, reforço e subleito), conforme Marangon (2018).  $FN$ , no entanto, foram definidas como forças normais aplicadas e distribuídas uniformemente nas regiões definidas pela Figura 2; cujos valores foram os mesmos obtidos por Dyer et al. (2021a) em ensaios MR, pelo método DNIT ME:135 (2018).

No caso das "parts" representando o friso metálico (CP) e camadas granulares (Proj), suas propriedades não variaram. Porém, para o corpo de prova (CP) e camada de rolamento (Proj), foram analisadas cinco CBUQ diferentes, conforme Dyer et al. (2021a): contendo 50 e 100% de RAF (50-RAF e 100-RAF). Com RAF de duas origens: aterro sanitário (RAF-1) e siderurgias (RAF-2); além de um CBUQ "controle" que não contém RAF. Desta forma, a intensidade de  $FN$  variou conforme o tipo de CBUQ utilizado, segundo Dyer et al. (2021a). As Tabelas 3 e 4 apresentam estas propriedades como: densidades " $d$ " ( $\text{kg/m}^3$ ), módulos de Young " $Y$ " (em  $\text{N/m}^2$ ), coeficientes de Poisson " $\delta$ " ( $T^{-1}$ ); além da  $FN$  (em N) variando em função do CBUQ.

Tabela 3 - Propriedades de todas "parts" exceto CBUQ.

Modelo	Parts	Materiais	Variáveis de entrada (Características)			Referência
			$Y$ ( $\text{N/m}^2$ )	$\delta$ ( $T^{-1}$ )	Propriedades	
Proj	Camada de				Material Elástico linear	Marangon (2018)
	Base	Brita 1/2"	$2,7 \cdot 10^9$	0,40		
	Sub-base	Cascalho	$5,5 \cdot 10^9$	0,40		
	Reforço	Solo empréstimo	$7,0 \cdot 10^9$	0,35		
	Subleito	Solo natural	$1,5 \cdot 10^9$	0,45		
CP	Friso de Metal	Aço	$2,1 \cdot 10^{11}$	0,30		Callister Jr. (2002)

Fonte: Elaborado pelos autores.

Tabela 4 - Propriedades dos CBUQ utilizados nos modelos, segundo a literatura utilizada.

Tipos de CBUQ	50-RAF-1	100-RAF-1	50-RAF-2	100-RAF-2	Controle
Teor RAF (%)	50	100	50	100	0
Origem do RAF	Aterro	Aterro	Fundições	Fundições	-
<b>Variáveis de entrada</b>					
Propriedades:	Material elástico linear				
Y (N/m <sup>2</sup> ):	7,1.10 <sup>8</sup>	2,5.10 <sup>8</sup>	4,9.10 <sup>8</sup>	3,4.10 <sup>8</sup>	1,2.10 <sup>8</sup>
d (kg/m <sup>3</sup> ):	2,45	2,40	2,41	2,71	2,48
δ (T <sup>-1</sup> ):	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
RF (N):	2991,00	1904,75	940,25	915,33	2000,00

Fonte: Elaborado pelos autores.

## 2.2 ESCOLHA DO MODELO

Para a escolha do modelo que melhor se aproximou dos resultados empíricos (Dyer et al., 2021a), foram realizadas uma série de análises computacionais, como mostra a Equação (1) com as quantidades de: “A” tipos de CBUQ, “B” tipos modelos analisados (Proj e CP) e “C” soluções numéricas (linear e quadrática) analisadas.

$$[A][B][C] = [5][2][2] = 20 \quad (1)$$

Assim, foram obtidas representações gráficas do comportamento mecânico das “parts”, como: deslocamento total “U” (em metros), RF (forças de reação), forças de contato “COPEN” (em N) e tensões resultantes “S” (em N). E então, a variável “U” foi comparada com resultados empíricos, segundo a Equação (2).

$$E\%(x) = (V_l - V_c)(V_l)^{-1} \quad (2)$$

Onde “E%(x)” representa o erro relativo entre variáveis de deslocamento (U). Com: “V<sub>c</sub>”, representando U obtidas por MEF e “V<sub>l</sub>”, obtidas empiricamente. Sendo realizada a diferença para as vinte análises. Com “x” indicando o método de solução adotado: x = l para linear e x = q para quadrático.

## 2.3 COMPORTAMENTO MECÂNICO

Em seguida o modelo escolhido foi implementado em um novo cenário de simulação: “comportamento mecânico”, utilizando as mesmas condições anteriores. Obtendo assim, novas representações gráficas de U, RF, COPEN e S que foram comparadas com os resultados empíricos, utilizando a Equação (2); com “x” se referindo ao tipo de erro calculado: x = RF para forças de reação, x = COPEN para forças de contato e x = S para tensões. De forma complementar, as variáveis de saída obtidas por MEF foram plotadas em gráficos de: RF, COPEN e S em função de U. Além da aplicação das variáveis de saída: U e RF e de dimensionamento das “parts” na Equação (3), obtida do método de ensaio DNIT ME:135 (2018), obtendo o módulo resiliente calculado “MR<sub>c</sub>” (em MPa). Com isso, foi plotado um gráfico de MR<sub>c</sub> para os cinco CBUQ com outros resultados encontrados na literatura para comparação.

$$MR_c = (RF)(0,14 + 0,45.\delta)(|U|D)^{-1} \quad (3)$$

Onde “D” é o diâmetro do corpo de prova (em metros). Além desta análise, a variável: trações efetivas “σ” (em N/m<sup>2</sup>); obtida do MEF; foi analisada quanto à sua linearidade, em função da deformação efetiva “E” ou strain (T<sup>-1</sup>) e “U”; sendo

comparada com a investigação de Dyer et al. (2020) que analisou os mesmos CBUQ de Dyer et al. (2021a), quanto às deformações observadas no ensaio de MR.

## 2.4 ESTUDOS DE CASO

De modo a analisar um cenário de tráfego de veículos com a atuação de forças de atrito, foram simulados dois estudos de caso: estudo de forças de atrito e simulação da ação do tráfego veicular unitário.

