



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ANÁLISE DE DEFORMAÇÕES ESPECÍFICAS DE TRAÇÃO NA FIBRA INFERIOR DE
REVESTIMENTO ASFÁLTICO ATRAVÉS DE INSTRUMENTAÇÃO E MÉTODOS
NUMÉRICOS

Nielson Tôrres Neves de Carvalho

São Cristóvão/SE

2017



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ANÁLISE DE DEFORMAÇÕES ESPECÍFICAS DE TRAÇÃO NA FIBRA INFERIOR DE
REVESTIMENTO ASFÁLTICO ATRAVÉS DE INSTRUMENTAÇÃO E MÉTODOS
NUMÉRICOS

Nielson Tôrres Neves de Carvalho

Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Civil como
requisito parcial à obtenção do título de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL.

Orientador: Dr. Fernando Silva Albuquerque

São Cristóvão/SE

2017

São Cristóvão/SE

2017

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Nielson Tôrres Neves de Carvalho

APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE EM 31 DE AGOSTO DE 2017.

BANCA EXAMINADORA:

Dr. Fernando Silva Albuquerque
Orientador

Dr. Elyson Ádan Nunes Carvalho
2º Examinador (Externo)
PROEE/UFS/SE

Dr. Jorge Carvalho Costa
3º. Examinador (Externo)
DEC/UFS/SE

Dr. Guilherme Bravo de Oliveira Almeida
4º Examinador (Externo)
DAU/UFS/SE

AGRADECIMENTOS

Deixo meus agradecimentos...

A Deus, primeiramente, por ter me dado persistência para conclusão desta dissertação diante dos obstáculos e contratemplos que apareceram.

À minha família por ter fornecido toda a base para chegar a este ponto e ainda todo o apoio diante das dificuldades que apareceram.

À minha namorada, amiga e companheira, Sarah, por todo incentivo dado durante a pesquisa.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Fernando Albuquerque, pela confiança no meu potencial e paciência durante todas as etapas, compartilhando seu conhecimento e experiência.

Ao graduando em Engenharia Civil e bolsista da pesquisa, Yuri Ishizawa, pela ajuda do começo ao fim da pesquisa, esta pesquisa também é dele.

A JNC Materiais de Construção pela disponibilização do caminhão caçamba, materiais e ainda mão de obra para realização de várias etapas da pesquisa, como na instalação dos sensores e medições de campo.

A ÚNICO asfaltos Sergipe, representada pelo amigo Alex Melo, pelo fornecimento de concreto asfáltico aditivado utilizado na recomposição do revestimento asfáltico após instalação dos sensores.

Ao Grupo FM, representado pela Engenheira Civil Léa Dias, pela disponibilização de material e balança utilizados nas etapas de medições de campo.

E por fim, a todos os colegas e professores que me ajudaram com conselhos e esclarecimentos, que foram primordiais para a conclusão da dissertação.

RESUMO

O uso de métodos numéricos para estimativa de tensões, deformações e deslocamentos em pavimentos rodoviários é comumente utilizado na fase de projeto para a previsão de desempenho de pavimentos. Essa estimativa pode trazer consigo imprecisões que refletem em superdimensionamento ou subdimensionamento, prejuízos econômicos e perda precoce da serventia do pavimento. É de grande importância mensurar essas diferenças, avaliando de forma comparativa as estimativas de métodos numéricos comumente utilizados em relação às medições diretas no pavimento. Uma forma de medir diretamente comportamentos mecânicos do pavimento é utilizando a instrumentação, que pode ser utilizada para medir tensões, deformações e deslocamentos e, ainda, fatores ambientais como temperatura. Dentre os parâmetros mais críticos, destaca-se a deformação de tração horizontal na fibra inferior das camadas cimentadas com ligante asfáltico ou aglomerante hidráulico, que é diretamente ligada ao processo de fadiga e, por sua vez, ao trincamento dessas camadas. Neste trabalho foi realizada a avaliação das deformações específicas horizontais medidas através de sensor do tipo *H-Gage* instalado na fibra inferior do revestimento asfáltico de pista experimental da Universidade Federal de Sergipe, realizando em seguida o comparativo com as estimadas de simulações numéricas, utilizando o método das múltiplas camadas elásticas, com o *software* AEMC/SisPAV (FRANCO, 2007), e o método dos elementos finitos, com o *software* ANSYS®, com o objetivo de avaliar o grau de exatidão das estimativas numéricas. Algumas medições de campo foram rejeitadas por apresentar problemas decorrentes das instalações dos sensores, mas os resultados das medições validadas apresentaram comportamento coerente. No comparativo dos resultados de deformação das modelagens numéricas com as medições de campo, o método das camadas finitas apresentou valores superiores à instrumentação, enquanto a modelagem em elementos finitos valores inferiores. Avaliando a previsão de fadiga, as estimativas numéricas apresentaram vida de fadiga muito próxima às medições de campo, sendo a diferença insignificante no método das múltiplas camadas elásticas e relativamente pequena no método dos elementos finitos.

Palavras-chave: revestimento asfáltico, deformação, instrumentação, análise numérica.

ABSTRACT

ANALYSIS OF TENSILE STRAIN IN THE LOWER FIBER OF THE ASPHALT BINDER THROUGH INSTRUMENTATION AND NUMERICAL METHODS

The use of numerical methods to estimate stress, strains and displacements in road pavements is commonly used in the design stage to predict pavement performance. This estimate may lead to inaccuracies which reflect over or undersizing, economic losses and early loss of pavement service. It is of great importance to measure these differences by comparing the estimates of numerical methods commonly used and the direct measurements on the pavement. One method of directly measuring mechanical behavior of the pavement is to use the instrumentation, which can be adopted to measure stress, strains and displacements, as well as environmental factors such as temperature. Among the most critical parameters is the horizontal tensile strain in the lower fiber of the asphalt binder or hydraulic binder cemented layers, which is directly linked to the fatigue process and, consequently, to the cracking of these layers. In this work was carried out the evaluation of the specific horizontal strains measured by an H-Gage type sensor installed at the lower fiber of the asphaltic layer in the experimental road of the Federal University of Sergipe. These field results were compared with the numerical estimates through method of multiple elastic layers with the use of software AEMC/SisPAV (FRANCO, 2007) and finite element method with the use of software ANSYS ®, aiming to evaluate the accuracy of numerical estimates. Some field measurements were rejected because of problems arising from sensor installations, but the results of the validated measurements presented coherent behavior. In the comparison of the results of the numerical modeling with the field measurements, the finite layer method showed higher values than the instrumentation, while the finite element modeling presented lower values. By evaluating the fatigue prediction, the numerical estimates revealed fatigue life very different to field measurements, being smaller in the multiple layer method and relatively bigger in the finite element method.

Keywords: asphaltic layer, strain, instrumentation, numerical analysis.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

| | | |
|-------------|--|----|
| 1 | INTRODUÇÃO | 19 |
| 1.1 | Justificativa | 20 |
| 1.2 | Objetivos | 21 |
| 1.2.1 | <i>Objetivo geral</i> | 21 |
| 1.2.2 | <i>Objetivos específicos</i> | 21 |
| 1.3 | Estrutura do trabalho | 21 |
| 2 | REVISÃO DA LITERATURA | 23 |
| 2.1 | Comportamento mecânico dos pavimentos | 23 |
| 2.1.1 | <i>Elasticidade</i> | 24 |
| 2.1.2 | <i>Viscoelasticidade</i> | 30 |
| 2.1.3 | <i>Método das múltiplas camadas elásticas</i> | 34 |
| 2.1.4 | <i>Propriedades elásticas e de resistência das camadas</i> | 36 |
| 2.1.5 | <i>Cargas em Pavimentos – Tráfego</i> | 38 |
| 2.1.6 | <i>Degradações no pavimento</i> | 41 |
| 2.2 | Método dos elementos finitos aplicado a pavimentos | 44 |
| 2.2.1 | <i>Aplicações do método dos elementos finitos a pavimentos</i> | 47 |
| 2.3 | Instrumentação de pavimentos | 51 |
| 2.3.1 | <i>Medidores de tensão</i> | 52 |
| 2.3.2 | <i>Medidores de deformação</i> | 52 |
| 2.3.3 | <i>Medidores de temperatura</i> | 54 |
| 2.3.4 | <i>Experiências em instrumentação de pavimentos</i> | 56 |
| 3 | MATERIAIS E MÉTODOS | 60 |
| 3.1 | Pista experimental | 60 |
| 3.2 | Montagem dos sensores do tipo H-Gage | 63 |
| 3.3 | Circuito e condicionador de sinal utilizados | 64 |
| 3.4 | Instalação dos sensores H-Gage | 66 |
| 3.5 | Sensor Termopar | 71 |
| 3.6 | Medições com a instrumentação | 73 |
| 3.7 | Levantamento de bacias deflectométricas e retroanálise | 75 |
| 3.8 | Ensaio de resistência à tração indireta - RTI | 77 |
| 3.9 | Ensaio de Módulo de Resiliência | 80 |
| 3.10 | Ensaio de Módulo Dinâmico | 81 |
| 3.11 | Análise numérica com o método das múltiplas camadas elásticas | 84 |
| 3.12 | Análise numérica em elementos finitos | 84 |

| | | |
|-------------|--|-----|
| 3.12.1 | <i>Definição dos tipos de elementos</i> | 85 |
| 3.12.2 | <i>Escolha dos modelos mecânicos e suas propriedades</i> | 86 |
| 3.12.3 | <i>Modelo geométrico</i> | 87 |
| 3.12.4 | <i>Cargas externas e condições de contorno</i> | 88 |
| 3.12.5 | <i>Etapa de solução</i> | 90 |
| 3.13 | Análise dos resultados | 90 |
| 3.13.1 | <i>Deformações medidas em campo</i> | 90 |
| 3.13.2 | <i>Simulações numéricas x Medições diretas</i> | 92 |
| 3.13.3 | <i>Consequência do uso de métodos numéricos</i> | 92 |
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÕES | 94 |
| 4.1 | Levantamentos de campo | 94 |
| 4.2 | Densidade aparente | 98 |
| 4.3 | Curvas mestras e módulos dinâmicos | 99 |
| 4.4 | Ensaio de resistência à tração indireta | 105 |
| 4.5 | Deformações específicas horizontais utilizando o modelo das múltiplas camadas elásticas | 106 |
| 4.6 | Modelagem em elementos finitos | 107 |
| 4.6.1 | <i>Módulos de resiliência linearizados</i> | 107 |
| 4.6.2 | <i>Modelo numérico em elementos finitos e as estimativas de deformação</i> | 109 |
| 4.7 | Análise e comparativo dos resultados de deformação específica horizontal | 113 |
| 4.7.1 | <i>Análise das deformações medidas através da instrumentação</i> | 113 |
| 4.7.2 | <i>Comparativo entre instrumentação e o método das múltiplas camadas finitas</i> | 124 |
| 4.7.3 | <i>Comparativo entre instrumentação e o método dos elementos finitos</i> | 125 |
| 4.7.4 | <i>Comparativo entre o método das múltiplas camadas finitas e o método dos elementos finitos</i> | 126 |
| 4.7.5 | <i>Análise de vida de fadiga</i> | 128 |
| 5 | CONCLUSÕES | 130 |
| 6 | SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS | 133 |
| | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 134 |
| | APÊNDICE A – Pulsos de variação de tensões elétricas nas medições de deformações específicas de tração em campo | 141 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Representação do estado tridimensional de tensões..... | 25 |
| Figura 2 - Deformação normal | 26 |
| Figura 3 - Deformação por cisalhamento. | 26 |
| Figura 4 - Deformação no plano..... | 26 |
| Figura 5 – Representação esquemática do modelo de Maxwell..... | 31 |
| Figura 6 – Representação esquemático do modelo de Kelvin-Voigt. | 32 |
| Figura 7 – Representação esquemática do modelo viscoelástico de Burger. | 33 |
| Figura 8 – Curva característica do comportamento da função fluência (D) com o tempo..... | 34 |
| Figura 9 – Representação gráfica do comportamento da tensão e da deformação em material viscoelástico. | 34 |
| Figura 10 – Áreas simplificadas de contato pneu-pavimento..... | 40 |
| Figura 11 - Comportamento de intensidade da carga em função do tempo. | 41 |
| Figura 12 – Processo de fadiga por flexão no revestimento asfáltico. | 42 |
| Figura 13 – Ensaio de vigota. | 43 |
| Figura 14 – Comportamento do estado de tensões no meio das camadas granulares. | 43 |
| Figura 15 – Comportamento do estado de deformação vertical no topo da camada de subleito. | 44 |
| Figura 16 – Tipos de elementos finitos. | 45 |
| Figura 17 – Etapas da utilização do método dos elementos finitos..... | 47 |
| Figura 18 – Modelo em elementos finitos de um pavimento. | 47 |
| Figura 19 – Ponte completa de Wheatstone. | 54 |
| Figura 20 – Termopar de Constantan (CuNi) e Ferro (Fe)..... | 55 |
| Figura 21 – Curvas característica de temperatura versus tensão elétrica em termopares..... | 56 |
| Figura 22 – Mapa do estado de Sergipe e localização das pistas experimentais..... | 61 |
| Figura 23 – Seção transversal do pavimento da pista experimental "A"..... | 61 |
| Figura 24 – Esquema do H-Gage utilizado em instrumentação na pavimentação. | 63 |
| Figura 25 – H-Gage. | 64 |
| Figura 26 – DB-15 macho (esquerda) e fêmea (direita) para conexão no Spider 8. | 65 |
| Figura 27 – Circuito em meia ponte de Wheatstone utilizado na pesquisa. | 65 |
| Figura 28 – Cabo blindado tipo Manga de 6 vias usado no circuito. | 66 |
| Figura 29 – Caixa blindada para fechamento do circuito. | 66 |
| Figura 30 – Representação da locação dos sensores na seção..... | 67 |
| Figura 31 – Eletroduto em PVC rígido reforçado usado para conduzir cabeamentos. | 67 |
| Figura 32 – Croqui da instalação dos sensores na pista experimental "A" (PEA-UFS). | 68 |
| Figura 33 – Fluxograma da instalação dos sensores em uma seção padrão. | 69 |
| Figura 34 – Esquema da instalação do H-Gage na abertura no revestimento. | 69 |
| Figura 35 - Corte da seção S01..... | 70 |
| Figura 36 – Lançamento da primeira camada da seção S03..... | 71 |
| Figura 37 – Seções S03 e S04 já executadas. | 71 |
| Figura 38 – (a) termômetro digital com termopar tipo K e (b) detalhe do termopar..... | 72 |
| Figura 39 – Caixa de medição dos termopares..... | 72 |
| Figura 40 – Dimensões caminhão MB L-1318 a ser utilizado nas medições..... | 73 |
| Figura 41 – Caminhão caçamba utilizado nas medições. | 74 |
| Figura 42 – Pulso de variação da relação de tensões elétricas de saída e entrada devido à deformação para 11,54 t, seção 02 e temperatura T1. | 75 |
| Figura 43 – Levantamento deflectométrico da seção S02 carga de 8,27 t. | 77 |
| Figura 44 – Corpo de prova da seção 01 rompido no ensaio de RTCD. | 78 |
| Figura 45 - Corpo de prova da seção 02 rompido no ensaio de RTCD..... | 78 |

| | |
|---|-----|
| Figura 46 - Corpo de prova da seção 03 rompido no ensaio de RTCD..... | 79 |
| Figura 47 - Corpo de prova da seção 04 rompido no ensaio de RTCD..... | 79 |
| Figura 48 - Corpo de prova do revestimento original rompido no ensaio de RTCD. | 80 |
| Figura 49 – Ensaio de módulo de resiliência da seção 01 na temperatura de 25°C. | 81 |
| Figura 50 – Partes do equipamento do ensaio de ressonância: (a) unidade de aquisição de dados; (b) acelerômetro; (c) martelo. | 82 |
| Figura 51 – Condicionamento dos corpos de prova a 20,0°C para o ensaio de ressonância.... | 83 |
| Figura 52 – Aplicação do impacto e medição da frequência de resposta através do acelerômetro. | 83 |
| Figura 53 – Aquisição dos dados de frequência ressonante. | 84 |
| Figura 54 – Elemento finito SOLID185. | 86 |
| Figura 55 – Modelo geométrico gerado através do ANSYS ®. | 88 |
| Figura 56 – Condições de contorno do modelo no ANSYS ®..... | 89 |
| Figura 57 – Configuração de aplicação da carga..... | 90 |
| Figura 58 – Pesagem do eixo traseiro do veículo de testes. | 94 |
| Figura 59 – Área de contato pneu-pavimento carregamento de 8,27t..... | 97 |
| Figura 60 - Área de contato pneu-pavimento carregamento de 10,47 t. | 98 |
| Figura 61 - Área de contato pneu-pavimento carregamento de 11,54 t. | 98 |
| Figura 62 – Curva mestra na temperatura de 40°C para o CP-1.1. | 100 |
| Figura 63 – Curva mestra na temperatura de 40°C para o CP-1.2. | 100 |
| Figura 64 - Curva mestra na temperatura de 40°C para o CP-2. | 101 |
| Figura 65 – Curva mestra na temperatura de 40°C para o CP-3.1. | 101 |
| Figura 66 - Curva mestra na temperatura de 40°C para o CP-4.1..... | 102 |
| Figura 67 - Curva mestra na temperatura de 40°C para o CP-4.2..... | 102 |
| Figura 68 - Curva mestra na temperatura de 40°C para o CP-4.3..... | 103 |
| Figura 69 - Curva mestra na temperatura de 40°C para o CP-4.4..... | 103 |
| Figura 70 - Curva mestra na temperatura de 40°C para o CP-R1. | 104 |
| Figura 71 - Curva mestra na temperatura de 40°C para o CP-R2. | 104 |
| Figura 72 – Variação da estimativa de deformação do AEMC/SisPav com o valor do coeficiente de Poisson. | 107 |
| Figura 73 – Variação da estimativa de deformação no modelo em elementos finitos com o módulo dinâmico do revestimento na simulação com atrito. | 110 |
| Figura 74 - Variação da estimativa de deformação do modelo em elementos finitos com o coeficiente de Poisson do revestimento na simulação sem atrito..... | 111 |
| Figura 75 - Deformações na superfície do revestimento asfáltico na direção longitudinal do pavimento utilizando o ANSYS ® para a seção 04 e carregamento de 10,47 t (considerando o atrito). | 112 |
| Figura 76 - Deformações na base do revestimento asfáltico na direção longitudinal do pavimento utilizando o ANSYS ® para a seção 04 e carregamento de 10,47 t (considerando o atrito). | 113 |
| Figura 77 – Representação gráfica do modelo que considera os levantamentos de todas as seções..... | 118 |
| Figura 78 – Representação gráfica do modelo que considera somente a seção 01. | 118 |
| Figura 79 – Representação gráfica do modelo que considera somente a seção 02. | 119 |
| Figura 80 – Representação gráfica do modelo que considera somente a seção 03. | 119 |
| Figura 81 – Representação gráfica do modelo que considera somente a seção 04. | 120 |
| Figura 82 – Variação de deformação específica com a temperatura (8,27 t). | 122 |
| Figura 83 - Variação de deformação específica com a temperatura (10,47 t)..... | 122 |
| Figura 84 - Variação de deformação específica com a temperatura (11,54 t)..... | 123 |