### 2.4.1 Estudo caso 1: forças de atrito

Após o processamento do “comportamento mecânico”, as componentes de  $S$  transversais e longitudinais à área de aplicação de  $FN$ : “ $S_{33}$ ” e “ $S_{11}$ ” (em N) foram isoladas. Paralelamente, foram projetadas, pela multiplicação escalar, as tensões empíricas do estudo de Dyer et al. (2021a) nas mesmas direções de  $S_{33}$  e  $S_{11}$ , utilizando Equação (4) de Bathe (2014).

$$[S_{33}, S_{11}] = 0,7[S] \quad (4)$$

A partir destas componentes  $S_{33}$  e  $S_{11}$  empíricas e obtidas por MEF, foram calculadas forças de atrito estático “ $FAE$ ” e dinâmico “ $FAD$ ” por meio da Equação (5), deduzida por Bathe (2014). Com  $FAD$  (em N) atuando transversalmente mantendo a trajetória dos veículos e  $FAE$  (em N) atuando longitudinalmente, provendo tração.

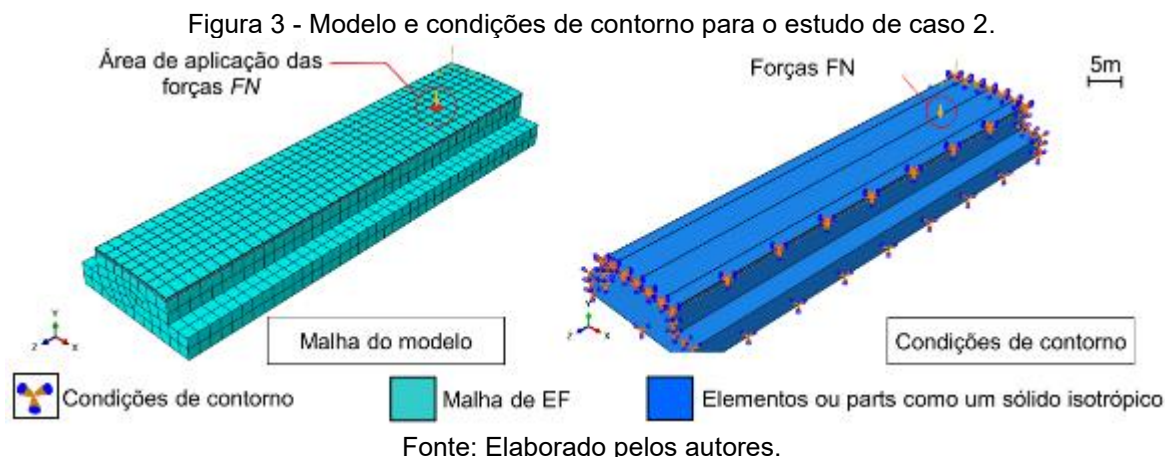
$$[FAD, FAE] = \mu \cdot \cos(\theta) \cdot [S_{33}, S_{11}] \quad (4)$$

As forças de atrito foram calculadas utilizando os coeficientes  $\mu = 0,65$ , para atrito dinâmico e  $\mu = 0,8$ , para atrito estático entre asfalto e pneu, segundo Caetano (2019). E então os resultados foram comparados entre dados empíricos e MEF pela análise do erro relativo, conforme a Equação (1); neste caso, a variável “ $x$ ” se referiu ao erro de cada tipo de atrito, com  $x = FAD$  para dinâmico e  $x = FAE$  para estático.

### 2.4.2 Estudo de caso 2: tráfego veicular

O outro cenário objetivou uma abordagem mais restrita, tomando uma área correspondente a uma unidade de malha (2,5X2,5m), posicionada na seção transversal superior do modelo. Aplicando os mesmos dados de entrada das simulações anteriores, cujas condições de contorno são apresentadas pela Figura 3.





A Figura 4 mostra, de antemão, que o modelo “Proj” foi escolhido para as simulações subsequentes; em que, no estudo de caso 2, o teste de malha determinou as mesmas condições apresentadas pela Tabela 1. Já as condições de contorno, mantiveram o isolamento de todas as secções do modelo, excluindo a face superior com as faixas de tráfego e acostamentos. E assim, após o processamento, os dados de saída obtidos foram analisados de forma análoga aos métodos anteriores; sendo calculadas as *FAD* e *FAE* e erros relativos.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1 MODELO ESCOLHIDO

A tabela 5 contempla os resultados para análise dos modelos “Proj” e “CP”, considerando soluções lineares e quadráticas em comparação aos dados empíricos.

Tabela 5 - Análise de erros relativos para escolha do modelo e tipo de solução.

Modelos	CBUQ	Deformação total: $U$ (m)			Erro relativo (%)	
		Dyer et al. (2021a)	Sol. linear	Sol. quadrática	$E\%_{(l)}$	$E\%_{(q)}$
Proj	50-RAF-1	$8,49 \cdot 10^{-6}$	$1,13 \cdot 10^{-5}$	$1,15 \cdot 10^{-5}$	33,10	35,45
CP			$1,87 \cdot 10^{-7}$	$1,82 \cdot 10^{-7}$	97,80	97,86
Proj	100-RAF-1	$1,15 \cdot 10^{-5}$	$8,27 \cdot 10^{-6}$	$8,85 \cdot 10^{-6}$	28,09	23,04
CP			$3,37 \cdot 10^{-7}$	$3,28 \cdot 10^{-7}$	97,07	97,15
Proj	50-RAF-2	$3,79 \cdot 10^{-6}$	$3,62 \cdot 10^{-6}$	$3,80 \cdot 10^{-6}$	4,49	0,26
CP			$8,45 \cdot 10^{-8}$	$8,15 \cdot 10^{-8}$	97,77	97,85
Proj	100-RAF-2	$5,33 \cdot 10^{-6}$	$3,78 \cdot 10^{-6}$	$4,07 \cdot 10^{-6}$	29,08	23,64
CP			$1,18 \cdot 10^{-7}$	$1,14 \cdot 10^{-7}$	97,79	97,86
Proj	Controle	$1,68 \cdot 10^{-5}$	$1,16 \cdot 10^{-5}$	$1,10 \cdot 10^{-5}$	30,95	34,52
CP			$7,35 \cdot 10^{-7}$	$7,20 \cdot 10^{-7}$	95,63	95,71

Fonte: Elaborado pelos autores.

Conforme a Tabela 5, “CP” apresentou  $E\%_{(x)}$  mais expressivos (mais de 90%), apesar de possuir a mesma geometria do ensaio empírico (DNIT, 2018). Outrossim, a solução linear ou quadrática se adequou melhor ao tipo de CBUQ testado, variando de erros maiores ou menores de acordo com o tipo de CBUQ. Desta forma, “Proj” foi escolhido para as análises seguintes; imbuído de soluções ajustadas conforme o tipo de CBUQ que mais se adequaram, como mostra a Tabela 6.



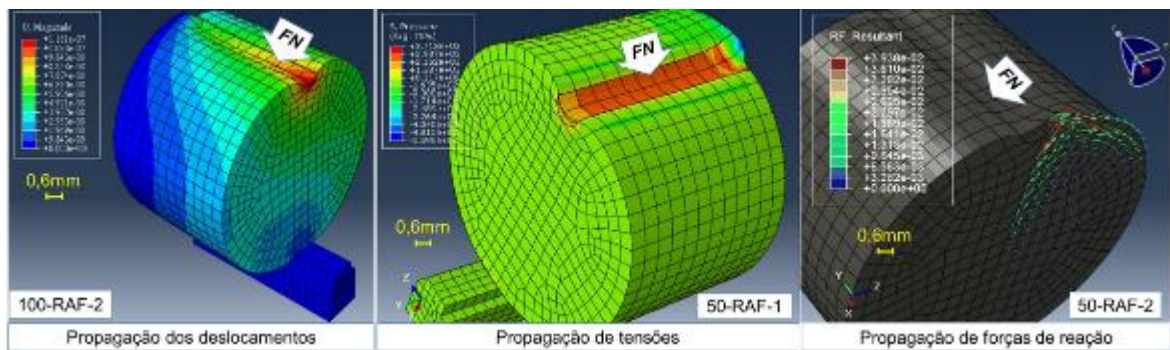
Tabela 6 - Ajuste do modelo escolhido ao tipo de solução para cada tipo de CBUQ analisado.

Modelo escolhido	CBUQ	MEF
Projeto	50-RAF-1	Linear
	100-RAF-1	Quadrático
	50-RAF-2	Quadrático
	100-RAF-2	Quadrático
	Controle	Linear

Fonte: Elaborado pelos autores.

Apesar de “CP” apresentar erros elevados, produziu gráficos condizentes à descrição de Bernucci et al. (2008) para a propagação de  $U$ ,  $S$  e  $RF$  em corpos de prova asfálticos, como mostra a Figura 4; visto que sua geometria é análoga a um corpo de prova asfáltico em um ensaio empírico de MR (DNIT, 2018). De acordo com Bernucci et al. (2008), o comportamento elástico-linear, promove deslocamentos  $U$  devido unicamente às tensões  $S$  uniformemente geradas; ou seja, o cilindro diametralmente solicitado por  $FN$ , gera  $S$  por unidade de espessura, perpendicularmente ao diâmetro solicitado, com  $U$  e  $RF$  acompanhando  $S$ .

Figura 4 - Comportamento mecânico do CP em diferentes condições para CBUQ.



Fonte: Elaborado pelos autores.

### 3.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS NO MEF

Conforme a Equação (2), aplicada ao “comportamento mecânico”, “Proj” foi analisado para os 5 tipos de CBUQ, obtendo representações gráficas das variáveis:  $RF$ ,  $COPEN$  e  $S$ ; sendo comparadas com resultados empíricos, conforme Tabela 7.

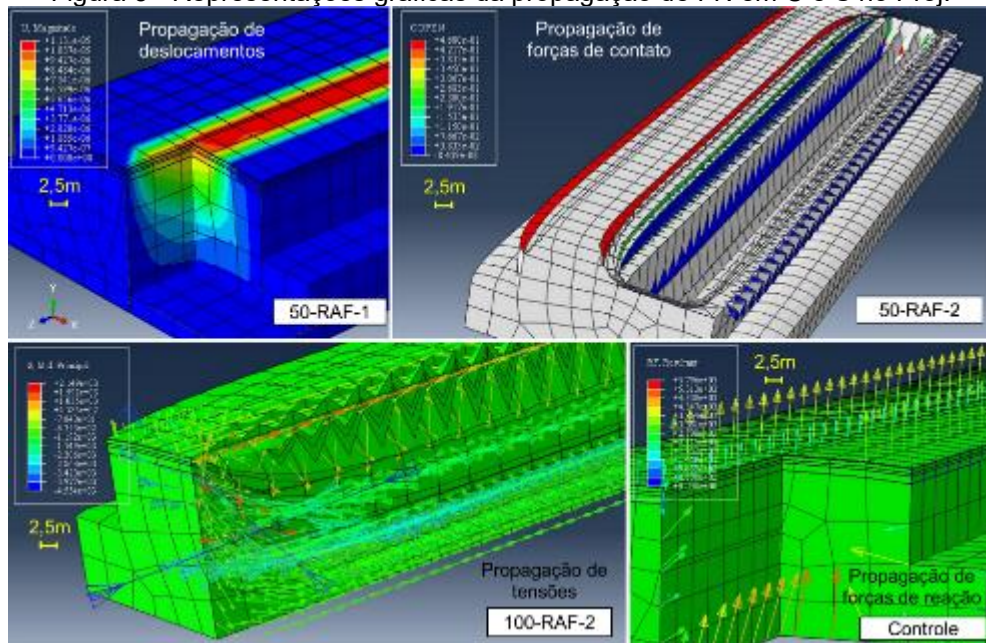
Tabela 7 – Comparativo por erro relativo das propriedades mecânicas entre MEF e ensaios.