| | |
|--|-----|
| Figura 85 – Variação deformação com a intensidade da carga para temperatura aproximadamente de 40° C. | 124 |
| Figura 86 – Pulso de variação de tensão elétrica S01 T01 01 (8,27t). | 141 |
| Figura 87 – Pulso de variação de tensão elétrica S01 T01 02 (8,27t). | 142 |
| Figura 88 – Pulso de variação de tensão elétrica S01 T01 03 (8,27t). | 142 |
| Figura 89 – Pulso de variação de tensão elétrica S01 T02 01 (8,27t). | 143 |
| Figura 90 – Pulso de variação de tensão elétrica S01 T02 02 (8,27t). | 143 |
| Figura 91 – Pulso de variação de tensão elétrica S01 T02 03 (8,27t). | 144 |
| Figura 92 – Pulso de variação de tensão elétrica S02 T01 01 (8,27t). | 144 |
| Figura 93 – Pulso de variação de tensão elétrica S02 T01 02. | 145 |
| Figura 94 – Pulso de variação de tensão elétrica S02 T01 03 (8,27t). | 145 |
| Figura 95 – Pulso de variação de tensão elétrica S02 T02 01 (8,27t). | 146 |
| Figura 96 – Pulso de variação de tensão elétrica S02 T02 02 (8,27t). | 146 |
| Figura 97 – Pulso de variação de tensão elétrica S02 T02 03 (8,27t). | 147 |
| Figura 98 – Pulso de variação de tensão elétrica S03 T01 01 (8,27t). | 147 |
| Figura 99 – Pulso de variação de tensão elétrica S03 T01 02 (8,27t). | 148 |
| Figura 100 – Pulso de variação de tensão elétrica S03 T01 03 (8,27t). | 148 |
| Figura 101 – Pulso de variação de tensão elétrica S03 T02 01 (8,27t). | 149 |
| Figura 102 – Pulso de variação de tensão elétrica S03 T02 02 (8,27t). | 149 |
| Figura 103 – Pulso de variação de tensão elétrica S03 T02 03 (8,27t). | 150 |
| Figura 104 – Pulso de variação de tensão elétrica S04 T01 01 (8,27t). | 150 |
| Figura 105 – Pulso de variação de tensão elétrica S04 T01 02 (8,27t). | 151 |
| Figura 106 – Pulso de variação de tensão elétrica S04 T01 03 (8,27t). | 151 |
| Figura 107 – Pulso de variação de tensão elétrica S04 T02 01 (8,27t). | 152 |
| Figura 108 – Pulso de variação de tensão elétrica S04 T02 02 (8,27t) | 152 |
| Figura 109 – Pulso de variação de tensão elétrica S04 T02 03 (8,27t) | 153 |
| Figura 110 – Pulso de variação de tensão elétrica S01 T01 01 (10,47t). | 153 |
| Figura 111 – Pulso de variação de tensão elétrica S01 T01 02 (10,47t). | 154 |
| Figura 112 – Pulso de variação de tensão elétrica S01 T01 03 (10,47t). | 154 |
| Figura 113 – Pulso de variação de tensão elétrica S01 T02 01 (10,47t). | 155 |
| Figura 114 – Pulso de variação de tensão elétrica S01 T02 02 (10,47t). | 155 |
| Figura 115 – Pulso de variação de tensão elétrica S01 T02 03 (10,47t). | 156 |
| Figura 116 – Pulso de variação de tensão elétrica S02 T01 01 (10,47t). | 156 |
| Figura 117 – Pulso de variação de tensão elétrica S02 T01 02 (10,47t). | 157 |
| Figura 118 – Pulso de variação de tensão elétrica S02 T01 03 (10,47t). | 157 |
| Figura 119 – Pulso de variação de tensão elétrica S02 T02 01 (10,47t). | 158 |
| Figura 120 – Pulso de variação de tensão elétrica S02 T02 02 (10,47t). | 158 |
| Figura 121 – Pulso de variação de tensão elétrica S02 T02 03 (10,47t). | 159 |
| Figura 122 – Pulso de variação de tensão elétrica S03 T01 01 (10,47t). | 159 |
| Figura 123 – Pulso de variação de tensão elétrica S03 T01 02 (10,47t). | 160 |
| Figura 124 – Pulso de variação de tensão elétrica S03 T01 03 (10,47t). | 160 |
| Figura 125 – Pulso de variação de tensão elétrica S03 T02 01 (10,47t). | 161 |
| Figura 126 – Pulso de variação de tensão elétrica S03 T02 02 (10,47t). | 161 |
| Figura 127 – Pulso de variação de tensão elétrica S03 T02 03 (10,47t). | 162 |
| Figura 128 – Pulso de variação de tensão elétrica S04 T01 01 (10,47t). | 162 |
| Figura 129 – Pulso de variação de tensão elétrica S04 T01 02 (10,47t). | 163 |
| Figura 130 – Pulso de variação de tensão elétrica S04 T01 03 (10,47t). | 163 |
| Figura 131 – Pulso de variação de tensão elétrica S04 T02 01 (10,47t). | 164 |
| Figura 132 – Pulso de variação de tensão elétrica S04 T02 02 (10,47t). | 164 |
| Figura 133 – Pulso de variação de tensão elétrica S04 T02 03 (10,47t). | 165 |

| | |
|--|-----|
| Figura 134 – Pulso de variação de tensão elétrica S01 T01 01 (11,54t). | 165 |
| Figura 135 – Pulso de variação de tensão elétrica S01 T01 02 (11,54t). | 166 |
| Figura 136 – Pulso de variação de tensão elétrica S01 T01 03 (11,54t). | 166 |
| Figura 137 – Pulso de variação de tensão elétrica S01 T02 01 (11,54t). | 167 |
| Figura 138 – Pulso de variação de tensão elétrica S01 T02 02 (11,54t). | 167 |
| Figura 139 – Pulso de variação de tensão elétrica S01 T02 03 (11,54t). | 168 |
| Figura 140 – Pulso de variação de tensão elétrica S02 T01 01 (11,54t). | 168 |
| Figura 141 – Pulso de variação de tensão elétrica S02 T01 02 (11,54t). | 169 |
| Figura 142 – Pulso de variação de tensão elétrica S02 T01 03 (11,54t). | 169 |
| Figura 143 – Pulso de variação de tensão elétrica S02 T02 01 (11,54t). | 170 |
| Figura 144 – Pulso de variação de tensão elétrica S02 T02 02 (11,54t). | 170 |
| Figura 145 – Pulso de variação de tensão elétrica S02 T02 03 (11,54t). | 171 |
| Figura 146 – Pulso de variação de tensão elétrica S03 T01 01 (11,54t). | 171 |
| Figura 147 – Pulso de variação de tensão elétrica S03 T01 02 (11,54t). | 172 |
| Figura 148 – Pulso de variação de tensão elétrica S03 T01 03 (11,54t). | 172 |
| Figura 149 – Pulso de variação de tensão elétrica S03 T02 01 (11,54t). | 173 |
| Figura 150 – Pulso de variação de tensão elétrica S03 T02 02 (11,54t). | 173 |
| Figura 151 – Pulso de variação de tensão elétrica S03 T02 03 (11,54t). | 174 |
| Figura 152 – Pulso de variação de tensão elétrica S04 T01 01 (11,54t). | 174 |
| Figura 153 – Pulso de variação de tensão elétrica S04 T01 02 (11,54t). | 175 |
| Figura 154 – Pulso de variação de tensão elétrica S04 T01 03 (11,54t). | 175 |
| Figura 155 – Pulso de variação de tensão elétrica S04 T02 01 (11,54t). | 176 |
| Figura 156 – Pulso de variação de tensão elétrica S04 T02 02 (11,54t). | 176 |
| Figura 157 – Pulso de variação de tensão elétrica S04 T02 03 (11,54t). | 177 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|-----|
| Tabela 1- Limites de carga por tipo de eixo (sem a tolerância). | 39 |
| Tabela 2 – Parâmetros de compactação e modelos do MR das camadas de base, sub-base e reforço do subleito. | 62 |
| Tabela 3 – Módulos de resiliência (MR) retroanalizados e coeficientes de Poisson (μ) das camadas. | 63 |
| Tabela 4 – Configurações dos levantamentos de bacias deflectométricas nas quatro seções. . | 76 |
| Tabela 5 – Numeração de referência dos materiais das camadas para simulação no ANSYS. | 87 |
| Tabela 6 – Plano fatorial para medições de deformações em campo para uma seção padrão. | 91 |
| Tabela 7 – Temperaturas levantadas nas medições com 8,27 t. | 95 |
| Tabela 8 - Temperaturas levantadas nas medições com 10,47 t. | 95 |
| Tabela 9 - Temperaturas levantadas nas medições com 11,54 t. | 95 |
| Tabela 10 – Dados das medições dos H-Gages para o carregamento de 8,27 t. | 96 |
| Tabela 11 - Dados das medições dos H-Gages para o carregamento de 10,47 t. | 96 |
| Tabela 12 - Dados das medições dos H-Gages para o carregamento de 11,54 t. | 97 |
| Tabela 13 – Densidades aparente dos revestimentos de recomposição e original. | 99 |
| Tabela 14 – Módulos dinâmicos e coeficientes de Poisson dos revestimentos asfálticos a 40°C. | 105 |
| Tabela 15 – Valores de resistência à tração indireta. | 105 |
| Tabela 16 – Deformações específicas horizontais com o método das camadas finitas. | 106 |
| Tabela 17 – Módulos linearizados para 8,27 t na seção 01. | 107 |
| Tabela 18 - Módulos linearizados para 8,27 t na seção 02. | 108 |
| Tabela 19 - Módulos linearizados para 8,27 t na seção 04. | 108 |
| Tabela 20 - Módulos linearizados para 10,47 t na seção 01. | 108 |
| Tabela 21 - Módulos linearizados para 10,47 t na seção 02. | 108 |
| Tabela 22 - Módulos linearizados para 10,47 t na seção 04. | 108 |
| Tabela 23 - Módulos linearizados para 11,54 t na seção 01. | 109 |
| Tabela 24 - Módulos linearizados para 11,54 t na seção 02. | 109 |
| Tabela 25 - Módulos linearizados para 11,54 t na seção 04. | 109 |
| Tabela 26 – Deformações específicas horizontais calculadas através do MEF. | 110 |
| Tabela 27 – Deformações específicas médias medidas em campo e suas respectivas incertezas (8,27 t). | 114 |
| Tabela 28 - Deformações específicas médias medidas em campo e suas respectivas incertezas (10,47 t). | 114 |
| Tabela 29 - Deformações específicas médias medidas em campo e suas respectivas incertezas (11,54 t). | 114 |
| Tabela 30 – Plano fatorial das medições de campo. | 115 |
| Tabela 31 – Resultado da regressão linear para o modelo que considera os levantamentos de todas as seções. | 116 |
| Tabela 32 – Resultado da regressão linear para o modelo que considera somente a seção 01. | 116 |
| Tabela 33 – Resultado da regressão linear para o modelo que considera somente a seção 02. | 117 |
| Tabela 34 – Resultado da regressão linear para o modelo que considera somente a seção 03. | 117 |
| Tabela 35 – Resultado da regressão linear para o modelo que considera somente a seção 04. | 117 |
| Tabela 36 – Variação de deformação específica com a temperatura (8,27 t). | 121 |
| Tabela 37 - Variação de deformação específica com a temperatura (10,47 t). | 121 |

| | |
|---|-----|
| Tabela 38 - Variação de deformação específica com a temperatura (11,54 t). | 121 |
| Tabela 39 – Variação de deformação específica com a intensidade da carga para temperatura aproximadamente de 40°C. | 124 |
| Tabela 40 – Comparativo de deformações específicas de tração medidas em campo e estimadas através do software AEMC/SisPav ($T = T1 \cong 40\text{ }^{\circ}\text{C}$)..... | 125 |
| Tabela 41 - Comparativo de deformações específicas de tração medidas em campo e estimadas através do software ANSYS® com atrito ($T = T1 \cong 40\text{ }^{\circ}\text{C}$)..... | 126 |
| Tabela 42 - Comparativo de deformações específicas de tração medidas em campo e estimadas através do software ANSYS® sem atrito ($T = T1 \cong 40\text{ }^{\circ}\text{C}$). | 126 |
| Tabela 43 - Comparativo de deformações específicas de tração estimadas através do AEMC/SisPav sem aderência e estimadas através do software do modelo do ANSYS® com atrito ($T = T1 \cong 40\text{ }^{\circ}\text{C}$)..... | 127 |
| Tabela 44 - Comparativo de deformações específicas de tração estimadas através do AEMC/SisPav sem aderência e estimadas através do software ANSYS® sem atrito ($T = T1 \cong 40\text{ }^{\circ}\text{C}$). | 127 |
| Tabela 45 - Análise de vida de fadiga para 8,27 t em campo e no ANSYS ® considerando o atrito ($T = T1 \cong 40\text{ }^{\circ}\text{C}$)..... | 128 |
| Tabela 46 – Análise de vida de fadiga para 8,27 t em campo, no AEMC/SisPav e no ANSYS ® desconsiderando o atrito ($T = T1 \cong 40\text{ }^{\circ}\text{C}$). | 128 |
| Tabela 47 - Análise de vida de fadiga para 10,47 t em campo e no ANSYS ® considerando o atrito ($T = T1 \cong 40\text{ }^{\circ}\text{C}$)..... | 128 |
| Tabela 48 - Análise de vida de fadiga para 10,47 t em campo, no AEMC/SisPav e no ANSYS ® desconsiderando o atrito ($T = T1 \cong 40\text{ }^{\circ}\text{C}$).. | 128 |
| Tabela 49 - Análise de vida de fadiga para 11,54 t em campo e no ANSYS ® desconsiderando o atrito ($T = T1 \cong 40\text{ }^{\circ}\text{C}$)..... | 129 |
| Tabela 50 - Análise de vida de fadiga para 11,54 t em campo, no AEMC/SisPav e no ANSYS ® desconsiderando o atrito ($T = T1 \cong 40\text{ }^{\circ}\text{C}$).. | 129 |

LISTA DE SIGLAS

AASHTO: American Association of State Highway and Transportation Officials

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

CAP: Cimento Asfáltico de Petróleo

CAUQ: Concreto Asfáltico Usinado à Quente

CBR: California Bearing Ratio

CONTRAN: Conselho Nacional de Trânsito

CP: Corpo de Prova

DNER: Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (extinto)

DNIT: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

FWD: falling weight deflectometer

GEOPAV: Laboratório de Geotecnia e Pavimentação

ISC: Índice de Suporte California

kPa: Quilopascal

LPM – Laboratório de Mecânica dos Pavimentos

LTT: Laboratório de Topografia e Transportes

MPa: Megapascal

MR: Módulo de Resiliência

NDE-360: Nondestructive Evaluation 360 Platform

RT: Resistência à tração

RTI: Resistência à tração indireta

SAPEM: South African Pavement Engineering Manual

SHRP: Strategic Highway Research Program

SUPERPAVE: Superior Performing Asphalt Pavements

TSCE: Teoria do Sistema de Camadas Elásticas

UFC – Universidade Federal do Ceará

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

UFS: Universidade Federal de Sergipe

USACE: United States Army Corps of Engineers

1 INTRODUÇÃO

As estimativas de tensões, deformações e deslocamentos através de métodos numéricos trazem consigo imprecisões decorrentes das hipóteses simplificadoras utilizadas para facilitar os cálculos. Estas já são esperadas e comprovadas, conforme pesquisas que fizeram comparações com medidas diretas no pavimento, oriundas da instrumentação (SAEVARSDOTTIR e ERLINGSSON, 2016; YIN, 2012; DONG *et al.*, 2012). As diferenças entre as respostas medidas diretamente no pavimento (tomadas como referência) e as estimadas através de simulações numéricas chegam a ser significativas, tendo intervalos de 3% a 7% para tensões verticais e 18% a 30% para deformações específicas horizontais de tração, respostas estas críticas, ligadas ao aparecimento de trilhas de roda e fadiga no revestimento asfáltico do pavimento, respectivamente (DONG *et al.*, 2012).

Entre os métodos numéricos mais utilizados no dimensionamento de pavimentos, destaca-se o método das múltiplas camadas elásticas, ou método das camadas finitas, desenvolvido por Burmister em 1945, que é a base da mecânica dos pavimentos. Este baseia-se em considerar o pavimento como uma estrutura de camadas sobrepostas que devem seguir algumas hipóteses simplificadoras relacionadas aos respectivos comportamentos mecânicos (BURMISTER, 1945a; BURMISTER, 1945b).

Outro método bastante utilizado para estimativa de respostas mecânicas de pavimentos é o método dos elementos finitos. Consistindo em uma aproximação numérica, este método, também usado em outras áreas da engenharia, baseia-se em dividir o meio contínuo, neste caso o pavimento, em elementos finitos que têm funções inerentes que descrevem o comportamento mecânico do material (camada), podendo a modelagem ter infinitas possibilidades de configuração em relação às condições de contorno, aplicação da carga ou grau de discretização, por exemplo (MADENCI e GUVEN, 2006).

Em outro sentido às estimativas numéricas, se tem a instrumentação, podendo ter o objetivo de medir deslocamentos, deformações, tensões e até variáveis ambientais como temperatura e umidade. O uso de sensores no pavimento já está se tornando algo comum, principalmente fora do Brasil, e carrega consigo uma maior exatidão por realizar medições diretas no pavimento, porém deve-se ter o devido cuidado na escolha do sensor a ser utilizado,

na instalação e com interferências devido à temperatura ou efeito eletromagnético (DEUSEN *et al.*, 1992).

Atualmente os métodos numéricos são as principais fontes de estimativa de respostas mecânicas dos pavimentos para projeto e manutenção, porém estas estimativas podem ser bem diferentes das que acontecem em situações reais, conforme discutido nos parágrafos anteriores, trazendo consigo erros que podem se propagar em problemas de superdimensionamento ou subdimensionamento dos pavimentos, gerando principalmente perdas econômicas e de serventia. Diante desse fato, levanta-se a seguinte problemática: Os métodos numéricos, utilizando elementos finitos ou o método das camadas finitas para estimativa de deformações de tração em pavimentos, são compatíveis com medidas realizadas diretamente em campo?

1.1 Justificativa

Vê-se viável avaliar métodos numéricos comumente utilizados, realizando um comparativo entre suas estimativas de respostas mecânicas e medições diretas no pavimento através de instrumentação. Com isso, será realizada a comparação entre deformações específicas horizontais de tração na fibra inferior de camada de revestimento asfáltico, estimadas numericamente e medidas diretamente no pavimento, sendo esta resposta mecânica diretamente ligada ao processo de fadiga do revestimento (consequentemente o trincamento) (DONG *et al.*, 2012).

Com esse comparativo pode-se levantar as diferenças entre os valores das medições diretas através da instrumentação e das estimativas numéricas, neste caso utilizando o Método das Múltiplas Camadas Elásticas e Método dos Elementos Finitos, levantando a possível perda da vida útil por subdimensionamento do revestimento asfáltico devido ao uso dos métodos numéricos, que entre si também apresentam diferenças nas estimativas de deformação.

O pavimento asfáltico tem um alto custo de produção e manutenção, tendo o fator econômico muita importância no projeto e gerenciamento de pavimentos. Os erros das estimativas numéricas significam muito dinheiro desperdiçado, seja na construção de um pavimento superdimensionado, com espessura de revestimento maior que o necessário, ou na realização de manutenções corretivas precoces em um pavimento subdimensionado, que ainda acarreta em custos indiretos com interdições por exemplo.

Os erros de projeto e gerenciamento de um pavimento ainda acarretam em prejuízos sociais, principalmente no Brasil que tem como principal modal de transporte o rodoviário, onde pavimentos com degradação precoce acarretam problemas mecânicos para os veículos, maior tempo de transporte de cargas e consequentemente maior custo, e ainda desconforto na viagem para a população em geral.

1.2 Objetivos

Para responder ao problema da pesquisa, foram traçados os objetivos geral e específicos.

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral do trabalho é analisar as deformações específicas de tração na fibra inferior de revestimento asfáltico obtidas através de instrumentação e através dos métodos numéricos das camadas finitas e dos elementos finitos, levantando a acurácia das simulações numéricas.

1.2.2 Objetivos específicos

Já os objetivos específicos deste trabalho são:

- a) Medir e avaliar as deformações específicas de tração na fibra inferior de revestimento da pista experimental através de instrumentação;
- b) Modelar numericamente, através dos métodos das múltiplas camadas elásticas e dos elementos finitos, as deformações específicas de tração na fibra inferior do revestimento estudado;
- c) Comparar os resultados obtidos a partir da instrumentação e das análises numéricas.

1.3 Estrutura do trabalho

Neste capítulo são apresentadas as considerações iniciais do tema estudado, as justificativas, os objetivos e a estrutura deste trabalho.

O capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica da pesquisa baseada em revisão da literatura do tema, abordando o comportamento mecânico do pavimento, desde as suas propriedades mecânicas até os tipos de degradação, os métodos numéricos utilizados para estimar as respostas mecânicas do pavimento e a aplicação da instrumentação em pavimentos.

O capítulo 3 apresenta os métodos utilizados no trabalho para a montagem e instalação da instrumentação, a caracterização do pavimento e suas camadas, a realização das medições de campo, o desenvolvimento das modelagens numéricas e o tratamento e análise dos resultados.

O capítulo 4 apresenta os resultados encontrados, assim como o tratamento e análise destes.

O capítulo 5 apresenta as conclusões do trabalho, contendo os pontos negativos e positivos dos resultados, assim como o que eles representaram. Também apresenta as sugestões para trabalhos futuros, baseadas nas experiências obtidas neste trabalho.

Nas referências bibliográficas são apresentados os trabalhos citados e utilizados como referência na pesquisa.

No Apêndice A são apresentados os gráficos das variações de tensão elétrica provocadas pelas deformações e obtidos através da instrumentação.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Nos itens seguintes apresenta-se uma breve revisão bibliográfica do tema do trabalho, desde esclarecimentos sobre o comportamento mecânico dos pavimentos até sobre o uso de métodos numéricos e instrumentação para análise de tensões e deformações.

2.1 Comportamento mecânico dos pavimentos

Além de fornecer conforto, segurança e menor tempo de viagem aos usuários dos veículos, o pavimento rodoviário tem a função estrutural de receber carregamentos dinâmicos do tráfego e transmiti-los de forma atenuada e segura através de camadas sobrepostas ao subleito, fornecendo durabilidade à estrutura (BALBO, 2007; BERNUCCI *et al.*, 2006; ABU-FARSAKH *et al.*, 2014).

A ação do tráfego provoca esforços internos nas camadas do pavimento, esforços estes que podem degradar o pavimento e também alterar as características mecânicas das camadas no decorrer do tempo. De modo geral, os esforços que ocorrem nas camadas são de (BALBO, 2007):

- a) Compreensão vertical normal: associada a deformações verticais no subleito e/ou nas camadas;
- b) Flexão de camadas cimentadas e asfálticas: associada a problemas de trincamento por fadiga na fibra inferior de camadas cimentadas ou asfálticas;
- c) Cisalhamento: associado à ruptura principalmente de camadas granulares;
- d) Compressão no confinamento: aumenta a rigidez de camadas granulares e a resistência ao cisalhamento.

Além desses esforços mecânicos, vale destacar também a ação da aderência entre as camadas cimentadas, sejam elas com ligante asfáltico ou aglomerante hidráulico. Isto aumenta as tensões verticais e horizontais na interface entre as camadas e favorece a propagação de trincas da camada subjacente para a camada superior, no processo conhecido por reflexão de trincas (BALBO, 2007).

Para estimar estes esforços, pode-se utilizar métodos numéricos como os baseados na Teoria de Sistema de Camadas Elásticas (TSCE), desenvolvido através das equações de Burmister, e no método dos elementos finitos, ambos particularizados na teoria da elasticidade ou viscoelasticidade descritas sinteticamente nos itens seguintes (HUANG, 2004; BALBO, 2007).

2.1.1 Elasticidade

A Teoria da Elasticidade é o campo da Mecânica dos Sólidos que estuda corpos sujeitos a pequenas deformações e formados por materiais homogêneos de comportamento elástico, sendo que um material de comportamento elástico é aquele onde as deformações aparecem imediatamente quando da aplicação de tensões e cessam também quando cessam as tensões, sendo proporcionais às mesmas.

A elasticidade pode ser representada por um elemento sólido análogo a uma mola, sendo que todos os materiais possuem certa elasticidade. Ela é a propriedade do material de responder imediatamente a um carregamento se deformando (mudando de tamanho ou forma) independentemente do tempo de carregamento e após o descarregamento voltando ao estado inicial (SANRAL, 2014; TIMOSHENKO e GOODIER, 2006).

A teoria da elasticidade pode ser particularizada no intuito de estudar e prever a relação entre o carregamento e suas respectivas deformações, considerando simplificadamente que os corpos são homogêneos e continuamente distribuídos, de forma que um corpo infinitesimal tem as mesmas características do corpo como um todo, e isotrópicos, tendo propriedades elásticas iguais em todas as direções (TIMOSHENKO e GOODIER, 2006).

Conceituadas como forças por área, as tensões representam a magnitude das forças internas em certa área do corpo. No geral, as tensões são inclinadas à área e podem ser divididas em duas componentes: tensões normais (σ), agindo perpendiculares à área; e tensões de cisalhamento (τ) agindo no plano da área tensionada. As componentes de tensão de um elemento cúbico infinitesimal, de dimensões dx, dy e dz , submetido a um estado tridimensional de tensões, como na Figura 1, podem ser representadas em coordenadas cartesianas x, y, z onde observam-se três componentes de tensões normais ($\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$) nas direções dos eixos cartesianos, e seis componentes de tensões de cisalhamento ($\tau_{xy} =$

$\tau_{yx}, \tau_{xz} = \tau_{zx}, \tau_{yz} = \tau_{zy}$) paralelas aos três planos cartesianos (TIMOSHENKO e GOODIER, 2006).

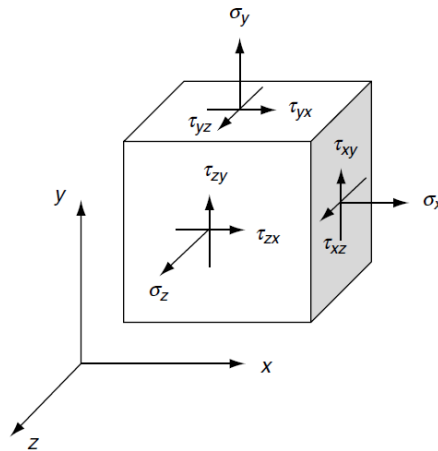


Figura 1 – Representação do estado tridimensional de tensões.

Fonte: SADD, 2005.

Comumente essas componentes de tensões são representadas na forma matricial conforme mostrado no chamado tensor de Cauchy:

$$\sigma = [\sigma] = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Considerando que um corpo rígido continue imóvel com a aplicação de tensões, o deslocamento relativo entre pontos (deflexão) no corpo só pode ser consequência de uma deformação, e esses deslocamentos são representados pelas componentes vetoriais u, v, w paralelas, respectivamente, aos eixos cartesianos x, y, z (SADD, 2005; TIMOSHENKO e GOODIER, 2006). As deformações podem ser de dois tipos: deformação específica normal (ϵ), que é dada pela relação entre a deformação linear (x) e o comprimento inicial do elemento (L), conforme Figura 2; e a deformação por cisalhamento (γ), que é a mudança de ângulo ocorrida entre dois segmentos de reta, originalmente perpendiculares, conforme a Figura 3.

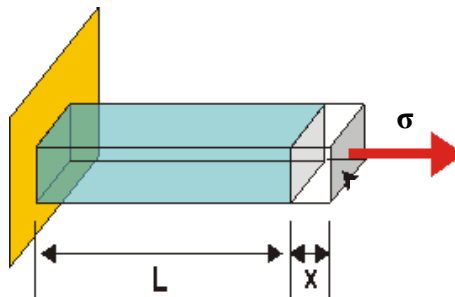


Figura 2 - Deformação normal
 Fonte: (Adaptado ALFACONNECTION, 2016).

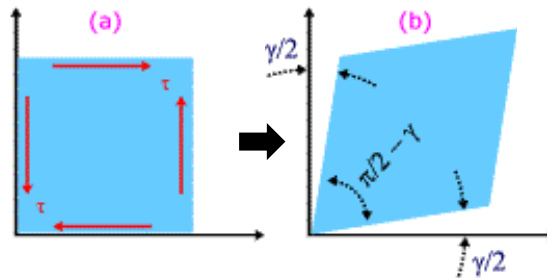


Figura 3 - Deformação por cisalhamento.
 Fonte: Adaptado de MSPC, 2016.

Considerando o pequeno corpo retangular elástico com dimensões dx e dy da Figura 4, após a aplicação de tensões, os pontos A, B, C e D desse elemento sofrem deslocamento devido a deformações normais e cisalhantes, e ao deslocamento do corpo. Considerando somente os deslocamentos devido às deformações pode-se encontrar as componentes de deformação do corpo rígido no plano ε_x , ε_y e γ_{xy} (SADD, 2005).

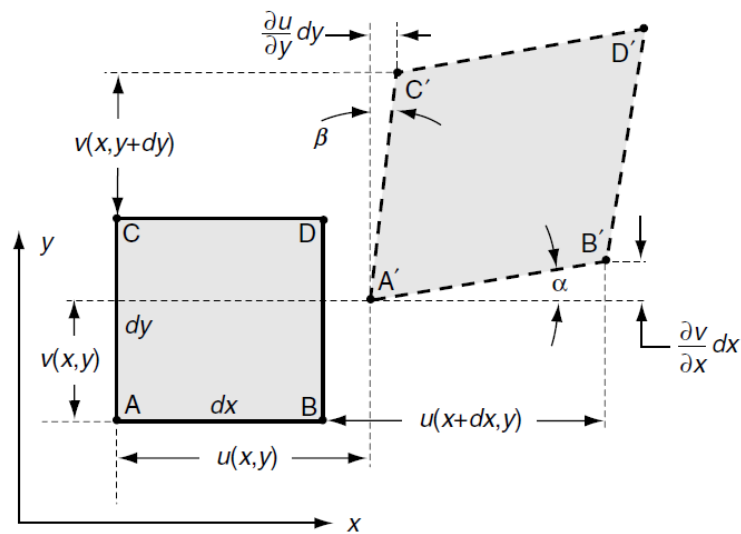


Figura 4 - Deformação no plano.
 Fonte: SADD, 2005.

Sendo $u(x, y)$ e $v(x, y)$ as componentes da deflexão do ponto A, $u(x + dx, y)$ e $v(x, y + dy)$ as componentes da deflexão do ponto B e como as deformações são muito pequenas, pode ser dado aproximadamente que $u(x + dx, y) \approx u(x, y) + \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right) dx$, pode-se calcular a componente de deformação normal na direção x (SADD, 2005).

Sendo a componente de deformação normal na direção x (ε_x) dada por:

$$\varepsilon_x = \frac{A'B' - AB}{AB}. \quad (2)$$

Onde as distâncias $A'B'$ e AB são dadas por:

$$A'B' = \sqrt{\left(dx + \frac{\partial u}{\partial x} dx\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x} dx\right)^2} = \sqrt{1 + \frac{2\partial u}{\partial x} + \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)^2} dx \approx \left(1 + \frac{\partial u}{\partial x}\right) dx; \quad (3)$$

$$AB = dx. \quad (4)$$

Combinando as Equações 3 e 4 com a Equação 2 temos:

$$\varepsilon_x = \frac{\left(1 + \frac{\partial u}{\partial x}\right) dx - dx}{dx}. \quad (5)$$

O que resulta em:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}. \quad (6)$$

Similarmente, podem-se obter as deformações normais nas direções y e z , Equações 7 e 8:

$$\varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}; \quad (7)$$

$$\varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z}. \quad (8)$$

Já para o cálculo da deformação no plano xy (γ_{xy}) considera-se inicialmente, devido aos seus baixos valores, que os ângulos α e β são representados como:

$$\alpha = tg\alpha; \quad (9)$$

$$\beta = tg\beta. \quad (10)$$

Então a deformação por cisalhamento no plano xy (γ_{xy}) é dada por:

$$\gamma_{xy} = tg\alpha + tg\beta = \frac{\frac{\partial v}{\partial x} dx}{dx + \varepsilon_x} + \frac{\frac{\partial u}{\partial y} dy}{dy + \varepsilon_y}. \quad (11)$$

Chegando na Equação 12:

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}. \quad (12)$$

Similarmente, pode-se obter as deformações nas direções xz e yz apresentadas respectivamente:

$$\gamma_{xz} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}. \quad (13)$$

$$\gamma_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}; \quad (14)$$

A relação entre as componentes de tensão e deformação pode ser conhecida através da lei de Hooke, que é experimentalmente demonstrada com a aplicação de tensões normais em dois lados opostos (unidimensional na direção x) de um corpo isotrópico retangular provocando somente deformações normais e não deformações por cisalhamento (distorções angulares). A relação tensão-deformação na direção longitudinal ao carregamento é linear e, segundo a lei de Hooke, pode ser dada pela Equação (15), desconsiderando a existência de tensões transversalmente ao carregamento (TIMOSHENKO e GOODIER, 2006; SANRAL, 2014):

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E}. \quad (15)$$

Onde E é o chamado módulo de elasticidade ou de Young, e é uma propriedade elástica do material. Existe outra propriedade elástica do material chamada de coeficiente de Poisson (ν), que relaciona as deformações transversais ao carregamento ($\varepsilon_y; \varepsilon_z$) com a deformação longitudinal ou axial (ε_x). Para um estado de tensões unidimensional como exemplificado anteriormente, o coeficiente de Poisson pode ser dado pela Equação 16:

$$\nu = \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} = \frac{\varepsilon_z}{\varepsilon_x}. \quad (16)$$

No caso de um estado de tensões tridimensional, tensões nas três direções x, y e z, as deformações causadas pelas tensões em cada uma das direções podem ser acumuladas assumindo o princípio da sobreposição de efeitos, sobre a hipótese que estas deformações são muito pequenas, podendo-se então encontrar as componentes de deformação generalizadas dadas pelas Equações 17, 18 e 19 nas direções x, y e z, respectivamente (TIMOSHENKO e GOODIER, 2006):

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)]; \quad (17)$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z)]; \quad (18)$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)]. \quad (19)$$

Da mesma forma que as propriedades elásticas são usadas para relacionar as deformações normais e as tensões normais, elas podem também relacionar as tensões de cisalhamento com a distorção. Sabendo-se que tensões normais aplicadas em um plano de um corpo rígido provocam tensões de cisalhamento (τ) em planos oblíquos a este plano, a deformação por cisalhamento pode ser encontrada através da Equação 20 (TIMOSHENKO e GOODIER, 2006):

$$\gamma = \frac{2(1 + \nu)\tau}{E}. \quad (20)$$

Sendo G o módulo de cisalhamento dado pela Equação 21:

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}. \quad (21)$$

Então as componentes de deformação cisalhante em função do módulo de cisalhamento nos planos xy, xz e yz são dadas pelas Equações 22, 23 e 24 respectivamente:

$$\gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G}; \quad (22)$$

$$\gamma_{xz} = \frac{\tau_{xz}}{G}; \quad (23)$$

$$\gamma_{yz} = \frac{\tau_{yz}}{G}. \quad (24)$$

2.1.2 Viscoelasticidade

Em geral, as análises mecânicas de pavimentos asfálticos utilizam como base a teoria da elasticidade sintetizada nos parágrafos anteriores. Dessa forma, é considerado que o pavimento e suas camadas têm comportamento elástico linear, o que não é uma realidade. O revestimento asfáltico, a camada de revestimento mais comum, tem comportamento viscoelástico, e diferentemente dos materiais elásticos é caracterizado pela dependência com o tempo e a taxa de aplicação dos carregamentos (LEE e KIM, 2011; SOUZA e SOARES, 2003a). Destaca-se ainda que estas propriedades viscoelásticas estão diretamente ligadas à susceptibilidade do revestimento a degradações, tais como deformações plásticas, trincamentos a baixas temperaturas e fadiga (SARAVANAN, 2012; QIU *et al.*, 2011).

Um material viscoelástico possui tanto propriedades elásticas como viscosas (comportamento tanto de sólido como de líquido), e no revestimento asfáltico as propriedades viscosas do ligante asfáltico influenciam muito a viscoelasticidade do material (HUANG, 2004). A viscosidade (λ), dada em Pascal segundo (Pa.s) ou Poise (P), pode ser representada por um elemento amortecedor, onde um grande carregamento provoca uma menor deformação do que uma série de carregamentos repetidos de menor intensidade. Isso se deve ao fato de que um material viscoso, se comportando semelhante a um amortecedor veicular, volta lentamente ao seu estado inicial após o carregamento, favorecendo o acúmulo de deformações em carregamentos sucessivos, e, por vezes, esse acúmulo provoca parcelas de deformação permanente no material e aumento da viscosidade (SANRAL, 2014; BALBO, 2007).

O ligante asfáltico, no estado fundido, é um material que apresenta características viscosas. A viscosidade é uma propriedade termo sensível, onde em baixas temperaturas o ligante apresenta uma maior consistência com menor fluidez e em altas temperaturas uma maior fluidez, sendo um material mais fluido menos resistente a tensões de cisalhamento. A viscosidade ainda depende da taxa de carregamento, sendo maior a viscosidade quanto maior for a frequência dos carregamentos, caracterizando que a propriedade tem dependência com o tempo (SANRAL, 2014).

A resposta viscoelástica do asfalto aos carregamentos pode ser estudada através de modelos mecânicos clássicos compostos dos elementos mola e amortecedor. O primeiro é

regido pela lei de Hooke, representando a resposta elástica do material, e o segundo com base na lei de Newton, representando a perda de energia devido à fluência do material (resposta viscosa), em que a relação tensão-deformação em uma solitação uniaxial pode ser dada pelas Equações 25 e 26 (HUANG, 2004):

$$\sigma_v = \lambda \frac{\partial \varepsilon}{\partial t}; \quad (25)$$

$$\varepsilon_v = \frac{\sigma_v t}{\lambda}. \quad (26)$$

Onde σ_v é a tensão axial total, λ é a viscosidade, ε_v é a deformação normal, t é o tempo, e $\partial \varepsilon$ e ∂t são as variações de deformação normal e de tempo, respectivamente.

Os modelos viscoelásticos clássicos, também chamados de modelos simples, descrevem um comportamento viscoelástico linear e são descritos como (HUANG, 2004):

- a) Modelo de Maxwell: representa as respostas viscoelásticas de característica líquida. O modelo combina uma mola e um amortecedor em série (Figura 5), tendo deformação total (ε_v) igual à soma das deformações no elemento mola (ε_E) e no elemento amortecedor (ε_η) como dado na Equação (27), e tensão axial total (σ_v) igual às tensões no elemento mola (σ_E) e no elemento amortecedor (σ_η) como mostrado na Equação 28:

$$\varepsilon_v = \varepsilon_E + \varepsilon_\eta = \frac{\sigma_v}{E_o} + \frac{\sigma_v t}{\lambda_o} = \frac{\sigma_v}{E_o} \left(1 + \frac{t}{T_o} \right); \quad (27)$$

$$\sigma_v = \sigma_E = \sigma_\eta. \quad (28)$$

Onde T_o é o tempo de relaxação e é igual a λ_o/E_o .

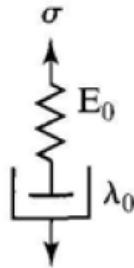


Figura 5 – Representação esquemática do modelo de Maxwell.

Fonte: HUANG, 2004.

- b) Modelo de Kelvin-Voigt: representa as respostas viscoelásticas de característica sólida, o modelo combina uma mola e um amortecedor em paralelo (Figura 6), ou seja, para uma tensão axial constante a deformação total é igual às deformações de cada elemento, como mostrado na Equação 29. A sua tensão total é dada pela soma das tensões em cada elemento como mostrado na Equação 30:

$$\varepsilon_v = \varepsilon_E = \varepsilon_\eta = \frac{\sigma_v}{E_1} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{T_1}\right) \right]; \quad (29)$$

$$\sigma_v = \sigma_E + \sigma_\eta = E_1 \cdot \varepsilon_v + \lambda_1 \cdot \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t}. \quad (30)$$

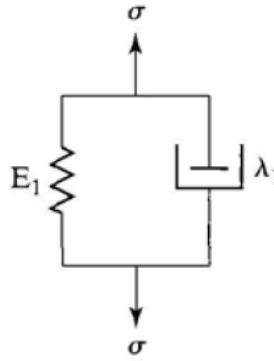


Figura 6 – Representação esquemático do modelo de Kelvin-Voigt.

Fonte: HUANG, 2004.

Os modelos clássicos podem ainda, combinados entre si, formar modelos complexos que representam com mais realidade o comportamento mecânico dos materiais viscoelásticos. Podem também ser modificados ou generalizados com a adição de coeficientes exponenciais para fornecerem respostas viscoelásticas não lineares (GRECO *et al.*, 2015; KATICHA *et al.*, 2014).

Um modelo complexo comumente utilizado é o modelo de Burger, nele é possível representar o comportamento viscoelástico de um material sólido-líquido e a sua dependência das deformações com o tempo. O modelo de Burger é composto do modelo de Maxwell e de Kelvin-Voigt em série (Figura 7) e a relação tensão-deformação é dada na Equação 31 (HUANG, 2004; CAI *et al.*, 2013):

$$\varepsilon_v = \frac{\sigma_v}{E_o} \left(1 + \frac{t}{T_0} \right) + \frac{\sigma_v}{E_1} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{T_1}\right) \right]. \quad (31)$$

Onde E_0 e T_0 , e E_1 e T_1 são os módulos de elasticidade e tempo de relaxação dos modelos de Maxwell e de Kelvin-Vogt, respectivamente.

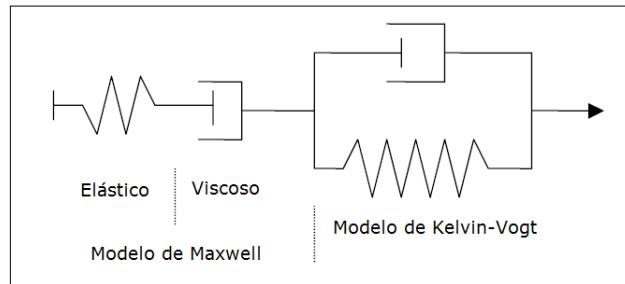


Figura 7 – Representação esquemática do modelo viscoelástico de Burger.

Fonte: Adaptado de AMARAL, 2000.