Modelo/ Referência	CBUQ	Propriedades mecânicas			Erro relativo		
		$RF$ (N)	$COPEN$ (N)	$S$ (N)	$E\%_{(RF)}$ %	$E\%_{(COPEN)}$ %	$E\%_{(S)}$ %
Proj	Controle	$5,80 \cdot 10^3$	4,60	1261,00	68,74	97,70	36,95
	50-RAF-1	$8,21 \cdot 10^3$	0,46	1680,00	9,31	99,85	44,00
	100-RAF-1	$7,91 \cdot 10^3$	0,46	1396,00	12,32	99,75	53,47
	50-RAF-2	$3,89 \cdot 10^3$	0,46	692,80	58,96	99,49	23,02
	100-RAF-2	$3,90 \cdot 10^3$	4,60	692,10	85,79	94,89	23,10
Dyer et al. (2021a)	Controle	$1,85 \cdot 10^4$	$2,00 \cdot 10^2$	$2,00 \cdot 10^3$			
	50-RAF-1	$7,51 \cdot 10^3$	$3,00 \cdot 10^2$	$3,00 \cdot 10^3$			
	100-RAF-1	$7,04 \cdot 10^3$	$1,88 \cdot 10^2$	$3,00 \cdot 10^3$			
	50-RAF-2	$2,45 \cdot 10^3$	89,90	$9,00 \cdot 10^2$			
	100-RAF-2	$2,10 \cdot 10^3$	90,00	$9,00 \cdot 10^2$			

Fonte: Elaborado pelos autores.

Segundo critérios do Manual da Pavimentação do DNIT (2006), erros inferiores a 50% podem ser considerados aceitáveis; com isso, a maioria dos CBUQ obtiveram erros relativos dentro dos critérios. Todavia, *COPEN* apresentaram discrepâncias muito elevadas devido a diferença geométrica entre o modelo “Proj” e o corpo de prova cilíndrico utilizado no ensaio de MR (DNIT, 2018). Segundo Kloosterman (2002), diferenças de até 100 vezes para forças de contato podem ocorrer devido à geometria e outros fatores inerentes ao software utilizado e soluções empregadas. Com isso, as representações gráficas contribuem no entendimento da repercussão dos fatores externos (*FN* neste caso), como as representações gráficas da Figura 5.

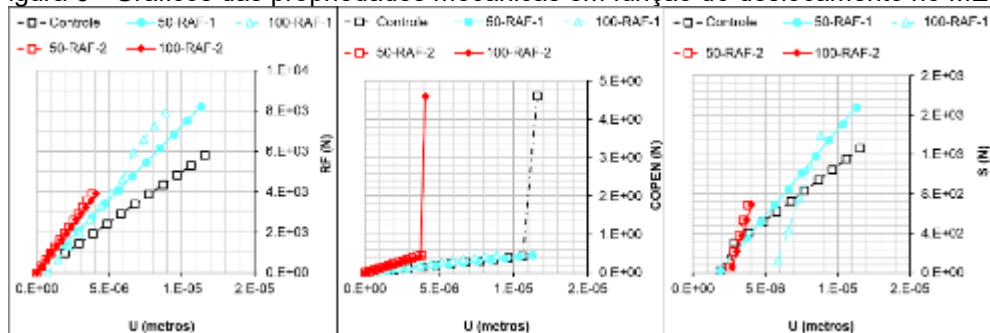
Figura 5 - Representações gráficas da propagação de *FN* em U e S no Proj.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Estas representações confirmam a coerência entre dados empíricos e obtidos por MEF. Em que a propagação de *S*, *U* e *RF* ocorreu vertical e longitudinalmente, tal como afirmaram Bernucci et al. (2008) para o caso do corpo de prova. *COPEN*, por outro lado, produziu um gráfico distorcido. Neste sentido, a distribuição de *S* e *RF* em função de *U* apresentou linearidade, como mostram os gráficos da Figura 6; sendo plotados somente com valores de MEF, como esclarecido no Capítulo 2.3.

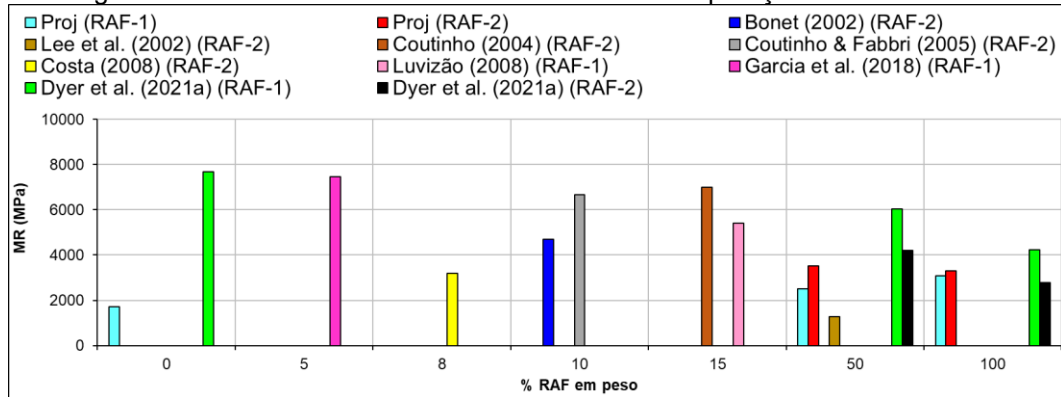
Figura 6 - Gráficos das propriedades mecânicas em função do deslocamento no MEF.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Nos gráficos da Figura 7, *FN* e *S* possuem taxas de crescimento mais suaves e lineares; já *COPEN* apresentou picos fora da curva, evidenciando assim a distorção dos resultados obtidos por MEF. Com isso,  $MR_C$  que considera *FN* e *S*; conforme a Equação (3); apresentou valores coerentes com a literatura, como mostra a Figura 7.