O método da função fluência (*creep compliance*) variável com o tempo, é outra alternativa para caracterizar o comportamento viscoelástico. A função fluência $D(t)$ tem dependência com o tempo e é dada pela Equação 32, podendo ser analisada através da curva função fluência ($D \times t$) apresentada na Figura 8, utilizando o método dos resíduos sucessivos para obtenção das constantes viscoelásticas (HUANG, 2004):

$$D(t) = \frac{\varepsilon_v(t)}{\sigma_v} \quad (32)$$

Ao contrário dos materiais elásticos, em que os picos de tensão e deformação acontecem no mesmo momento, nos materiais viscoelásticos a deformação é defasada em relação à tensão, e essa defasagem é denominada ângulo de fase (δ), que é apresentada para um carregamento cíclico na Figura 9 (SOUZA e SOARES, 2003b):

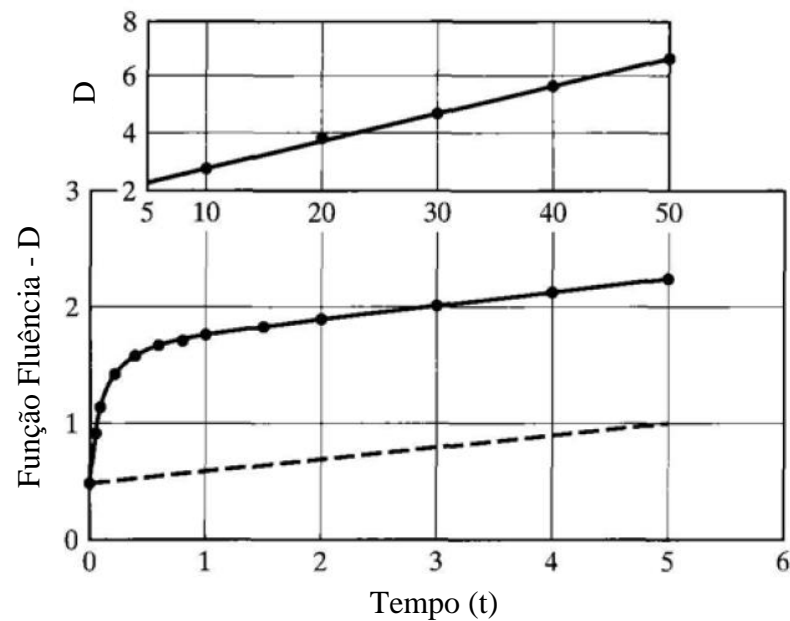


Figura 8 – Curva característica do comportamento da função fluência (D) com o tempo.

Fonte: Adaptado de HUANG, 2004.

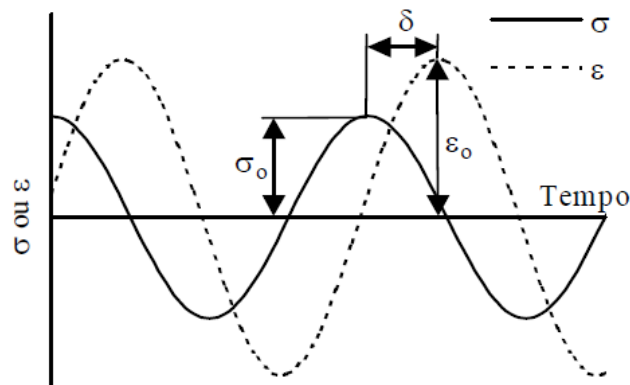


Figura 9 – Representação gráfica do comportamento da tensão e da deformação em material viscoelástico.

Fonte: SOUZA e SOARES, 2003b.

2.1.3 Método das múltiplas camadas elásticas

A teoria do sistema de múltiplas camadas, base da mecânica dos pavimentos e dos principais métodos numéricos utilizados, considera os elementos de um pavimento ou solo estratificado como camadas que respeitam algumas hipóteses simplificadoras com base na teoria da elasticidade, ou seja, considera o pavimento como uma estrutura de camadas sobrepostas.

Burmister em 1945 desenvolveu a teoria do sistema de camadas elásticas levando em conta as seguintes hipóteses simplificadoras para um sistema de duas camadas (BURMISTER, 1945a; BURMISTER, 1945b; IOANNIDES e KHAZANOVICK, 1998):

- a) As camadas são de materiais e de propriedades mecânicas diferentes;
- b) A camada superior tem espessura limitada e dimensão horizontal infinita;
- c) A camada inferior (subleito) tem espessura e dimensão horizontal infinita;
- d) O solo é homogêneo, isotrópico, e elástico linear (respeita a Lei de Hooke);
- e) Não existem tensões e nem deformações nas camadas de solo antes da aplicação das cargas externas;
- f) Não há forças de corpo no sistema (desconsidera o peso próprio das camadas);
- g) Na camada inferior, as tensões são nulas em profundidade infinita;
- h) Uma carga concentrada provoca tensões simétricas nas camadas em relação a um eixo normal às mesmas;
- i) Assume-se a continuidade de tensões normais, cisalhantes e deslocamentos na interface entre camadas, ou descarta as cisalhantes na interface.

Burmister inicialmente desenvolveu a teoria para duas camadas verificando que as tensões de cisalhamento entre as camadas do pavimento e o subleito são nulas ou quase nulas, desconsiderando então a transmissão do cisalhamento entre camadas. Porém, essa teoria, apesar de útil inicialmente, se mostrou insuficiente para suprir as necessidades dos pavimentos com três camadas (revestimento, base e subleito) ou mais (BURMISTER, 1945b).

Burmister então desenvolveu a teoria para três camadas, o que na época foi considerada uma aproximação suficiente, levando em conta o cisalhamento entre camadas. Estas equações desenvolvidas deviam satisfazer condições de contorno e continuidade de tensões e deslocamentos entre camadas (BURMISTER, 1945c).

A solução analítica de Burmister pode ainda ser ampliada para múltiplas camadas, através da idealização dos elementos do pavimento (camadas) dependendo de suas características físicas e mecânicas. Porém, o sistema de múltiplas camadas, devido a sua complexidade, é no geral resolvido através de soluções numéricas computacionais utilizando equações limites, relação deformação/deslocamento, características constitutivas e mecânicas dos materiais das camadas, e condições iniciais de contorno (IOANNIDES e KHAZANOVICK, 1998). Franco (2007) desenvolveu um *software* chamado SisPav, que utiliza, através de sua ferramenta

AEMC, o método das camadas finitas para calcular as respostas mecânicas do pavimento, considerando as camadas elásticas lineares ou não-lineares. Desta forma pode-se projetar o pavimento através de modelos mecanísticos-empíricos que realizam estimativas da vida útil das camadas relacionada aos principais processos de degradação. Este é só um dos *softwares* que utiliza o método das camadas finitas, sendo que todos eles apresentam poucas diferenças nas estimativas fornecidas.

2.1.4 Propriedades elásticas e de resistência das camadas

Para análise mecânica dos pavimentos através do método das múltiplas camadas elásticas, é necessário conhecer as suas propriedades elásticas e de resistência.

O módulo de resiliência (MR) é uma propriedade elástica básica para análise de pavimentos através da teoria das camadas elásticas (SHAQLAIH *et al.*, 2013). É equivalente ao módulo de elasticidade, mas para uma situação de carregamentos cíclicos, como acontece nos pavimentos (SOUZA e SOARES, 2003a; PONTE *et al.*, 2014). Para a obtenção do módulo de resiliência e o coeficiente de Poisson de materiais para pavimentação, usualmente são realizados três tipos de ensaios laboratoriais: tração na flexão; ensaio triaxial dinâmico (indicado para camadas granulares); e ensaio de compressão diametral (*Brazilian Test*), indicado para misturas asfálticas e camadas cimentadas (BALBO, 2007; BERNUCCI *et al.*, 2006; SOUZA e SOARES, 2003a).

O módulo de resiliência pode ainda ser estimado através da retroanálise com métodos numéricos, a partir de bacias deflectométricas levantadas em pavimentos com o uso de viga Benkelman ou equipamento FWD – *Falling Weight Deflectometer*.

Com intuito de considerar o comportamento viscoelástico de alguns materiais, é utilizada a teoria de módulo complexo (E^*) em substituição ao módulo de resiliência. O módulo complexo é composto de duas parcelas, uma elástica, chamada de módulo de armazenamento ou elástico ($E' = E^* \cdot \cos\delta$) e outra viscosa, chamada de módulo de amortecimento ou viscoso ($E'' = E^* \cdot \sin\delta$), onde δ é o ângulo de fase que caracteriza a defasagem entre a tensão e a deformação (HUANG, 2004; BALBO, 2007; BERNUCCI *et al.*, 2006; SOUZA e SOARES, 2003a).

O valor absoluto do módulo complexo é conhecido como módulo dinâmico, e é passível de ser obtido experimentalmente (BALBO, 2007). Um dos ensaios mais comuns é realizado

através de carregamento senoidal e axial em corpo de prova cilíndrico, para temperaturas e frequências de carregamentos diferentes, sendo o módulo dado pela relação entre amplitudes de tensões e de deformações, mas o módulo dinâmico pode ainda ser encontrado através do ensaio de ressonância.

O módulo dinâmico possibilita caracterizar a dependência do comportamento viscoelástico com a temperatura e a taxa de aplicação da carga, e em caso de ensaio triaxial (situação real em campo), com as tensões de confinamento (SOUZA e SOARES, 2003a, ZHAO, TANG e LIO, 2012).

Outro parâmetro mecânico utilizado na pavimentação, em especial no projeto das camadas cimentadas e asfálticas, é a resistência à tração indireta (RTI). Essas camadas, quando íntegras, devido à rigidez encadeiam com o carregamento um efeito de resposta em placa trabalhando em um regime crítico de tração na flexão. O esforço de tração na base das camadas, quando atinge o limite de resistência à tração, provoca trincamentos e posterior propagação de trincas até a superfície do pavimento (BALBO, 2007).

A resistência à tração é comumente no meio da pavimentação medida indiretamente através do ensaio brasileiro de compressão diametral, conhecido também como ensaio de Lobo-Carneiro, onde uma amostra cilíndrica é submetida a um carregamento estático na direção do diâmetro do corpo de prova, gerando um estado multiaxial de tensões em que o corpo de prova irá romper preferencialmente à tração no sentido perpendicular e no centro do diâmetro (FALCÃO e SOARES, 2002).

Outro ensaio para obtenção da resistência à tração é o ensaio de tração na flexão, utilizado em materiais tratados com cimento ou concretos para pavimentação. Baseia-se em submeter um corpo de prova prismático biapoado nas suas extremidades a um esforço de flexão pura constante no seu terço central, fazendo com que a ruptura seja na seção mais fraca por se tratar de materiais heterogêneos. No item 2.1.6 será apresentado o arranjo de dois cutelos utilizados nesse ensaio e também em ensaio de fadiga. A resistência à tração na flexão ou “módulo de ruptura” é dada pela máxima tensão de tração na flexão para o momento fletor na ruptura (BALBO, 2007).

Nas camadas granulares, o parâmetro de projeto é o estado de tensões no centro da camada, analisando através dos parâmetros de cisalhamento do solo, intercepto coesivo (c) e o

ângulo de atrito (ϕ), conforme modelo de Mohr-Coulomb, se o estado de tensões provoca tensão cisalhante maior que a resistência ao cisalhamento em qualquer direção. Contudo, comumente a capacidade da camada é determinada inadequadamente através do ensaio CBR (*California Bearing Ratio*), que é um ensaio de natureza empírica e ultimamente bastante criticado (SANRAL, 2014).

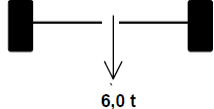
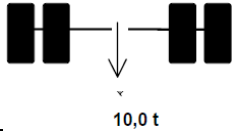
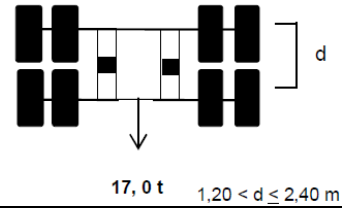
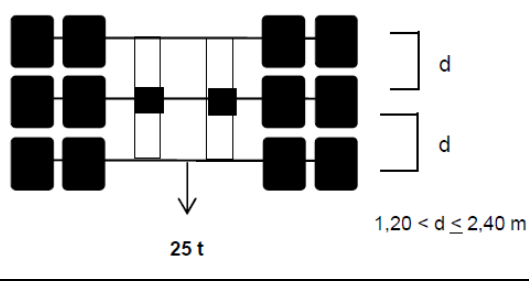
A resistência ao cisalhamento das camadas é influenciada por diversos fatores como a natureza, granulometria, forma dos grãos, resistência dos agregados utilizados, grau de compactação, módulo de resiliência, capacidade de suporte da camada inferior, intensidade das cargas verticais e tensões de confinamento (SANRAL, 2014).

2.1.5 Cargas em Pavimentos – Tráfego

As cargas recebidas pelo pavimento, cargas do tráfego, têm natureza dinâmica e transiente, sendo os veículos de carga a parte mais significativa e o excesso de carga uma das causas da aceleração de sua degradação.

As cargas do tráfego têm limites fixados em lei no Brasil, dependendo do tipo de eixo. O CONTRAN, na resolução N° 12/98 artigo 2º, fixa limites de carga por eixo. Na Tabela 1 são apresentados alguns dos principais limites de carga sem as tolerâncias.

Tabela 1- Limites de carga por tipo de eixo (sem a tolerância).

| Tipo de Eixo | Carga Máxima |
|--|--------------|
|  | 6.000 kg |
|  | 10.000 kg |
|  | 17.000 kg |
|  | 25.000 kg |

Fonte: Adaptado de DNIT, 2012.

Na Resolução nº 526 de 20/04/2015, o CONTRAN fixou uma tolerância de 10% além dos limites de carga por eixo, tolerância essa anteriormente de 7,5%, o que diretamente acarreta em um excesso de carga ainda maior nos pavimentos.

Simplificadamente, nos métodos de dimensionamento de pavimentos é considerada uma configuração do carregamento onde a carga é estática e a tensão de contato pneu-pavimento é igual à pressão interna do pneu, sendo distribuída uniformemente em uma área de contato circular, em uma área semelhante à real composta de um retângulo e dois semicírculos (Figura 10a) ou em um retângulo equivalente a área de contato (Figura 10b) (HUANG, 2004). Porém, estudos indicam que as tensões no sistema pneu-pavimento são desuniformes e que a pressão interna do pneu, apesar de influenciar, não é igual à tensão de contato, assim como a área de contato não é circular, podendo estas considerações gerarem erros na previsão de desempenho, principalmente das camadas mais superficiais (NÚÑES *et al.*, 2011; TEIXEIRA, SOUZA e SOARES, 2007; HUANG, 2004).

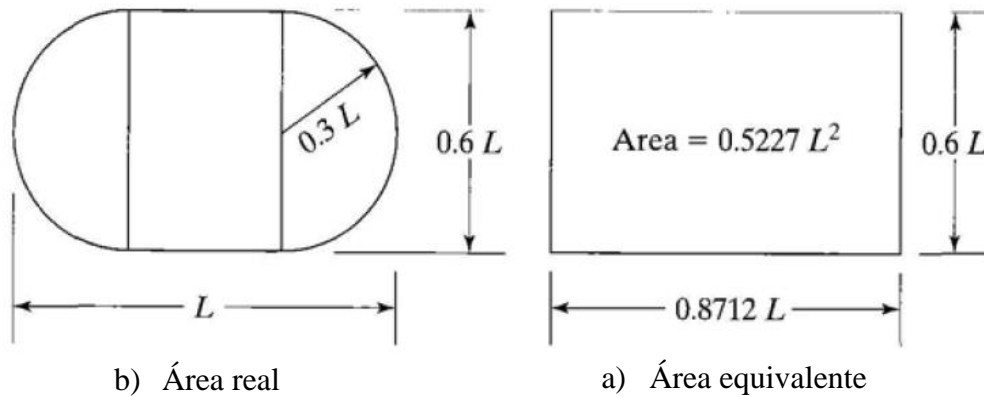


Figura 10 – Áreas simplificadas de contato pneu-pavimento.

Fonte: Adaptado de HUANG, 2004.

Apesar de não ser usual, as cargas do tráfego podem ser analisadas na sua característica real, em movimento, característica que influencia bastante os materiais viscoelásticos devido à superposição de efeitos da variação da intensidade da carga na sua passagem. Para análise da intensidade da carga em movimento (L) leva-se em conta a sua dependência com o tempo (t), onde o tempo de aplicação da carga (d) é função da velocidade do veículo e da área de contato pneu pavimento (HUANG, 2004):

$$d = \frac{12a}{s}. \quad (33)$$

Onde a é o raio de contato do pneu com o pavimento em metros e s a velocidade em metros por segundo.

Dentro do tempo de contato ($-\frac{d}{2} \leq t \leq \frac{d}{2}$) a intensidade da carga varia, sendo nula no início do contato ($t = -\frac{d}{2}$), máxima e igual à carga estática (q) na metade do contato ($t = 0$) e nula novamente no fim do contato ($t = \frac{d}{2}$). Essa variação da intensidade da carga faz com que ela possa de forma simplificada ser compreendida através do gráfico da Figura 11 e da Equação 34 (HUANG, 2004):

$$L(t) = q \cdot \text{sen}^2 \left(\frac{\pi}{2} + \frac{\pi t}{d} \right). \quad (34)$$

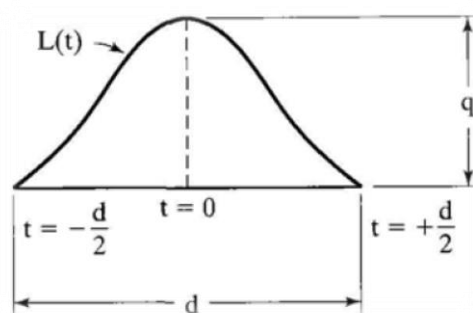


Figura 11 - Comportamento de intensidade da carga em função do tempo.

Fonte: HUANG, 2004.

Para avaliação dos danos que as cargas provocam nos pavimentos pode ser utilizada a teoria de dano acumulado, proposta por Miner (1945) para análise de fadiga de metais. Nela é considerado que o dano provocado pela repetição de um nível de carregamento (i), tensão (σ_i) e deformação (ε_i), é a razão entre o número de repetições de carga até o momento (n_i) pelo número de repetições necessárias para a falha (N_i) encontrado através de equações de previsão de desempenho em função da tensão ou deformação. Os danos provocados para cada nível de carregamento são somados, existindo falha total do material quando a soma dos danos (razões) for unitária como mostrado na Equação 35 (HUANG, 2004):

$$\sum_{i=1}^x \frac{n_i}{N_i} = 1. \quad (35)$$

O item 2.1.6 apresenta os principais processos mecânicos de degradação dos pavimentos asfálticos, mostrando as respostas críticas do pavimento que são associadas a cada um dos processos e consequentemente utilizadas nas equações de previsão de desempenho.

2.1.6 Degradações no pavimento

As degradações do pavimento com o surgimento de rompimentos estruturais como trincamentos, afundamentos de trilhas de roda, entre outros, estão principalmente associados à fadiga das camadas cimentadas e asfálticas, ao rompimento por cisalhamento de camadas granulares e ao acúmulo de deformações plásticas nas camadas e, principalmente, no subleito.

Um processo mecânico de maior destaque entre estes é a fadiga devido à repetição de deformações de tração horizontais na fibra inferior de camadas asfálticas ou cimentadas,

provocando a formação de microfissuras (Figura 12). Estas, por sua vez, serão pontos de concentração de tensões, e com as repetições de cargas irão se propagar verticalmente até a superfície do pavimento causando a falha. Esse trincamento das camadas faz com elas percam rigidez, aumentando a deformabilidade e o potencial de entrada de umidade no pavimento (QUINTANA e LIZCANO, 2012; SAID *et al.*, 2011; TEIXEIRA, SOUZA e SOARES, 2007).

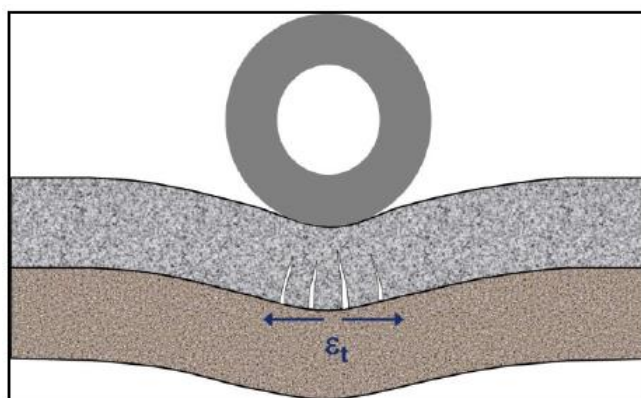


Figura 12 – Processo de fadiga por flexão no revestimento asfáltico.

Fonte: SANRAL, 2014.

O número de ciclos de carregamento que a camada asfáltica ou cimentada recebe até o trincamento é chamado de vida de fadiga, e está relacionado à resistência à tração da camada e à deformação crítica na tração. Para estudo da vida de fadiga de misturas asfálticas e cimentadas em laboratório, pode-se utilizar o ensaio de compressão diametral com aplicação de cargas dinâmicas quase senoidais, com frequência de aplicação de cargas tradicionalmente no Brasil de 1 Hz, mantendo-se a tensão ou a deformação controlada, onde o resultado será o número de golpes necessários para romper o corpo de prova para cada nível de tensão (QUINTANA e LIZCANO, 2012; FALCÃO e SOAREZ, 2002; LOUREIRO, SOARES e MOTTA, 2016).

Outro ensaio para a análise da vida de fadiga em misturas asfálticas é o ensaio de vigota, também chamado de ensaio de vida de fadiga de quatro pontos, onde um corpo de prova prismático com uma dimensão linear significativamente superior às demais é apoiado nas suas extremidades e recebe dois carregamentos pontuais cíclicos no terço central da vigota (Figura 13), garantindo flexão pura no terço central com momento fletor igual a $\frac{F.L}{6}$ (BALBO, 2007; CAVALCANTI, *et al.*, 2013). O ensaio é realizado com frequência de carregamentos de 5 Hz a 10 Hz, à temperatura de 20° C, e é considerado que a vida de fadiga foi atingida quando a rigidez à fadiga, dada pela relação entre a tensão de tração na flexão e sua respectiva deformação, atingir 40% a 50% da inicial (CAVALCANTI *et al.*, 2013).