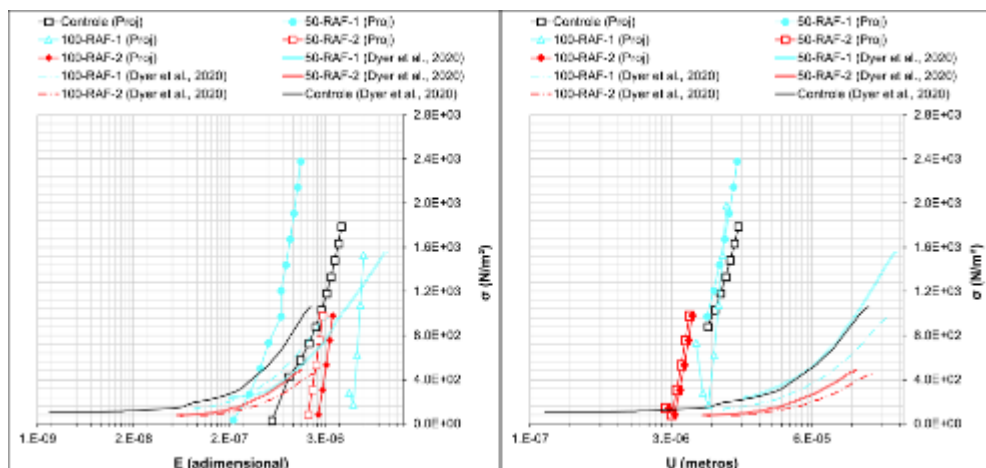
Figura 7 - Gráfico de barras do MR calculado em comparação com a literatura.



Fonte: Elaborado pelos autores.

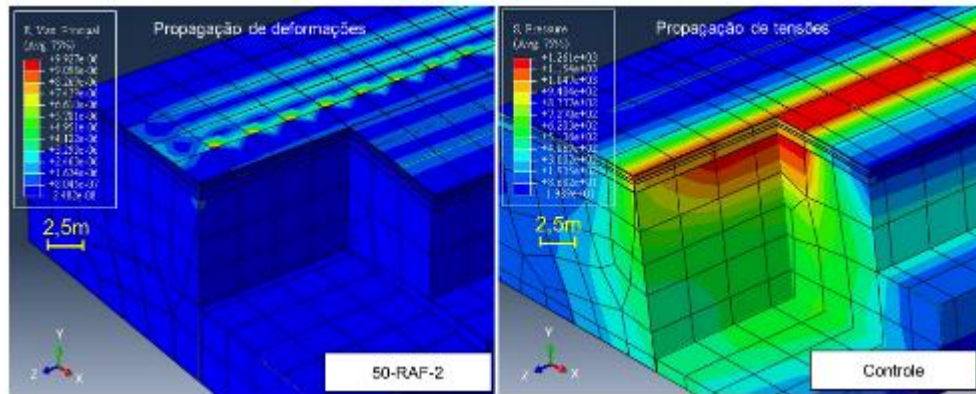
Da mesma forma, os deslocamentos recuperáveis em função da aplicação de *FN*, foram coerentes ao estudo de Dyer et al. (2020), como mostra a Figura 8. O qual contempla dados obtidos por MEF e dados empíricos. Cujas representações gráficas dos dados obtidos por MEF, segundo a Figura 9, demonstram que a propagação destas tensões “ $\sigma$ ” e deformações “*E*” foram similares ao esperado em projetos de pavimentação asfáltica, se propagando de forma radial através das camadas de rolamento e camadas de rolamento, tal como um sistema Mohr Coulomb (Bernucci et al., 2008); onde, “ $\sigma$ ” é representada por “*S PRESSURE*”.

Figura 8 - Gráficos de tensões versus deformações e deslocamentos.



Fonte: Elaborado pelos autores.



Figura 9 - Representações gráficas de  $\sigma$  e  $E$  obtidas por MEF.

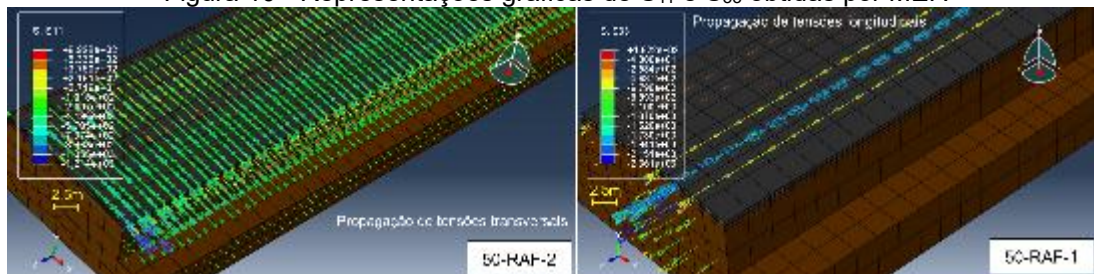
Fonte: Elaborado pelos autores.

Destarte, como mostra a Figura 8,  $\sigma$  em função de  $E$  é mais assertivo do que  $U$ , por se tratar de uma proporção. Com isso, fatores puramente empíricos não previstos por MEF, podem ser suprimidos. A exemplo, destaca-se a viscosidade do cimento asfáltico que influencia diretamente em  $U$ . De forma complementar, as imagens gráficas mostram que  $E$  se propagou de maneira similar ao afundamento de trilha de roda; com deformações se concentrando em sulcos espaçados devido às propriedades viscoelásticas do CBUQ, como destacaram Bernucci et al. (2008). Já as tensões  $\sigma$  acompanham os deslocamentos; demonstrando a transmissão de  $FN$  às camadas inferiores do projeto; tal como havia salientado Motta (1991).

E assim, pode-se concluir que “Proj” foi capaz de simular de maneira satisfatória, o comportamento de CBUQ na aplicação de  $FN$ ; tal como reiteraram Masad et al. (2016) e Elseifi et al. (2018). Estendendo-se a CBUQ contendo RAF.