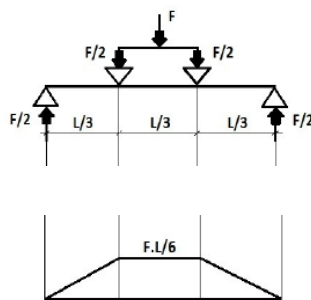


Figura 13 – Ensaio de vigota.

Fonte: Adaptado de CAVALCANTI *et al.*, 2013.

Os resultados laboratoriais do ensaio de vida de fadiga em tensão controlada podem ainda ser relacionados ao número de repetições de eixo padrão ou a cada nível de tensão aplicada no ensaio. Pode-se então gerar modelos de previsão de desempenho de fadiga utilizando fatores laboratório-campo que levam em conta também aspectos ambientais e locais. Estes modelos têm como principal variável a deformação específica horizontal ou a tração na flexão na base das camadas asfálticas ou cimentadas quando realizados em deformação controlada (LOUREIRO, SOARES e MOTTA, 2016).

Já o rompimento por cisalhamento das camadas ou do pavimento, ocorre ou se inicia no geral nas camadas granulares, sendo este o principal parâmetro de dimensionamento destas camadas. O estado de tensões no meio da camada, conforme Figura 14, não deve provocar tensões de cisalhamento maiores que a resistência ao cisalhamento da mesma (SANRAL, 2014).

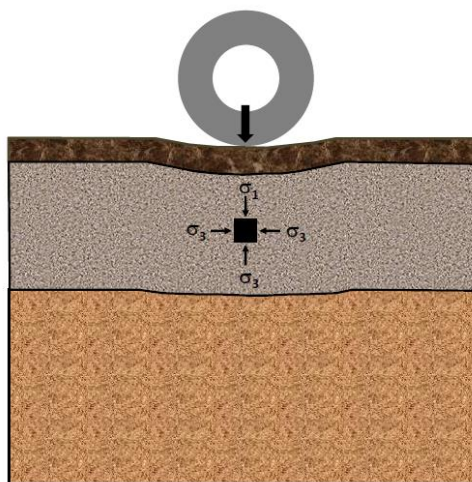


Figura 14 – Comportamento do estado de tensões no meio das camadas granulares.

Fonte: SANRAL, 2014.

Por fim, o acumulo de deformações permanentes durante a vida útil do pavimento, tendo a sua maior parcela no topo do subleito, é a causa dos defeitos de trilhas de roda que podem levar à ruptura funcional. A deformação no topo do subleito (Figura 15) é um dos principais parâmetros de dimensionamento do pavimento para proteção do subleito. Ou seja, dimensiona-se o pavimento de forma que as tensões cheguem ao topo do subleito de forma atenuada, diminuindo as deformações permanentes com o tempo (BALBO, 2007; SANRAL, 2014; TEIXEIRA, SOUZA e SOARES, 2007).

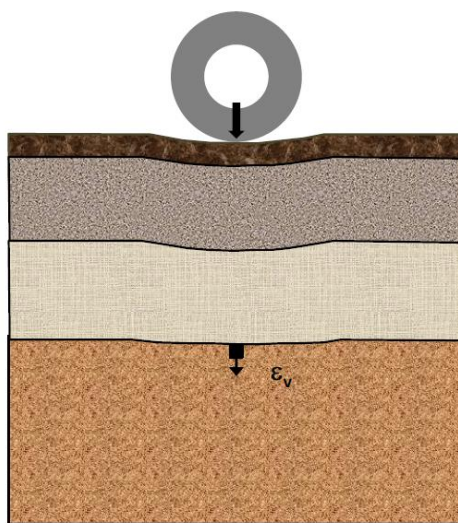


Figura 15 – Comportamento do estado de deformação vertical no topo da camada de subleito.

Fonte: SANRAL, 2014.

2.2 Método dos elementos finitos aplicado a pavimentos

O grau de complexidade do comportamento mecânico dos pavimentos limita a utilização de soluções analíticas para o seu entendimento, mas é viável através de soluções numéricas, destacando-se o Método das Múltiplas Camadas Elásticas, anteriormente descrito, e, o cada vez mais utilizado, Método dos Elementos Finitos (MEF). Este último tem razoável simplicidade e possibilita a utilização de diferentes modelos constitutivos e modelos de formação e propagação de danos no pavimento (SOUZA e SOARES, 2003b; FONSECA *et al.*, 2002).

Com o surgimento na primeira metade do século vinte, o método dos elementos finitos (MEF) pode ser utilizado em várias áreas da engenharia para entendimento de processos físicos em meios contínuos. Não se aplica somente a problemas mecânicos de pavimentos, mas desde problemas estáticos ou dinâmicos, lineares ou não lineares em análises de estado de tensão, até análises de mecânica dos fluidos e fluxo eletromagnético, envolvendo uma série de parâmetros de campo que variam de ponto para ponto (MOAVENI, 2003; MADENCI e GUVEN, 2006).

Consistindo em uma aproximação numérica para solucionar equações diferenciais por integração através de condições de contorno generalizadas, o MEF consiste em dividir o meio contínuo (domínio) em partes menores, partes discretizadas, também chamadas de elementos finitos, que têm inerentes funções que descrevem aproximadamente as variáveis de campo (MOAVENI, 2003; SILVA *et al.*, 2001; MADENCI e GUVEN, 2006).

Essas funções, também chamadas de funções de interpolação, são definidas através das variáveis nodais, graus de liberdade, que dependem da natureza do problema e dos elementos utilizados, sendo estas variáveis referidas a pontos específicos chamados de nós que ligam os elementos finitos e são referenciados por coordenadas espaciais. Os graus de liberdade dos problemas relacionados à mecânica de meios sólidos são os deslocamentos dos nós (MADENCI e GUVEN, 2006).

Os elementos finitos por sua vez, formados por dois ou mais nós, podendo ser do tipo linha, área ou volume, são referenciados pela sequência dos números dos nós que o pertencem na ordem anti-horária (MADENCI e GUVEN, 2006). A Figura 16 mostra alguns tipos de elementos finitos mais utilizados e as respectivas numerações de seus nós:

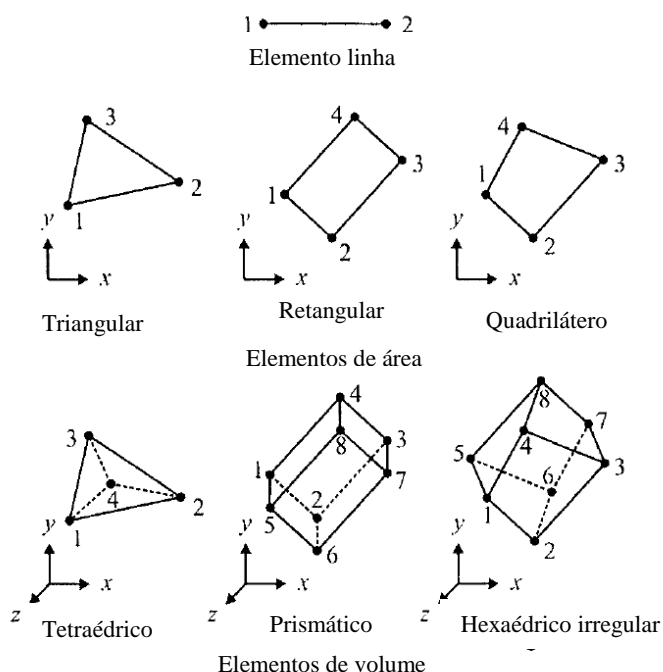


Figura 16 – Tipos de elementos finitos.

Fonte: Adaptado de MADENCI e GUVEN, 2006.

As funções utilizadas no método dos elementos finitos são variadas, dependendo do tipo de problema. Já o número de funções é proporcional ao nível de discretização do sistema e à precisão desejada, sendo a sua utilização prática mais viável com o uso de ferramentas computacionais, onde as dimensões apropriadas do domínio e o grau de discretização irão definir a acurácia do modelo (SILVA *et al.*, 2001; BESKOU, TSINOPOULUS e THEODORAPOULOS, 2016).

O método dos elementos finitos é basicamente dividido nas seguintes etapas (MADENCI e GUVEN, 2006):

- a) Discretização do domínio, divisão do meio contínuo em subdomínios (elementos finitos);
- b) Seleção das equações de interpolação (escolha do modelo mecânico, elástico ou viscoelástico);
- c) Desenvolvimento de elementos matriciais para o subdomínio;
- d) Montagem dos elementos matriciais em cada subdomínio, obtendo-se um elemento matricial global para todo o domínio;
- e) Seleção das condições de contorno;
- f) Realização de cálculos adicionais necessários.

Utilizado em análise elástica de sólidos, sua aplicação gera um sistema de equações lineares, que pode ser escrito em forma matricial, como:

$$K \cdot u = F. \quad (36)$$

Onde, K é a matriz de rigidez, u é o vetor de incógnitas, e F é o vetor força. Dependendo da natureza do problema o vetor força (F) pode ser dependente do tempo e a matriz de rigidez (K) pode ser dependente do vetor u .

Quando efeitos não-lineares são incorporados, a solução normalmente é feita de forma iterativa, recaindo cada iteração em um sistema semelhante à Equação (36), mas com a matriz tangente (K) dependente dos deslocamentos (u). Caso a análise seja dinâmica, o vetor força (F) varia com o tempo.

De forma mais prática nos *softwares*, as etapas de utilização do método dos elementos finitos são dadas pela Figura 17 (COUTINHO *et al.*, 2009):

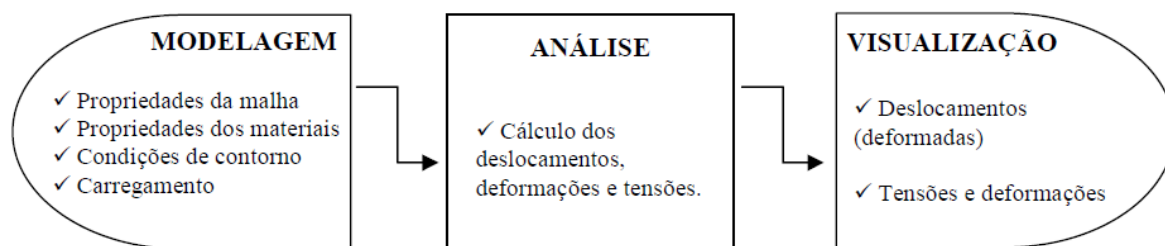


Figura 17 – Etapas da utilização do método dos elementos finitos.

Fonte: COUTINHO *et al.*, 2009

Na pavimentação o nível de discretização do domínio é comumente maior nas camadas mais próximas do carregamento e de maior interesse de estudo (maior número de elementos finitos) e menor nas camadas mais profundas ou de pouco interesse (menor número de elementos finitos e consequentemente menor esforço computacional) (TORRÃO, 2015). Na Figura 18 é exemplificado muito bem isso, onde a discretização é muito maior na proximidade da carga P e consequente na região de maiores tensões (NCHRP/TRB, 2004; MINHOTO, 2007).

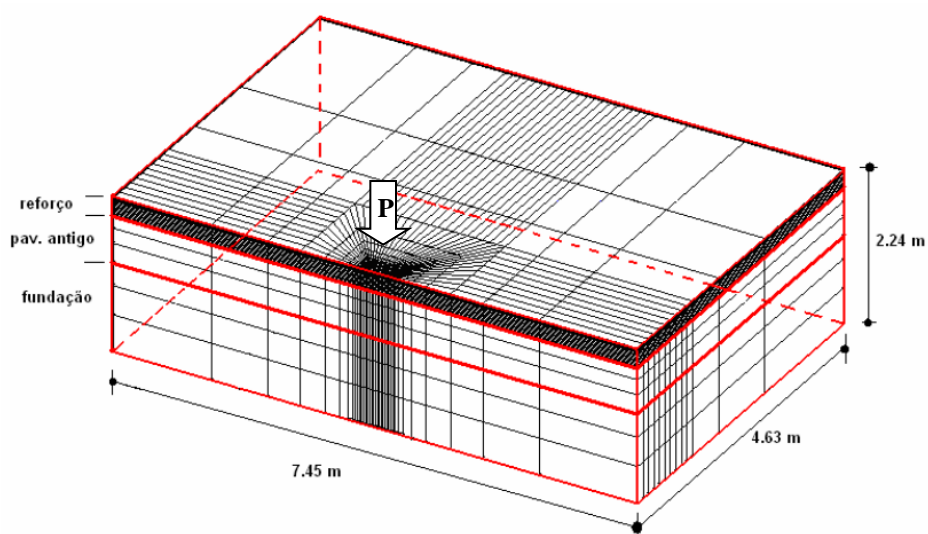


Figura 18 – Modelo em elementos finitos de um pavimento.

Fonte: Adaptado de MINHOTO, 2007.

2.2.1 Aplicações do método dos elementos finitos a pavimentos

Muitas pesquisas já foram realizadas utilizando o método dos elementos finitos em análise de pavimentos, podendo-se citar algumas delas, como a de Beskou, Tsinopoulus e Theodorakpoulos. (2016), Fontes *et al.* (2009), Silva *et al.* (2013), e Calderón e Muños (2014), descritas simplificadaamente nos parágrafos seguintes.

Beskou, Tsinopoulus e Theodorakpoulos. (2016) escolheram um domínio de forma cúbica e dimensões de no mínimo duas vezes a largura do eixo do veículo com o objetivo de dar melhor realismo, acurácia e eficiência computacional ao modelo, com elementos finitos de 8 nós e 24 graus de liberdade.

As condições de contorno utilizadas por Beskou, Tsinopoulus e Theodorakpoulos. (2016) na base e faces do modelo geométrico do pavimento foram de três tipos, a primeira atribuindo condições viscosas de amortecimento que eliminam a reflexão de tensões nas faces e na base provocada pelo efeito dinâmico das cargas, o segundo restringido o deslocamento da base na vertical, e o terceiro além de restringir movimentos verticais da base também movimentos horizontais das faces laterais.

Os tipos de carregamentos utilizados por Beskou, Tsinopoulus e Theodorakpoulos. (2016) foram dinâmicos e estáticos, considerando três carregamentos diferentes para os três eixos do veículo escolhido, levando em conta na equação global da simulação o amortecimento das cargas dinâmicas no pavimento e considerando os materiais com características elástico-lineares.

Beskou, Tsinopoulus e Theodorakpoulos. (2016) concluíram que as cargas dinâmicas provocam maiores tensões e deformações no pavimento do que as estáticas, sendo a resposta proporcional à velocidade do veículo. As cargas pontuais resultam em tensões e deformações maiores do que cargas distribuídas ou várias cargas pontuais de mesma intensidade, e que a condição de contorno de amortecimento viscoso na base e nas faces laterais do modelo geométrico é válida.

Fontes *et al.* (2009) avaliou o dano na camada de reforço em asfalto-borracha de pavimento rodoviário, ele introduziu no *software* ANSYS® modelos de propagação de trincas com base na lei da fadiga da mistura asfáltica que levam em conta os efeitos do tráfego e variações de temperatura. Os modelos de propagação de trincas utilizados, de autoria de Minhoto (2007), consideram que tensões provocadas pela variação de temperatura são sobrepostas às tensões provocadas pelo tráfego ao longo do tempo em intervalos de pequena duração.

A modelagem geométrica realizada por Fontes *et al.* (2009) simulou o trincamento da camada asfáltica existente utilizando elemento finito de 8 nós com 24 graus de liberdade cada.

Foi realizada simulação numérica para o pavimento com reforço em asfalto-borracha e com mistura convencional, para cinco perfis de temperatura a partir dos quais foi obtido o dano por fadiga mensal no reforço do pavimento. A simulação com reforço em asfalto-borracha apontou para uma vida útil cerca de 29,9 vezes maior que com a mistura convencional, apresentando um desempenho muito superior.

Silva *et al.* (2013) avaliou o uso de malhas mistas com elementos finitos e elementos infinitos (elementos de contorno) para simulação mecânica de pavimento asfáltico com o método dos elementos finitos (MEF), realizando comparativo com os resultados obtidos em simulações com o MEF utilizando malhas somente com elementos finitos (convencional) e com o método das múltiplas camadas elásticas utilizando o *software* AEMC/SisPav (Franco, 2007). A utilização de elementos infinitos objetivou solucionar o problema que as condições de contorno em meios semi-infinitos não são bem definidas como é o caso dos pavimentos rodoviários. As análises foram realizadas considerando o revestimento com dois comportamentos mecânicos possíveis, elástico linear ou viscoelástico linear.

Para a análise numérica Silva *et al.* (2013) utilizou o *software* CAP3D desenvolvido no Laboratório de Mecânica dos Pavimentos – LMP da Universidade Federal do Ceará – UFC (Holanda *et al.*, 2006). O *software* tem capacidade de realizar simulações em modelos planos e tridimensionais, lineares e não lineares, e com cargas estáticas e dinâmicas. Para geração da malha foi utilizado o pré-processador PMG também desenvolvido pelo LMP/UFC, onde são definidos a geometria e malha do problema, características do carregamento externo, e as propriedades mecânicas das camadas.

A geometria do modelo utilizado por Silva *et al.* (2013) foi plana com dimensões na horizontal e na vertical de 12 e 50 vezes o raio do carregamento respectivamente. Utilizou malhas com elementos finitos de oito nós somente e mista com elementos finitos de oito nós na zona logo abaixo do carregamento e infinitos de seis nós do fim da zona de elementos finitos até o contorno do modelo.

As simulações com malha mista e com o AEMC/SisPav tiveram resultados de deflexão bem semelhantes, enquanto a malha convencional forneceu deflexões menores apresentando um comportamento mais rígido em consequência da condição de deslocamento zero nos contornos. Em relação às tensões horizontais e verticais os resultados foram semelhantes nos três (SILVA *et al.*, 2013).

Na análise considerando o revestimento como viscoelástico linear para o mesmo pavimento, Silva *et al.* (2013) verificou novamente que a malha mista fornece maiores resultados de deflexão em relação à com elementos finitos somente, e que os resultados de tensões horizontais e verticais são semelhantes nas três simulações. Comparando as tensões verticais no topo do subleito para revestimento elástico linear e revestimento viscoelástico linear, foi verificado que as simulações forneceram respostas semelhantes, mas a viscoelástica apresentou acúmulo de tensões no revestimento mesmo após a aplicação da carga, favorecendo a sobreposição de tensões com novos carregamentos.

Silva *et al.* (2013) concluíram que a utilização de malhas mistas no MEF melhora a precisão e a eficiência (menor tempo de computação) em relação à malha convencional. Em comparação com o método das múltiplas camadas elásticas, o uso de malhas mistas ainda fornece tempo de computação maior, porém possibilita a utilização de modelos constitutivos não lineares ou dependentes do tempo.

Calderón e Muños (2014) realizaram simulação do comportamento mecânico de pavimento asfáltico através do método dos elementos finitos com o objetivo de avaliar os resultados de tensões, deformações e deslocamentos encontrados através deste método e comparar com os obtidos através do método das múltiplas camadas elásticas.

Calderón e Muños (2014) utilizaram o *software* de elementos finitos Algor ©, modelando o pavimento em três dimensões, considerando comportamento elástico linear das camadas, aderência entre as camadas, restrição de deslocamentos nos limites laterais e na base do modelo, elemento finito do tipo hexaédrico isotrópico com oito nós de três graus de liberdade cada, e duas cargas externas igualmente distribuídas em forma circular e distando entre si o valor do raio do carregamento.

Para caracterizar mecanicamente os materiais, Calderón e Muños (2014) utilizaram valores de módulo de resiliência para as camadas granulares encontrados através de ensaio triaxial dinâmico e de módulo dinâmico do revestimento asfáltico encontrado através de ensaio de tração indireta.

Calderón e Muños (2014) avaliaram se os resultados obtidos das respostas mecânicas foram condizentes com o esperado para o comportamento do pavimento asfáltico modelado. Consideraram que foram satisfatórios, destacando a alta concentração de deformações na

interface entre o revestimento asfáltico e base granular, o que já era esperada, e maiores tensões horizontais na base do revestimento no sentido longitudinal da via em relação ao sentido transversal.

Por fim, Calderón e Muños (2014) realizaram comparativo entre os resultados das respostas críticas encontradas através do *software* Algor © com os encontrados através do *software* Elsym5 baseado no método das múltiplas camadas elásticas. Os autores concluíram que os resultados foram bem semelhantes, tendo o MEF uma diferença de 2,4 a 3,0 % a menos e 6,5 % a mais para as deformações específicas horizontais na base do revestimento e tensão vertical no topo do subleito, respectivamente, orientando, porém, uma futura calibração do modelo com dados de campo.

2.3 Instrumentação de pavimentos

As modelagens numéricas para estimar as respostas dos pavimentos aos carregamentos dinâmicos são muito utilizadas nos dias de hoje, porém as medições diretas dessas respostas poderiam dar um melhor entendimento do comportamento do pavimento, assim como servir de comparativo e condições de contorno para estes modelos.

Pouco utilizada na pavimentação no Brasil, a instrumentação já é bastante utilizada em outras áreas, e é cada vez mais utilizada principalmente fora do país. A instrumentação traz a possibilidade de acompanhar as reações do pavimento de acordo com as variações das propriedades das camadas e de variáveis ambientais, fornecendo um melhor entendimento das respostas mecânicas (TANG *et al.*, 2013; DEUSEN *et al.*, 1992; MAADANI *et al.*, 2014; DNIT, 2008).

Existem alguns tipos de sensores utilizados na instrumentação de pavimentos, e para a escolha devem ser levados em conta os seguintes fatores (MAADANI *et al.*, 2014; ELSEIFI *et al.*, 2012):

- a) Tipo de resposta do sensor (a maioria tem resposta em diferença de potencial elétrico);
- b) Sensibilidade de resposta do sensor;
- c) Compatibilidade do mecanismo do sensor com o sistema de aquisição de dados;
- d) Expectativa de vida do sensor em uso;
- e) Limitações no que se refere à temperatura e interferência eletromagnéticas;
- f) Tipo de camada a ser instrumentada;

- g) Possível interferência entre os sensores utilizados em uma mesma seção.

Na sequência são apresentados os principais tipos de sensores utilizados na pavimentação.

2.3.1 *Medidores de tensão*

A medição de tensões através de instrumentação em solos, apesar de ser algo já existente há algum tempo, está entre as mais incertas na instrumentação geotécnica. Para uma boa eficácia da instrumentação para medição de tensões, é muito importante o conhecimento da interação entre o sensor e a massa de solo através de suas características físicas (DEUSEN *et al.*, 1992).

Basicamente são usados dois tipos de sensor para medição de tensões: a célula de carga e a célula de pressão. A primeira utiliza sistemas de medição através da variação de resistência elétrica de *strain gages* (extensômetros) e a segunda um sistema baseado na medição de variação de pressão do fluido que preenche a célula. Na pavimentação o sensor mais apropriado é a célula de carga por ter melhor compatibilidade com cargas dinâmicas e ter resposta linear, porém tem como desvantagem a susceptibilidade a efeitos ambientais e infiltrações de água. A célula de pressão é indicada para medições de tensões geradas por grandes estruturas (ELSEIFI *et al.*, 2012; DEUSEN *et al.*, 1992).

O projeto de instrumentação com sensores de tensão deve levar em conta alguns fatores como: a geometria da célula, que pode alterar a forma como recebe o carregamento (uniforme ou desuniforme), a acurácia da medição, e a influência das cargas laterais; as propriedades físicas da célula e do material ao redor, destacando que células mais rígidas que o solo tendem a superestimar as tensões, assim como menos rígidas subestimar; e os fatores ambientais, desde o potencial de degradação do sensor por agentes ambientais até efeitos de temperatura na resposta dos *strains gages*, ou na deformação térmica dos componentes da célula de carga (ELSEIFI *et al.*, 2012; DEUSEN *et al.*, 1992).

2.3.2 *Medidores de deformação*

A deformação nas camadas do pavimento é um importante parâmetro de projeto, principalmente relacionado à fadiga de camadas cimentadas ou asfálticas sujeitas à flexão. Para medição de deformações em pavimentos, geralmente são utilizados *strain gages* e sistemas baseados nesse sensor de resposta elétrica (DEUSEN *et al.*, 1992).

A medição de deformações através de extensômetros é baseada na leitura da variação da resistência elétrica do sensor devido à sua deformação, sendo a resistência elétrica dada por:

$$R = \frac{\rho L}{A}. \quad (37)$$

Onde, R é a resistência elétrica em ohms, ρ é a resistividade do material, L o comprimento do resistor elétrico, e A a seção transversal do resistor.

A deformação do *strain gage* altera o seu comprimento e, pelo efeito do coeficiente de Poisson, a área da seção e a resistividade do material, por consequência a resistência. A Equação 38 é utilizada para relacionar a resistência inicial do condutor e a variação com a deformação (KYOWA, 2012):

$$\frac{\Delta R}{R_o} = F_G \frac{\Delta L}{L_o} = F_G \varepsilon_G. \quad (38)$$

Onde: ΔR é a variação de resistência elétrica, R_o a resistência elétrica inicial, F_G é o chamado fator *gage* que está relacionado com o tipo de *strain gage* e o seu material constituinte, ΔL a variação de comprimento do resistor, L_o o comprimento inicial do resistor e ε_G a deformação axial do *strain gage*.

Os extensômetros eletrônicos no geral são modificados para o uso no estudo de pavimentos, colando-os em blocos extraídos dos pavimentos ou amostras das camadas, ou no desenvolvimento de um sensor do tipo H-Gage que é utilizado diretamente no pavimento (DEUSEN *et al.*, 1992). O sensor do tipo H-Gage, nomenclatura devido o formato em “H”, consiste em um extensômetro com duas barras metálicas nas pontas, que servem de ancoragem, sendo instalado principalmente na fibra inferior de camadas cimentadas ou asfálticas.

A mudança de resistência do extensômetro devido a deformações é muito pequena, se tornando um problema para leitura nas medições. A ponte Wheatstone ilustrada na Figura 19 é uma solução para este problema. A variação relativa de resistência pode ser encontrada através da sua relação com a variação de tensão elétrica de entrada e de saída dada na equação de equilíbrio:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_4 - R_3}. \quad (39)$$

Onde: V_1 é a tensão elétrica de entrada, V_2 é a tensão elétrica de saída, R_1 , R_2 , R_3 e R_4 são as resistências dos extensômetros, normalmente $120\ \Omega$.

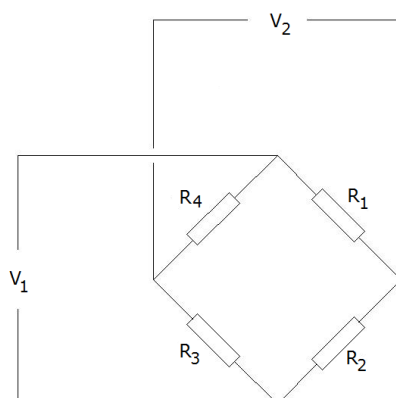


Figura 19 – Ponte completa de Wheatstone.

Fonte: Adaptado de DEUSEN *et al.*, 1992.

Quando a ponte está em equilíbrio, $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$, a tensão elétrica de saída é nula. Já se um extensômetro se deformar, a ponte fica em desequilíbrio e a tensão elétrica de saída deixa de ser nula. Com a tensão elétrica de saída é possível calcular o valor da resistência elétrica do extensômetro que sofreu deformação através da Equação 39, e com a Equação 38 calcula-se a respectiva deformação (DEUSEN *et al.*, 1992).

A ponte de Wheatstone pode ainda sofrer duas modificações que vão depender do número de extensômetros substituídos por resistores: substituindo três extensômetros tem-se um quarto ($1/4$) de ponte e substituindo dois extensômetros tem-se meia ($1/2$) ponte. Quanto menor for o número de extensômetros substituídos, maior será a sensibilidade do circuito, e menor a influência por variações de temperatura e eletromagnéticas (FRANÇA, 2007).

2.3.3 Medidores de temperatura

Devido à sensibilidade térmica das camadas asfálticas, é importante ter dados de temperatura em paralelo às medições de tensões e principalmente de deformações, sem falar da sensibilidade dos sensores, onde as temperaturas podem servir para corrigir as medições. A medição de temperatura em pavimentos é comumente realizada através de sensores chamados termopares (DNIT, 2008).

O funcionamento do termopar consiste em medir a temperatura através de sua relação com corrente elétrica, ou tensão elétrica, gerada pela diferença de temperatura entre duas

extremidades que ligam dois fios de composições metálicas diferentes. Este fenômeno é chamado Seebeck (DNIT, 2008; FRANÇA, 2007).

Na Figura 20 apresenta-se um esquema eletrônico de um termopar, onde a junta 1 (J_1) é a junta ligada à superfície de medição da temperatura e a junta 2 (J_2) é a junta de referência geralmente ligada a um balde de gelo a 0° C (OMEGA, 2016).

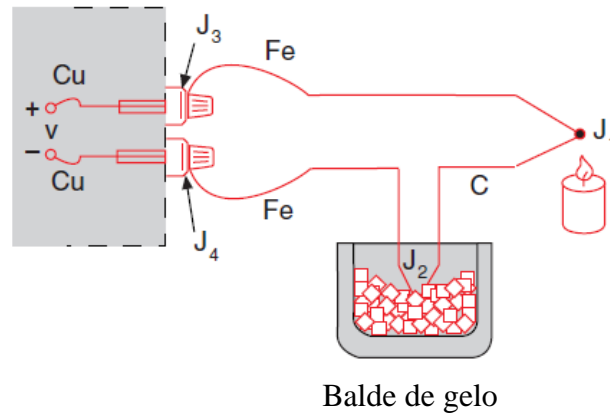


Figura 20 – Termopar de Constantan (CuNi) e Ferro (Fe).

Fonte: OMEGA, 2016.

A relação entre a tensão elétrica gerada e as temperaturas nas juntas é dada pela Equação 40:

$$V = \alpha(t_{j1} - t_{j2}). \quad (40)$$

Onde: V é a tensão elétrica em Volts, t_{j1} e t_{j2} são as temperaturas em graus Celsius nas juntas 1 e 2, respectivamente, e α é o coeficiente de Seebeck, que depende da composição do termopar. Sendo a temperatura de referência igual a zero, de acordo com o esquema da Figura 20, tem-se que a temperatura da superfície ligada à junta 1 tem como fator de relação com a tensão elétrica o coeficiente de Seebeck, conforme a Equação 41 (OMEGA, 2016):

$$V = \alpha \cdot t_{j1}. \quad (41)$$

Acontece que normalmente o coeficiente de Seebeck não é constante com a temperatura, tornando a relação tensão elétrica e temperatura não linear. Essa não linearidade pode ser resolvida utilizando-se curvas de calibração obtidas em ambiente com temperaturas controladas nas superfícies (OMEGA, 2016; DNIT, 2008). Na Figura 21 observam-se exemplos de curvas de tensão elétrica versus temperatura de alguns tipos de termopares comerciais em função das

suas composições, podendo-se observar a faixa de trabalho de cada um dos tipos e o grau de linearidade da relação tensão e temperatura.

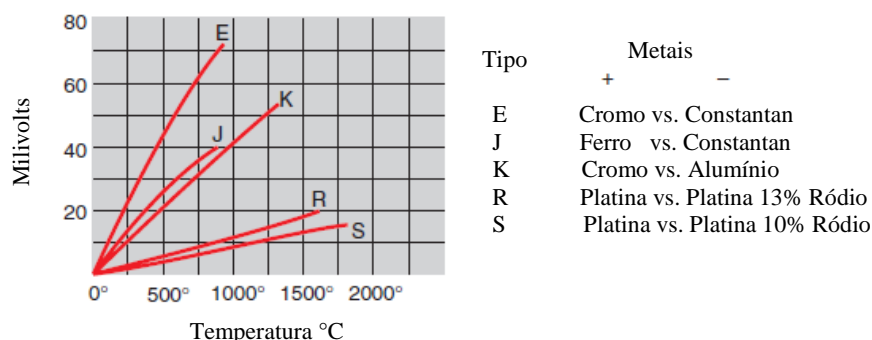


Figura 21 – Curvas característica de temperatura versus tensão elétrica em termopares.

Fonte: Adaptado de OMEGA, 2016.

2.3.4 Experiências em instrumentação de pavimentos

Na pesquisa de Maadani *et al.* (2014) foi analisado o comportamento mecânico de pavimentos em regiões frias através de instrumentação em pista experimental na cidade de Ottawa, no Canadá, onde foram utilizados sensores estruturais assim como sensores ambientais. A pista foi instrumentada com sensores de deformação do tipo *H-Gage* instalados na base da camada de revestimento asfáltico nas direções longitudinal e transversal, células de pressão instaladas na base e no subleito, placas de recalque em várias profundidades, e sensor de temperatura tipo termopar em três ou quatro profundidades do revestimento e nas outras camadas. Além destes sensores principais, foram também instalados sensores do tipo serpentina, para medição de deformações nos sentidos longitudinal e transversal ao tráfego, e sensores de umidade e de resistividade.

Este trabalho deu ênfase para os resultados da variação das tensões verticais com a temperatura e deformações permanentes com o tempo, onde foi destacado que as tensões na base e no subleito diminuem significativamente com a diminuição das temperaturas do revestimento e que as deformações permanentes durante a operação da pista foram estagnadas a partir de um mês e meio de operação. Os autores concluíram que a instrumentação pode ser um bom caminho para estudo do comportamento mecânico dos pavimentos, destacando a importância da precaução na instalação dos sensores.

Na pesquisa de Elseifi *et al.* (2012) foi avaliada a acurácia e repetibilidade das medições da instrumentação e o nível de resistência dos sensores aos carregamentos. Uma pista

experimental recebeu sensores do tipo H-Gage na fibra inferior do revestimento asfáltico e da camada de base asfáltica, e sensores do tipo células de pressão no topo das camadas de sub-base e subleito. A fase de testes foi realizada em três etapas para cada uma das três pistas, utilizando um trem de carga circular com carga e número de ciclos diferentes para cada etapa.

Segundo Elseifi *et al.* (2012), os resultados de medição de deformações foram considerados aceitáveis, apresentando um coeficiente de variação média de 7,5 % entre dois sensores H-Gage, porém, ao contrário do que se esperava, as deformações diminuíram com a degradação do pavimento, os autores indicaram que as prováveis explicações são a dispersão de material ao redor do sensor diminuindo a sua ancoragem, fadiga do sensor, e trincamentos da camada ao redor do sensor. Em relação à resistência dos sensores aos carregamentos foi verificado que os sensores apresentaram resultados aceitáveis, onde o H-Gage apresentou uma maior resistência que as células de pressão.

Em pesquisa realizada no Brasil, Gonçalves (2002) desenvolveu modelo previsão de desempenho de pavimentos baseado em dados de ensaios de caracterização de materiais em laboratório, ensaios deflectometricos, observações de campo, e em destaque levantamentos de tensões e deformações através de instrumentação. O estudo foi em seis pistas experimentais na Área de Testes de Pavimentos da UFRGS-DAER, que foram instrumentadas e submetidas a tráfego de escala real utilizando simulador linear de tráfego acompanhando os estágios de degradação do pavimento com os acúmulos de passagem de carga.

Na fase de testes da pesquisa de Gonçalves (2002) foi realizado levantamento de deformações e tensões no pavimento através de sensores para medição de deformações verticais, adaptados através de *strain gages*, em duas profundidades do subleito, sensores do tipo H-Gage para medição de deformações específicas horizontais na base do revestimento asfáltico nos sentidos longitudinal e transversal, e células de pressão em três níveis de capacidade para medição de tensões verticais e horizontais no topo e no meio das camadas de base e subleito, realizando em paralelo leituras de temperatura na camada de revestimento através de termômetros digitais.

Gonçalves (2002) fez conclusões importantes sobre o comportamento mecânico dos pavimentos e a sua degradação, destacando aqui que foi verificado que as deformações específicas horizontais na fibra inferior das camadas asfálticas variam muito pouco com a degradação do pavimento, e que estas aumentam de forma significativa com a temperatura. Foi

verificado que tensões horizontais são armazenadas nas camadas granulares devido ao processo de compactação e que as tensões e deformações medidas pelos sensores tiveram valores compatíveis com as medições computacionais.

Na mesma pista experimental na qual será realizada esta pesquisa atual, localizada na Cidade Universitária José Aloísio de Campos da Universidade Federal de Sergipe, em São Cristóvão/SE, Matos (2015) realizou pesquisa com o objetivo principal de analisar as tensões verticais medidas através de instrumentação em camadas de pavimento asfáltico submetido a carregamentos de magnitudes diferentes.

A pesquisa de Matos (2015) abrangeu também o acompanhamento do projeto e construção da pista experimental, porém a instalação da instrumentação com células de carga ocorreu somente após a construção da pista para preservar os sensores do processo de compactação das camadas que poderia danificá-los. As células de carga foram projetadas, construídas e calibradas na pesquisa, onde foram desenvolvidas e instaladas quatro células de carga no topo das camadas de reforço de subleito, da sub-base de solo melhorado com cimento, da camada antirreflexão de trincas e do revestimento.

As medições de tensões verticais da pesquisa de Matos (2015) foram realizadas com veículos caçamba com eixo de carga de dois tipos, eixo simples de roda dupla e eixo tandem duplo, realizando medições com as células de carga tanto para o eixo dianteiro assim como para o eixo traseiro dos veículos. Os carregamentos utilizados foram aproximadamente de 50, 100 e 120% do valor máximo de carga por eixo estabelecido pelas resoluções do CONTRAN vigentes na época.

Durante as medições de Matos (2015) a célula de carga no topo do revestimento foi danificada, sendo utilizadas somente as outras três células. Para validação das medições foi realizado teste de confiabilidade para as três repetições realizadas para cada tipo de carregamento e em cada célula. Foi verificado que a influência dos carregamentos iniciava quando o conjunto de rodas estava em distância não superior a 30 cm do eixo da célula de carga.

Matos (2015) verificou que para o veículo de eixo simples de roda dupla um acréscimo de carga de 92% acarretou em aumentos de tensões verticais medidas de 65, 49 e 95% no topo das camadas de antirreflexão, de subbase e de reforço de subleito, respectivamente. Já para o veículo de eixo tandem duplo um aumento da carga em 64% provocou aumento nas mesmas

camadas, respectivamente, de 54, 173 e 265%. Também realizou comparativo entre as medidas da instrumentação e resultados de simulações numéricas utilizando o *software* SisPavBR baseado no método das múltiplas camadas elásticas, considerando ou não a aderência entre as camadas de revestimento e base, adotando área de contato pneu-pavimento circular teórica de raio 10,8 cm ou a área real medida em campo. As tensões verticais obtidas através da simulação numérica que melhor se aproximaram das medidas através da instrumentação foram as que utilizaram a área de contato circular teórica, sendo 80% e 74% em média das tensões medidas em campo para sem aderência e com aderência entre as primeiras camadas respectivamente. No geral as tensões da simulação numérica foram em média 38,5 % menores.

Através das medidas da instrumentação, Matos (2015) realizou um estudo de dano por esmagamento no topo da camada de sub-base e por ruptura plástica no topo da camada de reforço de subleito para cargas dentro e acima dos limites legais. Verificou que o dano tem um aumento exponencial com o aumento da carga, e que até um excesso de carga de 50% do limite legal, o eixo simples de roda dupla é mais danoso que o eixo tandem duplo. Concluiu que o uso da instrumentação é válido para medição de respostas de forma direta no pavimento tornando possível o estudo mais aprofundado do comportamento mecânico dos pavimentos.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta pesquisa foi realizado comparativo entre deformações específicas horizontais (de tração) na fibra inferior do revestimento asfáltico de pista experimental localizada na Cidade Universitária José Aloísio de Campos, *campus* São Cristovão da Universidade Federal de Sergipe, obtidas através de simulações numéricas aplicando o método das múltiplas camadas elásticas e o método dos elementos finitos, e medições diretas de deformação através de instrumentação. Na instrumentação foram utilizados sensores do tipo H-Gage, montados e instalados nesta pesquisa.

O objetivo da comparação dos resultados foi levantar as possíveis discrepâncias entre os valores medidos diretamente em campo e os valores estimados através de simulações numéricas que são utilizadas para fins de projetos e gerência de pavimentos. No item 3.1 será descrito o método utilizado para desenvolvimento e instalação da instrumentação, leituras das deformações na pista experimental, simulações numéricas através dos métodos das múltiplas camadas elásticas e dos elementos finitos, bem como a forma de análise dos resultados.

3.1 Pista experimental

No *campus* de São Cristóvão da Universidade Federal de Sergipe foram construídas duas pistas experimentais como mostra a Figura 22.

A instrumentação e modelagem nessa pesquisa foram realizadas na pista experimental “A” (PEA-UFS). Essa pista foi objeto de pesquisa de Matos (2015), onde foi realizada a sua construção, a caracterização dos materiais das camadas e instrumentação com sensores do tipo células de carga projetadas, montadas e instaladas neste mesmo trabalho.