### 3.3. ESTUDO DE CASO 1

Neste estudo de caso, as forças de atrito foram calculadas a partir das componentes de  $S$ :  $S_{33}$  e  $S_{11}$ ; como mostram as imagens gráficas da Figura 10. Segundo estas imagens, o direcionamento superficial de  $S_{11}$  e  $S_{33}$  são perceptíveis, possibilitando assim o cálculo de  $FAE$  e  $FAD$  a partir da Equação (4), como apresentado pela Tabela 8, contemplando a comparação com dados empíricos por erro relativo; conforme Equação (2).

Figura 10 - Representações gráficas de  $S_{11}$  e  $S_{33}$  obtidas por MEF.

Fonte: Elaborado pelos autores.

Tabela 8 - Forças de atrito estático e dinâmico obtidas empiricamente e por MEF.

Referencia	CBUQ	S <sub>33</sub>	S <sub>11</sub>	FAD	FAE	E%(x)	
						E%(FAD)	E%(FAE)
						%	%
Projeto	Controle	496,92	681,25	323,00	226,80	64,51	30,48
	50-RAF-1	721,08	1006,26	468,70	335,00	65,66	31,55
	100-RAF-1	1186,92	1321,65	771,50	440,00	43,48	10,09
	50-RAF-2	588,15	649,11	382,30	216,10	6,64	47,19
	100-RAF-2	588,31	650,91	382,40	216,70	6,62	47,60
Dyer et al. (2021a)	Controle	1400,00	1400,00	910,00	326,26		
	50-RAF-1	2100,00	2100,00	1365,00	489,39		
	100-RAF-1	2100,00	2100,00	1365,00	489,39		
	50-RAF-2	630,00	630,00	409,50	146,82		
	100-RAF-2	630,00	630,00	409,50	146,82		

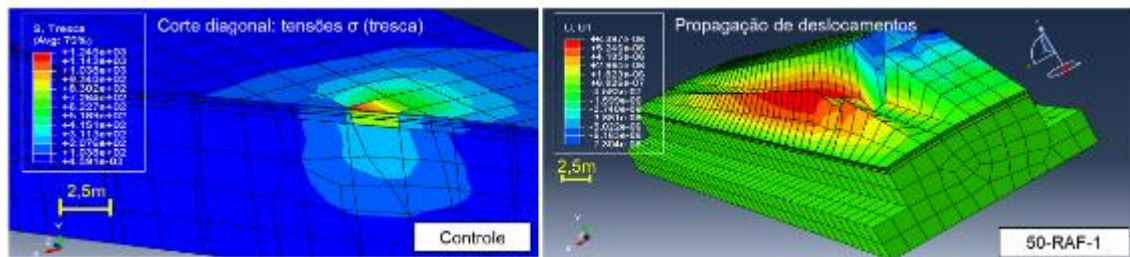
Fonte: Elaborado pelos autores.

Conforme estes resultados, o MEF foi capaz de simular as forças durante o tráfego de veículos. Com erros relativos medianos, segundo os critérios do DNIT (2006). Concluindo que o MEF foi capaz de prever diferentes cenários no estudo rodoviário, como salientaram Liu et al. (2017).

### 3.4 ESTUDO DE CASO 2

Neste cenário mais restrito, foram produzidas outras informações referentes ao comportamento mecânico das “parts”, como mostram as representações da Figura 11; com “U” apresentando muitas distorções. Já as demais variáveis produziram gráficos semelhantes a simulação: “propriedades mecânicas”, com erros relativos, como mostra a Tabela 9, sendo distribuídos conforme o tipo de CBUQ, sem considerar estas distorções gráficas. Acompanhando assim as mesmas tendências para erros grandes e medianos, observadas nas Tabelas 5 e 7 para RF, S e U.

Figura 11 - Representações gráficas das propriedades mecânicas no estudo de caso 2.



Fonte: Elaborado pelos autores.

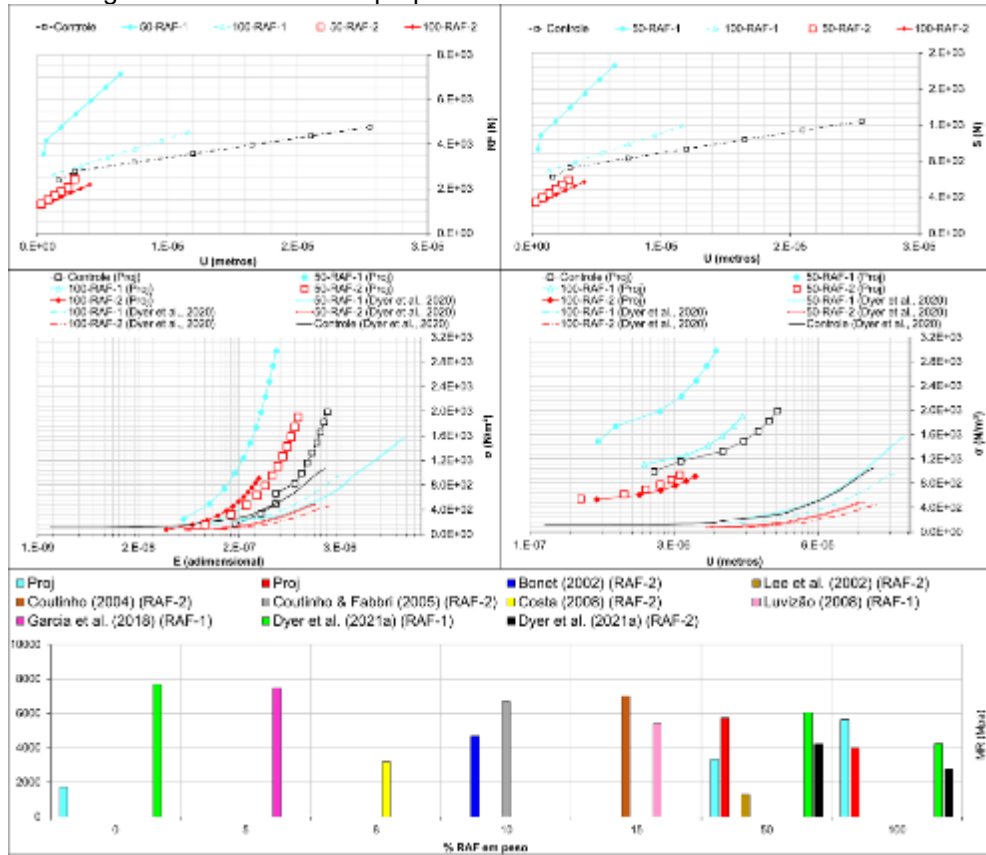
Tabela 9 - Propriedades mecânicas no estudo de caso 2 e erros relativos.