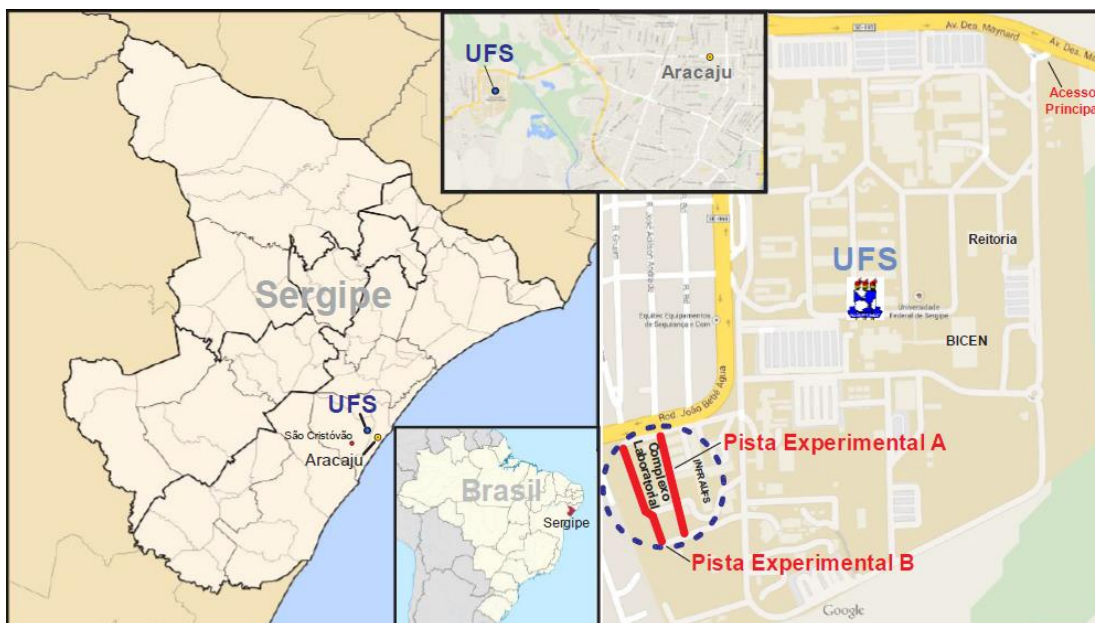


Figura 22 – Mapa do estado de Sergipe e localização das pistas experimentais.

Fonte: Matos, 2015.

Essa pista experimental tem baixo volume de tráfego, largura de 6,00 m e pavimento semirrígido do tipo invertido, composto por revestimento em concreto asfáltico de 7,0 cm, camada antirreflexão de trincas de 7,0 cm em solo areno-argiloso, sub-base em solo melhorado com 4% de cimento com 25,0 cm, reforço de subleito de 7,0 cm e subleito em solo arenoso confinado. Na Figura 23 é observada a seção transversal do pavimento com suas respectivas inclinações de abaulamento e espessura das camadas.

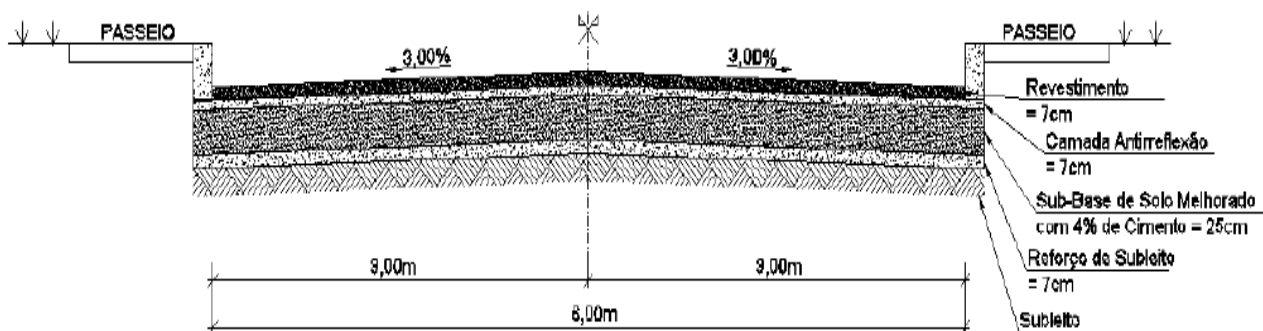


Figura 23 – Seção transversal do pavimento da pista experimental "A".

Fonte: Matos, 2015.

Os solos utilizados nas camadas de reforço de subleito, sub-base em solo melhorado com cimento e camada de base antirreflexão de trincas são do tipo areno-argiloso e tiveram origem

na mesma jazida, conhecida como Jazida Edgar, localizada no município São Cristóvão - SE. As misturas das camadas, exceto de revestimento, foram submetidas a ensaios de caracterização, de compactação no Proctor Intermediário, de resistência à compressão simples para a camada de solo melhorado com cimento e de módulo de resiliência (MR) do tipo triaxial dinâmico (MATOS, 2015).

Os parâmetros de compactação das camadas no Proctor Intermediário, umidade ótima (Wot) e peso específico aparente seco máximo ($\gamma_{dm\acute{a}x}$), bem como os modelos que definem o comportamento do módulo de resiliência, são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros de compactação e modelos do MR das camadas de base, sub-base e reforço do subleito.

| Camadas | Wot (%) | $\gamma_{dm\acute{a}x}(\text{kN/m}^3)$ | Modelo (MR) (MPa) | R ² |
|---------------------|---------|--|-----------------------------------|----------------|
| Base | 8,50 | 21,03 | $MR = 188,88. \sigma_3^{0,1905}$ | 0,818 |
| Sub-base | 7,40 | 21,31 | $MR = 6998,50. \sigma_d^{0,6644}$ | 0,959 |
| Reforço do subleito | 9,00 | 20,52 | $MR = 272,60. \theta^{0,430}$ | 0,891 |

Fonte: Matos, 2015.

Onde na Tabela 2, σ_3 é a tensão de confinamento em kN/m², σ_d é a tensão desvio em kN/m² e θ é o primeiro invariante de tensões em kN/m², dado por $\theta = \sigma_1 + 2\sigma_3$, sendo σ_1 a tensão principal ou axial (BALBO, 2007; FRANCO, 2007).

Já o revestimento asfáltico utilizado no pavimento, tem granulometria na faixa C da norma DNIT 031/2006-ES e dosada através do método Marshall. O valor de resistência à tração indireta (RTI) para a mistura asfáltica foi de 0,98 MPa e o módulo de resiliência, conforme a norma DNIT 135/2010 – ME, foi 6.944,43 MPa para ensaios de CPs moldados na usina. Também foram extraídos corpos de prova do pavimento logo após sua execução, nos quais o valor médio de RTI foi igual a 0,87 MPa e de MR igual a 4.880,73 MPa (MATOS, 2015).

Além de ensaios de laboratório para obtenção dos valores de módulo de resiliência das camadas, também foram encontrados na pesquisa de Matos (2015) os módulos de resiliência (MR) retronalisados a partir de bacia deflectométrica levantada com viga Benkelman no pavimento, sob condição de carga padrão, e coeficientes de Poisson (μ) atribuídos (Tabela 3).

Tabela 3 – Módulos de resiliência (MR) retroanalizados e coeficientes de Poisson (μ) das camadas.

| Camadas | MR (MPa) | μ |
|---------------------|----------|-------|
| Revestimento | 5500,00 | 0,25 |
| Base | 120,00 | 0,30 |
| Sub-base | 1300,00 | 0,25 |
| Reforço do subleito | 250,00 | 0,40 |
| Subleito | 110,00 | 0,30 |

Fonte: Matos, 2015.

3.2 Montagem dos sensores do tipo H-Gage

Antes de ser instalado na pista experimental, o sensor *H-Gage*, apto para medição de deformações específicas de tração horizontal na fibra inferior de camadas sujeitas à fadiga, foi montado através da utilização de um extensômetro de imersão e barras metálicas para ancoragem, tendo a forma em “H” (Figura 24). Isso forçou com que sofresse flexão juntamente com a camada em que ele está devidamente ancorado pelas barras metálicas, minimizando a sua movimentação diferencial relativa à camada envolvente.

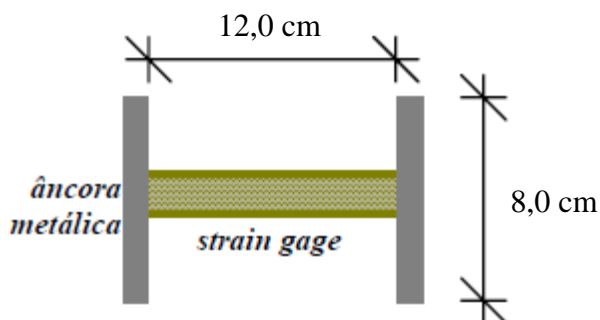


Figura 24 – Esquema do H-Gage utilizado em instrumentação na pavimentação.

Fonte: Gonçalves, 2002.

O extensômetro utilizado em camadas de pavimentos teve que ser resistente a fatores ambientais, à repetição de cargas pesadas, e ter acurácia e capacidade de medição suficientes. O extensômetro que foi utilizado na montagem dos *H-Gages*, comum em outras pesquisas devido à sua resistência, foi o de imersão da Kyowa, de modelo KM-120-120-H2-11 com grade em liga cobre níquel (CuNi) envolvida em material de suporte de acrílico, com comprimento de 12,0 cm, resistência característica de 120 Ω , temperaturas de trabalho de -10 a 70°C, faixa

de alta compensação de temperatura de 0 a 50°C (compatíveis com as temperaturas de campo), e fator *Gage* igual a 2,0 (KYOWA, 2011; DEUSEN *et al.*, 1992).

As barras de ancoragem utilizadas foram em material alumínio com comprimento de 8,00 cm, assim como às utilizadas na pesquisa de Gonçalves (2002). Para fixação das barras de ancoragem ao extensômetro, foram utilizados parafusos e adesivo de montagem. A Figura 25 apresenta um dos H-Gages utilizados.

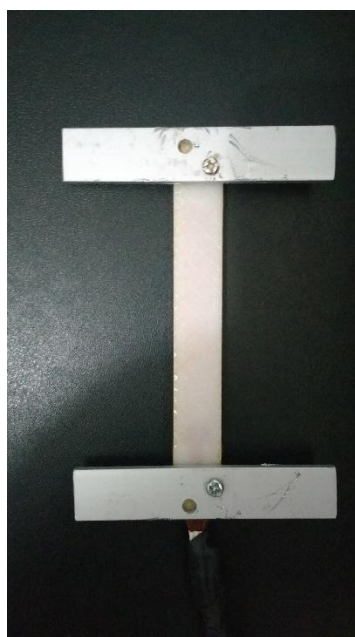


Figura 25 – H-Gage.

3.3 Circuito e condicionador de sinal utilizados

Como mostrado no item 2.3.2, a ponte de Wheatstone é utilizada para facilitar a medição da variação de resistência do extensômetro através da variação de tensão no circuito, podendo ser ponte completa, meia ponte, ou um quarto de ponte. Nesta pesquisa foi utilizada a meia ponte, que oferece compensação de temperatura e elimina os efeitos térmicos dos cabos (KYOWA, 2011).

Para medição das deformações, foi utilizado o condicionador de sinal Spider 8 da fabricante HBM. O Spider 8 é um equipamento eletrônico de medições elétricas de variáveis mecânicas como deformações, força, pressão, aceleração e temperatura. Este equipamento possui oito canais para alimentação de sensores, condicionamento de sinais, conversão analógica digital e filtros. O equipamento pode ainda ser ligado em cascata aumentando o

número de canais. Para as leituras em computador foi utilizado o *software* CATMAN na versão 4.5 (HBM, 2003).

Para conexão do circuito no Spider 8 foi utilizado um conector do tipo DB-15, mostrado na Figura 26, tipo macho e fêmea da esquerda para direita. Pode-se observar que no esquema do DB-15 tipo fêmea existe uma numeração referente aos pinos, que vão de 1 a 15 na sequência mostrada.

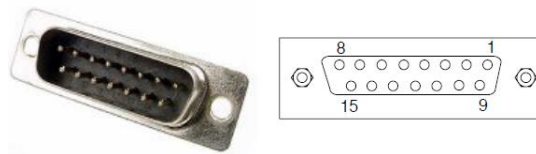


Figura 26 – DB-15 macho (esquerda) e fêmea (direita) para conexão no Spider 8.

Fonte adaptada: Matos, 2015; HBM, 2003.

O circuito em meia ponte de Wheatstone que foi utilizado nessa pesquisa é apresentado na Figura 27.

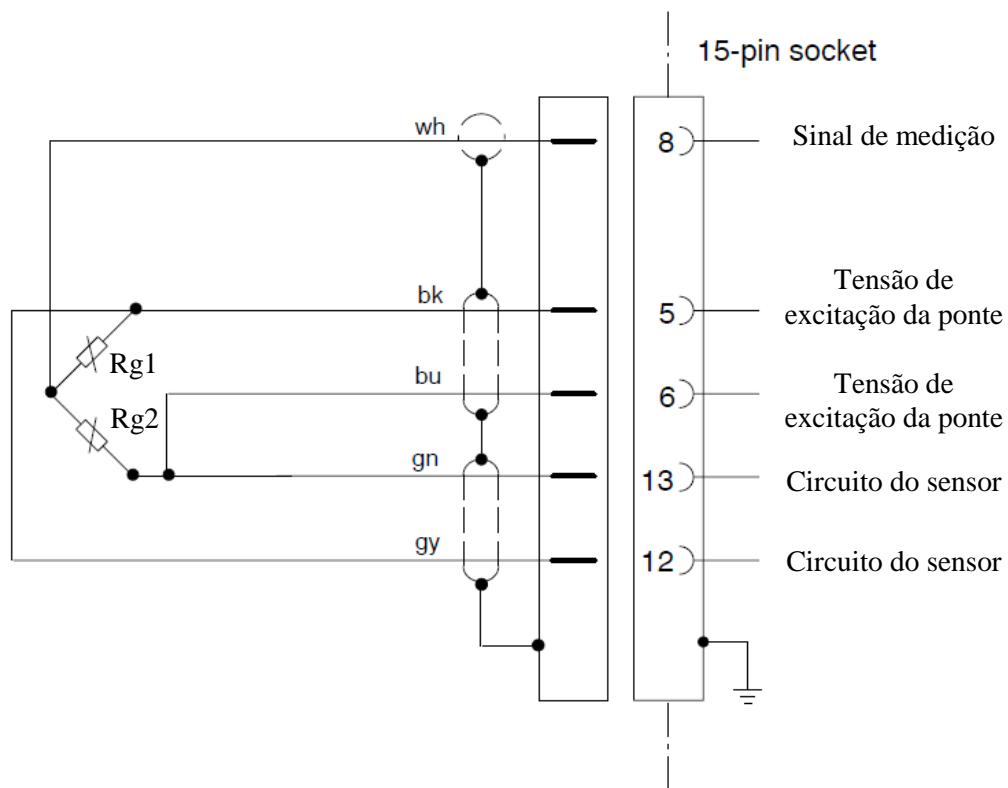


Figura 27 – Circuito em meia ponte de Wheatstone utilizado na pesquisa.

Fonte adaptada: HBM, 2003.

Os extensômetros do circuito da ponte de Wheatstone foram utilizados como sensores *H-Gage* introduzidos no pavimento. Isso fez com que todos os sensores estejam nas mesmas condições ambientais, diminuindo efeitos eletromagnéticos e de temperatura, tendo a precaução de que cada um será solicitado de forma isolada para não interferir na medição.

Com o objetivo de mitigar efeitos de temperatura nos cabos e, principalmente, efeitos eletromagnéticos da rede elétrica que passa pelo local e de equipamentos eletrônicos, os sensores *H-Gage* foram ligados ao circuito através de cabos blindados do tipo Manga de 6 vias (Figura 28) (MATOS, 2015).



Figura 28 – Cabo blindado tipo Manga de 6 vias usado no circuito.

Fonte: Matos, 2015.

Para fechamento do circuito e ligação dos cabos ao conector DB-15, foi montada uma caixa blindada com ligação aos cabos através de conectores tipo Mike e saída para ligação ao Spider 8, com o conector do tipo DB-15. A Figura 29 apresenta a caixa blindada, onde a direita são destacas as entradas com conector tipo Mike.

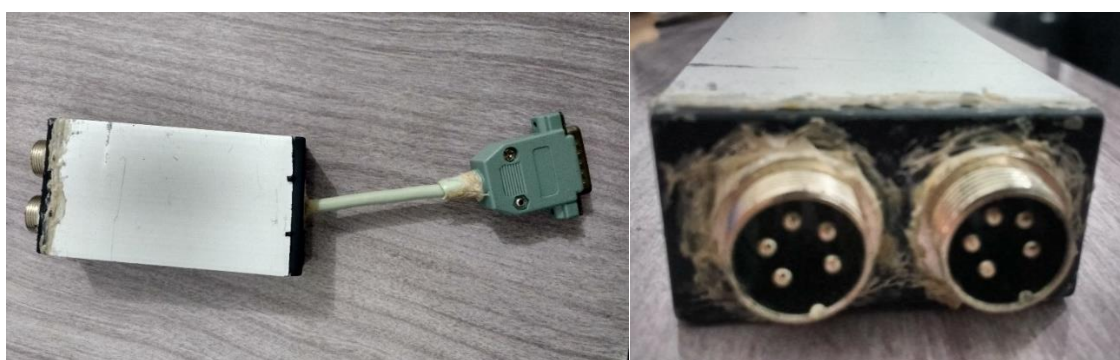


Figura 29 – Caixa blindada para fechamento do circuito.

3.4 Instalação dos sensores *H-Gage*

Foram instrumentadas quatro seções do pavimento, onde as camadas de revestimento receberam o *H-Gage* nas fibras inferiores na direção longitudinal ao tráfego, como esquematizado na Figura 30.

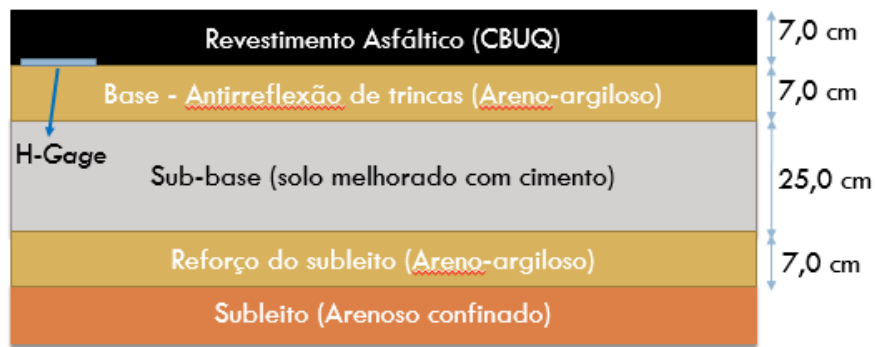


Figura 30 – Representação da localização dos sensores na seção.

Em campo os sensores foram ligados à cabine de medição através do cabeamento tipo blindado, passando por dentro de eletroduto flexível em PVC reforçado (Figura 31), com resistência de 750N/5cm, embutido na camada base e na calçada adjacente às seções instrumentadas (S01, S02, S03, S04), conforme croqui da Figura 32 que mostra o padrão de instalação das quatro seções.



Figura 31 – Eletroduto em PVC rígido reforçado usado para conduzir cabeamentos.

Fonte: Matos, 2015.

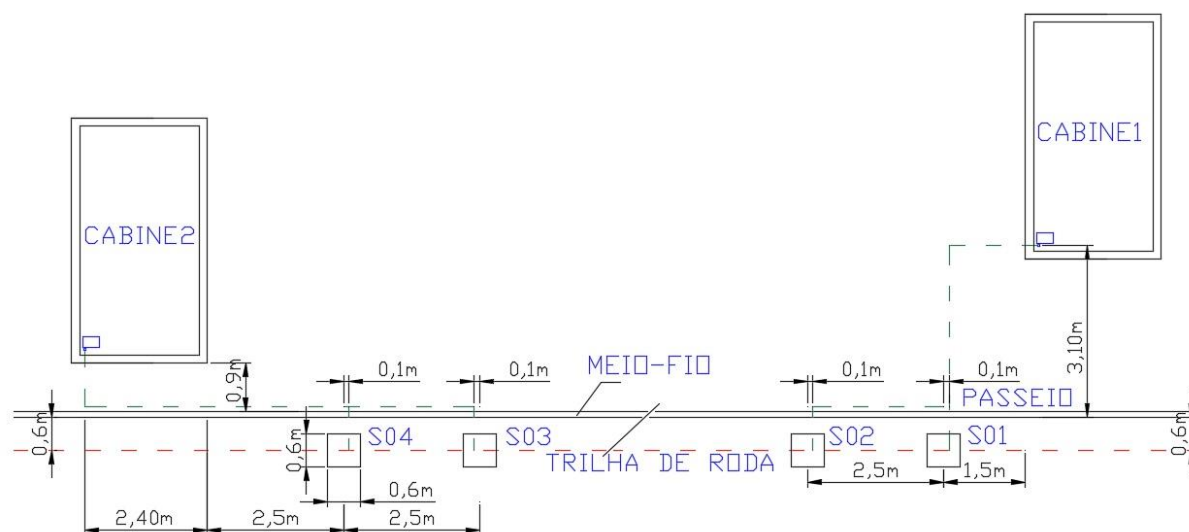


Figura 32 – Croqui da instalação dos sensores na pista experimental "A" (PEA-UFS).

O posicionamento das seções e instalação dos sensores levaram em conta as dimensões do veículo de teste utilizado, de forma com que os sensores instalados em um mesmo circuito não fossem solicitados ao mesmo tempo nas medições, compatibilizando também com as instalações de células de carga realizadas por Matos (2015).