CBUQ	Propriedades Mecânicas			Erros Relativos E%(x)		
	RF	S	U	E%(RF)	E%(S)	E%(U)
	N	N	m	%	%	%
Controle	4763,00	1245,00	2,55.10 <sup>5</sup>	74,31	37,75	52,02
50-ADF-1	7137,00	1862,00	6,39.10 <sup>6</sup>	4,95	37,93	24,77
100-ADF-1	4538,00	1186,00	1,16.10 <sup>5</sup>	35,55	60,47	0,87
50-ADF-2	2420,00	585,70	2,86.10 <sup>6</sup>	1,18	34,92	24,46
100-ADF-2	2182,00	570,30	4,03.10 <sup>6</sup>	4,08	36,63	24,41

Fonte: Elaborado pelos autores.

Porém, a Figura 12 demonstra uma distribuição linear destas variáveis obtidas por MEF; com um  $MR_C$  coerente a resultados empíricos, conforme a literatura. E assim, o estudo de caso 2 apresentou uma boa correlação com dados empíricos; mesmo com erros superiores às simulações anteriores, como mostra a Tabela 10.

Figura 12 - Gráficos das propriedades mecânicas do estudo de caso 2.



Fonte: Elaborado pelos autores.

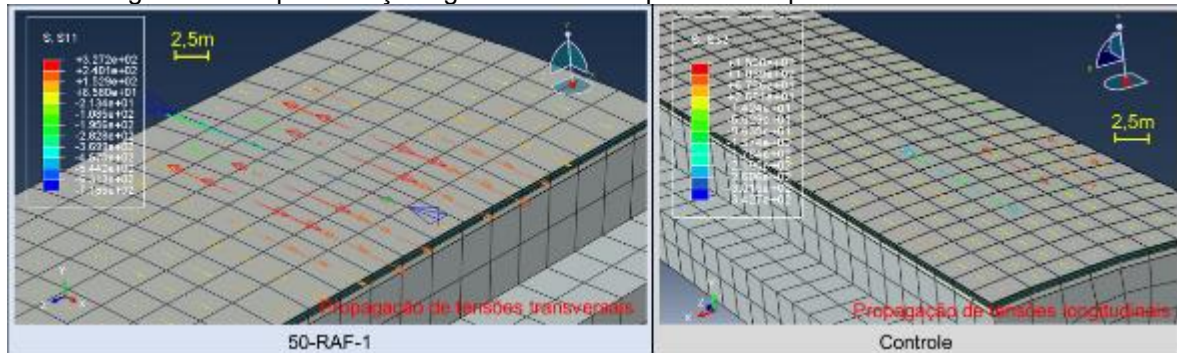
Tabela 10 - Forças de atrito e erros relativos do estudo de caso 2.

CBUQ	S <sub>33</sub>	S <sub>11</sub>	FAD	FAE	Erros Relativos E% <sub>(X)</sub>	
					E <sub>(FAD)</sub> %	E <sub>(FAE)</sub> %
Controle	2000,00	2000,00	1300,00	665,83	42,86	104,08
50-RAF-1	2991,00	2991,00	1944,15	995,76	42,43	103,47
100-RAF-1	1904,75	1904,75	1238,09	634,12	9,30	29,57
50-RAF-2	940,25	940,25	611,16	313,02	49,25	113,21
100-RAF-2	915,33	915,33	594,97	304,73	45,29	107,56

Fonte: Elaborado pelos autores.

A partir destes resultados, observa-se que a área de  $FN$  e condições de contorno podem ter influenciado nos erros relativos; tal como explicou Bathe (2014) acerca de uma aplicação muito específica pode contribuir para resultados errôneos durante a simulação; demandando assim, uma simplificação ao problema. Neste sentido, o modelo pode ser ajustado, segundo Masad et al. (2016), que destacou a proporcionalidade entre áreas de aplicação e geometria do modelo para a redução de erros. Neste caso, a simplificação se aplicaria na escolha de uma área mais extensa; tal como no estudo de caso 1. Apesar disso, as representações gráficas do atrito corroboram observações anteriores, como mostra a Figura 15.

Figura 15 - Representações gráficas das componentes S para o estudo de caso 2.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Como observado nestes gráficos, as componentes de  $S$  atuaram de maneira esperada para  $FAE$  e  $FAD$ . Com isso, o estudo de caso 2 apresentou erros relativos elevados, mas manteve representações gráficas satisfatória para a simulação.

#### 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados e discussões mostram que o MEF é aplicável na análise de CBUQ, assim como outros autores observaram; sendo estendível a compreensão de asfaltos alternativos contendo RAF como agregado. Observando erros aceitáveis (da ordem de 25–33%), com os CBUQ 50-RAF-2 e 100-RAF-1 apresentando os melhores resultados. Contudo, o modelo “CP”, imbuído de geometria análoga ao ensaio MR, apresentou grande discrepância com os resultados empíricos. Segundo a literatura, isto pode ocorrer devido à complexidade superior do modelo; ou seja; na análise computacional por MEF, as “parts” não necessariamente devem reproduzir a mesma arquitetura do objeto de estudo, mas sim, uma representatividade simplificada contendo os atributos essenciais. Desta forma, uma estrutura, mais simplificada como as camadas de “Proj”, obtém vantagem sobre um modelo com geometria cilíndrica. Por outro lado, a geometria de CP produziu gráficos de distribuição de forças, tensões e deformações muito semelhantes ao descrito pela literatura como comportamento típico de CBUQ sob a ação de cargas normais. Neste sentido, como continuidade deste estudo, podem ser definidas mais simplificações ao modelo, mantendo os atributos essenciais de espessura; como um modelo cúbico, por exemplo. Além disso, outras modificações e experimentações poderiam ser analisadas; visto a vasta gama de versatilidade que o software Abaqus possui. Destacando a utilização de outras modalidades de soluções, ferramentas de aplicação de  $FN$  dinâmicas: como pulsos e gradiente de cargas; além da alteração da geometria dos EF.

#### REFERÊNCIAS

Associação Brasileira de Fundição. (2020). *Índices setoriais de 2020*. <http://www.abifa.org.br/indices-setoriais/>.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2004). *NBR 10004: resíduos sólidos - classificação*. ABNT.

Bathe, K. (2014). *Finite Element Procedures* (2.ed.). Prentice Hall.



Bernucci, L.B., Motta, L.M.G., Ceratti, J.A.P., & Soares, J.B. (2008). *Pavimentação asfáltica*. Abeda.

Bonet, I. (2002). *Valorização do resíduo areia de fundição (RAF): incorporação nas massas asfálticas do tipo CBUQ*. [Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção] Universidade Federal de Santa Catarina.

Caetano, M. J. L. (2019). *Ciência e Tecnologia da Borracha: Propriedades Tribológicas*. CTB. <https://www.ctborracha.com/borracha-sintese-historica/propriedades-das-borrachas-vulcanizadas/propriedades-tribologicas/>.

Callister Jr., W.D. (2002). *Ciência e engenharia de materiais: uma introdução* (5.ed.). LTC.

Costa, C. J. B. (2008). *Mistura Asfáltica com o uso de Areia de Fundição de Ferro Descartada*. [Dissertação de Mestrado em Engenharia de Transportes] Instituto Militar de Engenharia.

Coutinho Neto, B. (2004). *Avaliação do reaproveitamento de areia de fundição como agregado em misturas asfálticas densas*. [Tese de Doutorado em Engenharia de Transportes] Universidade de São Paulo.

Coutinho Neto, B. & Fabbri, G.T.P. (2004). Avaliação da reutilização da areia de fundição em misturas asfálticas densas do tipo CAUQ. *Transportes*, 12(2).

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. (2006). *IPR-719: Manual de pavimentação*. 3.ed. Rio de Janeiro: DNIT, 278 p.

Departamento Nacional De Infraestrutura De Transportes. (2018). *ME 135: método de ensaio. pavimentação asfáltica - misturas asfálticas: determinação do módulo de resiliência*. Rio de Janeiro, 13 p.

Dyer, P. P. O. L., Gutierrez Klinsky, L. M., Silva, S. A., & de Lima, M. G. (2020). Mechanical and structural assessment of hot mix bituminous mixtures containing waste foundry sand. *International Journal of Pavement Engineering*, 22(14), 1801-1812. DOI: 10.1080/10298436.2020.1724290

Dyer, P.P.O.L. et al. (2021) Waste foundry sand characterization as paving aggregate. *Transportes*, 29(1). Doi: <http://dx.doi.org/10.14295/transportes.v29.i1.2241>

Dyer, P.P.O.L. et al. (2021a). O emprego de resíduos de areia de fundição (RAF) em concreto asfáltico: uma alternativa para a sustentabilidade na pavimentação. *Revista Matéria*, 26(1), doi: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620210001.1252>

Elsifi, M. A., Baek, J., & Dhakal, N. (2018). Review of modelling crack initiation and propagation in flexible pavements using the finite element method. *International Journal of Pavement Engineering*, 19(3), 251-263. doi: <https://doi.org/10.1080/10298436.2017.1345555>

Garcia, E. S. H., Thives, L. P., Bonh, K. A., & Echeverria, J. A. S. (2018). Análise Laboratorial da Incorporação de Resíduo de Areia de Fundição em Misturas Asfálticas. Anais do 32º Congresso de pesquisa e ensino em transporte da ANPET. [http://146.164.5.73:30080/tempsite/anais/documentos/2018/Infraestrutura/Ligantes%20e%20Misturas%20Asfalticas%20IV/1\\_634\\_AC.pdf](http://146.164.5.73:30080/tempsite/anais/documentos/2018/Infraestrutura/Ligantes%20e%20Misturas%20Asfalticas%20IV/1_634_AC.pdf)

Kloosterman, G. (2002). *Contact methods in finite element methods* (1.ed.). Ponsen & Looije

- Liu, P., Xing, Q., Dong, Y., Wang, D., Oeser, M., & Yuan, S. (2017). Application of finite layer method in pavement structural analysis. *Applied Sciences*, 7(6), 611. <https://doi.org/10.3390/app7060611>
- Luvizão, R. R. (2008). *Estudo da viabilidade para reaproveitamento do resíduo de areia verde de fundição intemperizado em concreto asfáltico usinado a quente*. [Dissertação de Mestrado em Engenharia de Materiais] Universidade do Estado de Santa Catarina.
- Marangon, M. (2018). *Geotecnia de Fundações e Obras de Terra – 1a Parte*. UFJF; FEDTG.
- Masad, E., Scarpas, A., Rajagopal, K. R., Kassem, E., Koneru, S., & Kasbergen, C. (2016). Finite element modelling of field compaction of hot mix asphalt. Part II: Applications. *International Journal of Pavement Engineering*, 17(1), 24-38.
- Motta, L. M. G. (1991). *Método de dimensionamento de pavimentos flexíveis*. [Tese de Doutorado em Engenharia Civil]. Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Senço, W. *Manual de técnicas de pavimentação* (2.ed.).Pini.
- Willett, J.C. (2020). *Minerals Yearbook. Report of U.S. Geological Survey Sand and Gravel, Construction*. Department of the Interior U.S. EUA.
- Yoder, E. J., & Witczak, M.W. (1975). *Principles of pavement design* (2.ed.).John Wiley & Sons.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradecimentos a CAPES, pelos subsídios à pesquisa. Ao Instituto Tecnológico de Aeronáutica, pelo assessoramento técnico.