A instalação dos sensores foi realizada em pares de seções, primeiramente S01 e S02, depois S03 e S04, devido os sensores em cada par de seções fazerem parte do mesmo circuito. Os sensores foram instalados logo abaixo da trilha de rodas que fica a 0,60 m do meio fio, conforme a Figura 32.

Para instalação dos sensores *H-Gage* e seus respectivos cabeamentos, foram realizadas aberturas no revestimento asfáltico e rasgos na calçada para passagem de eletroduto, como será explicitado posteriormente, conforme o fluxograma da Figura 33.



Figura 33 – Fluxograma da instalação dos sensores em uma seção padrão.

Para instalação dos sensores foi realizada uma abertura de 60,0 x 60,0 cm em cada seção utilizando serra circular para piso, instalando o sensor no sentido longitudinal da pista no centro da abertura (abaixo da trilha de roda). A Figura 34 representa esquematicamente a instalação do sensor H-Gage na abertura. A Figura 35 mostra a execução do corte da seção S01.

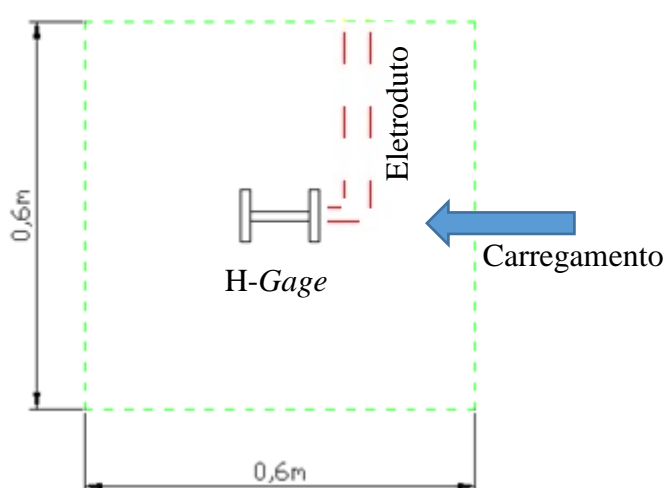


Figura 34 – Esquema da instalação do H-Gage na abertura no revestimento.



Figura 35 - Corte da seção S01.

Após abertura do revestimento foram realizados rasgos laterais de 5,0 cm de largura e 7,0 cm de profundidade no mesmo e no passeio até a cabine de medição para passagem do eletroduto, utilizando também a serra circular para piso.

Após a abertura das seções e passagens para a tubulação, a camada de base do pavimento recebeu pintura de ligação com emulsão asfáltica na proporção de 1,00 L/m², em seguida foi instalado o sensor H-Gage e recomposta a camada de revestimento com Concreto Asfáltico aditivado, dimensionado na faixa C da norma DNIT 031/2006-ES e dosada através do método Marshall, recebendo 2% de aditivo que favorece a aplicação a frio até 24h da produção (ÚNICO ASFALTOS, 2016).

O novo revestimento foi compactado em duas camadas de 30,15 kg, total de 60,30 kg de concreto asfáltico com o intuito de fornecer massa específica aparente de 2,39 g/cm³ indicada pelo fabricante. Antes da aplicação da primeira camada, o sensor de cada seção foi colocado assim como a sua respectiva tubulação, utilizando o peso da primeira camada para manter o sensor na posição, compactando inicialmente com soquete de madeira e depois com placa vibratória até atingir espessura média de 3,5 cm. A segunda camada foi compactada de forma semelhante até nivelar com revestimento antigo completando a espessura total do revestimento de 7,00 cm.

As Figuras 36 e 37 apresentam o processo de execução das primeiras camadas e as seções já reconstituídas.



Figura 36 – Lançamento da primeira camada da seção S03.



Figura 37 – Seções S03 e S04 já executadas.

3.5 Sensor Termopar

Para medição de temperatura do revestimento asfáltico no momento das medições de deformação, foram instalados sensores termopar do tipo K com capacidade de medição de -50 a 400 °C, utilizando para leitura um termômetro digital apropriado para esse tipo de sensor. As

Figuras 38a e 38b apresentam o termômetro digital com o termopar tipo K conectado e termopar tipo K, respectivamente:



Figura 38 – (a) termômetro digital com termopar tipo K e (b) detalhe do termopar.

Fonte adaptada: Mercado Livre, 2016.

Os sensores de temperatura foram instalados em três profundidades do revestimento para obtenção do gradiente térmico (2,00 cm, 4,00 cm e 6,00 cm de profundidade), em uma única seção, sendo que o revestimento tem mesma composição e espessura devendo presumidamente ter temperatura igual em cada profundidade nas quatro seções.

Os sensores foram instalados no alinhamento da trilha de roda, ou seja, a 0,60 m do meio fio. Para instalação, foi utilizado método semelhante à da instalação dos sensores *H-Gage* para rasgar e recompor o revestimento, mas realizando a compactação em três camadas e não duas. Os conectores dos três termopares foram colocados em caixa metálica devidamente vedada e fechada no passeio, como pode ser visto na Figura 39.



Figura 39 – Caixa de medição dos termopares.

3.6 Medições com a instrumentação

As medições de deformação específica horizontal no revestimento foram realizadas com três tipos de carregamentos devidamente aferidos: valor aproximado à carga padrão de 8,20 t; acima da carga legal de 10,0 t, mas não mais que a tolerância de 10,00 %; e acima da carga legal ultrapassando a tolerância (CONTRAN, 2015).

Para as medições de deformação específica de tração foi utilizado o modelo de caminhão L-1318 de eixo traseiro simples de roda dupla, da fabricante Mercedes-Benz. As dimensões do veículo, que foram levadas em conta nas escolhas da localização dos sensores e foram utilizadas na modelagem geométrica no método dos elementos finitos, são apresentadas na Figura 40.

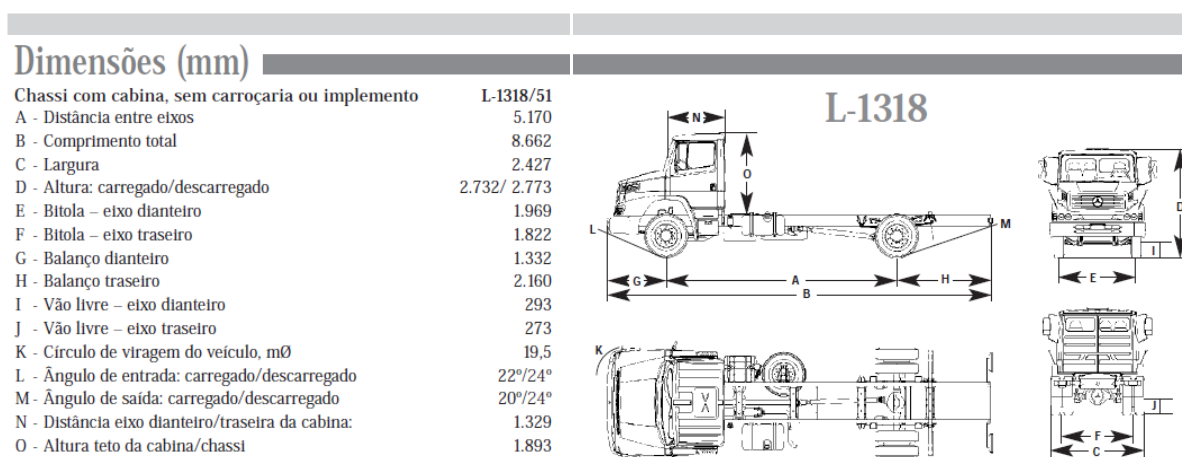


Figura 40 – Dimensões caminhão MB L-1318 a ser utilizado nas medições.

Fonte: MERCEDES-BENZ, 2006.

Antecipadamente à medição, os pneus foram calibrados em pressão de inflação de 80 psi (0,56 MPa), conforme recomendações da norma DNER-ME 024/94, e foram medidas as massas de seu eixo traseiro em balança aferida. A Figura 41 apresenta o veículo utilizado nas medições.



Figura 41 – Caminhão caçamba utilizado nas medições.

Para cada carregamento foram realizadas medições em dois períodos distintos do dia, ou seja, com o revestimento em temperaturas diferentes, sendo previamente escolhidos os períodos de final da manhã (T1) e final da tarde (T2) de um dia típico ensolarado, tendo sido realizadas três repetições de medições de deformações específicas horizontais em cada uma das quatro seções transversais estudadas e em cada período predefinido do dia. Os gradientes de temperatura foram sempre medidos no intervalo entre as medições de um par de seção, ou seja no meio da manhã e no meio da tarde.

Nas medições com os sensores *H-Gages* foram obtidas em campo as relações entre a tensão elétrica de saída do circuito (e_o) e a tensão elétrica de entrada (E) em mV/V. Posteriormente, foram calculadas as deformações específicas através da Equação 42, que é própria para o circuito em meia ponte com os extensômetros utilizados (KYOWA, 2011):

$$\frac{e_o}{E} = K_s \cdot \frac{\varepsilon_o}{4}. \quad (42)$$

Onde K_s é o fator *Gage* dos extensômetros, nesse caso igual a 2,0, e ε_o é a deformação específica equivalente em m/m.

As medições de campo geraram pulsos da relação entre a tensão elétrica de saída e de entrada, utilizada para calcular a deformação. A Figura 42 apresenta o pulso medido em campo para o carregamento de 11,54 t, seção 02 e temperatura T1, mostrando a relação de tensões elétricas de saída e entrada devido à deformação ($\frac{e_o}{E}$), as relações de tensões elétricas das deformações específicas de compressão ($\frac{e_{c1}}{E}$ e $\frac{e_{c2}}{E}$) e o tempo do pulso (t_p) (GARCIA e THOMPSON, 2008).

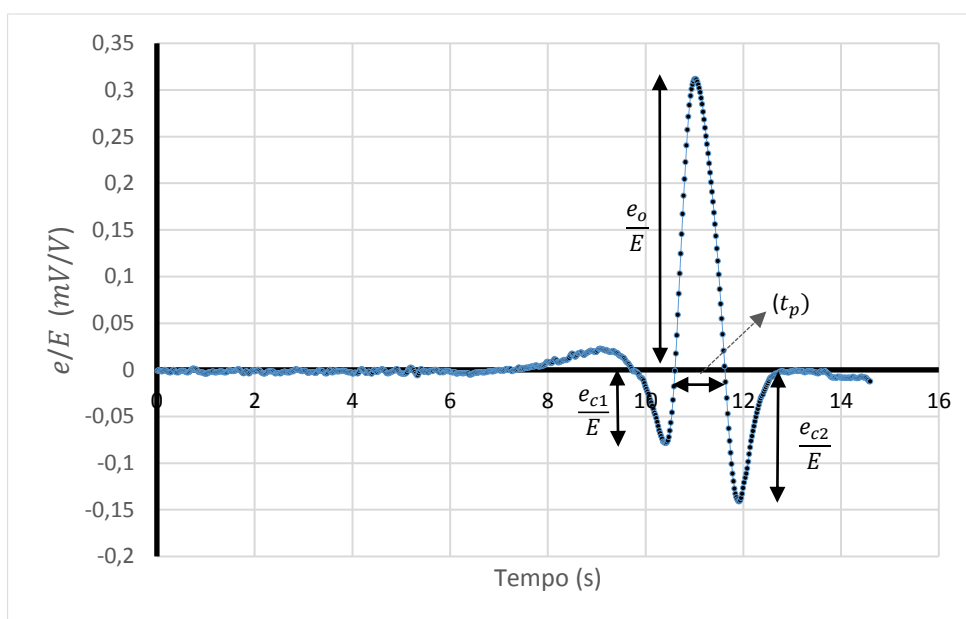


Figura 42 – Pulso de variação da relação de tensões elétricas de saída e entrada devido à deformação para 11,54 t, seção 02 e temperatura T1.

3.7 Levantamento de bacias deflectométricas e retroanálise

Antes das medições de deformações específicas horizontais no revestimento foram levantadas bacias deflectométricas, uma para cada seção em cada faixa de temperatura e tipo de carregamento, através de equipamento viga Benkelman, totalizando vinte e quatro bacias deflectométricas, como pode ser visto na Tabela 4.

Tabela 4 – Configurações dos levantamentos de bacias deflectométricas nas quatro seções.

| Faixa de Temperatura (°C) | Carga analisada (t) | Repetição |
|---------------------------|---------------------|-----------|
| T1 | $\cong 8,20$ | 01 |
| | | 02 |
| | | 03 |
| | 10,00 a 11,00 | 01 |
| | | 02 |
| | | 03 |
| | >11,00 | 01 |
| | | 02 |
| | | 03 |
| T2 | $\cong 8,20$ | 01 |
| | | 02 |
| | | 03 |
| | 10,00 a 11,00 | 01 |
| | | 02 |
| | | 03 |
| | >11,00 | 01 |
| | | 02 |
| | | 03 |

A Figura 43 mostra o levantamento deflectométrico da seção S02 no carregamento de 8,27 t.



Figura 43 – Levantamento deflectométrico da seção S02 carga de 8,27 t.

O objetivo era utilizar as bacias para realizar retroanálises para obtenção dos módulos elásticos das camadas do pavimento através do *software* AEMC (FRANCO, 2007), baseado no método numérico das múltiplas camadas elásticas, porém como é mostrado adiante os resultados não foram satisfatórios.

3.8 Ensaio de resistência à tração indireta - RTI

Utilizando-se como base a norma DNIT 136/2010 – ME, foi realizado ensaio de resistência a tração indireta para cada seção e ainda para o revestimento original, utilizando corpos de prova extraídos do pavimento. As Figuras 44 a 48 apresentam os corpos de prova de cada seção rompidos no ensaio.



Figura 44 – Corpo de prova da seção 01 rompido no ensaio de RTCD.



Figura 45 - Corpo de prova da seção 02 rompido no ensaio de RTCD.



Figura 46 - Corpo de prova da seção 03 rompido no ensaio de RTCD.



Figura 47 - Corpo de prova da seção 04 rompido no ensaio de RTCD.



Figura 48 - Corpo de prova do revestimento original rompido no ensaio de RTCD.

3.9 Ensaio de Módulo de Resiliência

Com base na norma ABNT NBR 16018/2011 foram obtidos os Módulos de Resiliência – MR do revestimento das quatro seções de ensaio e do revestimento original do pavimento. O ensaio de compressão diametral sob carga repetida foi realizado somente na temperatura padrão de 25° C (Figura 49), já houve a tentativa de realizar o ensaio em temperaturas mais próximas às medidas em campo, porém os corpos de prova romperam por fadiga.

Durante a execução dos ensaios foi observado muito ruído nos gráficos de deslocamento instantâneo versus tempo, ruído esse que só diminuiu com o aumento da carga, inclusive acima da carga máxima de 20,0 % da resistência a tração indireta indicada pela norma. Mesmo acima do limite de carga máxima os ensaios apresentaram resultados de Módulo de Resiliência incoerentes, apontando para uma rigidez muito acima do comum para concreto asfáltico.



Figura 49 – Ensaio de módulo de resiliência da seção 01 na temperatura de 25°C.

3.10 Ensaio de Módulo Dinâmico

Como não foi possível obter o Módulo de Resiliência, foi realizado ensaio de ressonância por impacto. Esse ensaio, referenciado na norma ASTM E1876-09 (2009), baseia-se na aplicação de impactos no centro e na extremidade de um corpo de prova em forma de disco, gerando frequências naturais ressonantes amortecidas. A partir da relação entre essas frequências e todas as características da amostra (espessura, densidade aparente e diâmetro), é possível gerar curvas mestras que relacionam o módulo dinâmico com a frequência de carregamento e a temperatura (COSTA, 2017).

O equipamento utilizado no ensaio de ressonância foi o *Nondestructive Evaluation 360 Platform* (NDE-360), formado por um martelo para aplicação do impacto, um acelerômetro que mede a resposta da amostra ao impacto e uma unidade de aquisição de dados, todos mostrados na Figura 50.

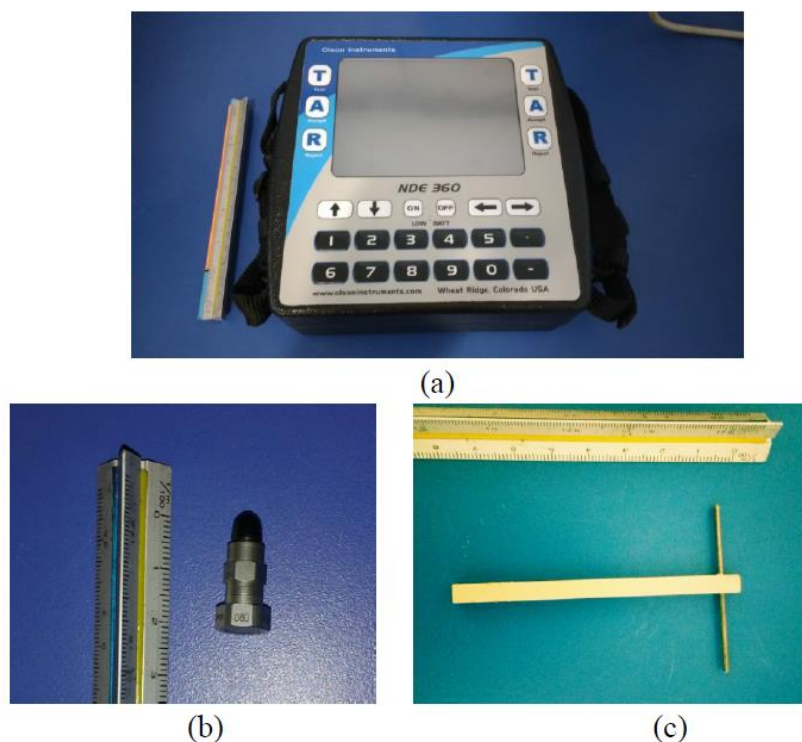


Figura 50 – Partes do equipamento do ensaio de ressonância: (a) unidade de aquisição de dados; (b) acelerômetro; (c) martelo.

Fonte: Costa, 2017.

O ensaio foi realizado em corpos de prova extraídos do revestimento de recomposição nas quatro seções de medição e do revestimento original adjacente às seções, sendo que esses corpos de prova foram retificados para que a relação entre a espessura (L) e o diâmetro (d) fosse menor ou igual a 0,25, como exigido na norma ASTM E1876-09 (2009). As temperaturas de 20°, 25°, 30°, 40°, 50° e 55°C foram as utilizadas no ensaio, mantendo os corpos de prova por um período de condicionamento de 2h em câmara térmica com estabilidade de $\pm 0,5^\circ\text{C}$.

As Figuras 51, 52 e 53 mostram, respectivamente, o condicionamento dos corpos de prova para a temperatura de 20,0°C, a aplicação do impacto em um dos corpos de prova que estava ligado ao acelerômetro e a aquisição dos dados de frequência ressonante.



Figura 51 – Condicionamento dos corpos de prova a 20,0°C para o ensaio de ressonância.



Figura 52 – Aplicação do impacto e medição da frequência de resposta através do acelerômetro.

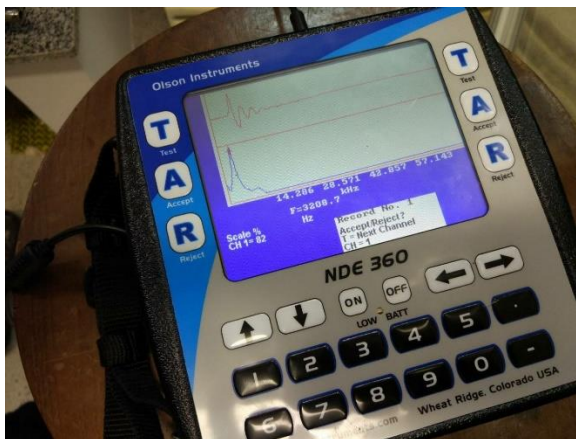


Figura 53 – Aquisição dos dados de frequência ressonante.

3.11 Análise numérica com o método das múltiplas camadas elásticas

Para a análise numérica pelo método das múltiplas camadas elásticas foi utilizado o *software* AEMC/SisPav (FRANCO, 2007), utilizando para as camadas asfálticas os módulos dinâmicos extraídos da curva mestra do ensaio de ressonância e, para as demais camadas, os módulos de resiliência determinados no trabalho de Matos (2015), assim como os seus respectivos coeficientes de Poisson. Foram realizadas simulações para as seções 01, 02 e 04 em cada carregamento na temperatura de 40°C, totalizando 9 simulações, não foi realizada simulações para a seção 03 por esta não apresentar resultados de módulo dinâmico coerentes, assim como, as deformações de campo.

Essa análise também foi utilizada para estimar o estado de tensões no meio de cada camada, exceto o revestimento, com o objetivo de linearizar os módulos de resiliência obtidos por Matos (2015) e em sequência utilizá-los na modelagem com o método dos elementos finitos. Cada combinação de temperatura de revestimento e carregamento gerou um estado de tensões diferente nas camadas inferiores e, conseqüentemente, um diferente módulo de resiliência.

3.12 Análise numérica em elementos finitos

Realizadas as medições de deformações específicas horizontais em campo, obtida a curva mestra do módulo dinâmico do revestimento e a linearização dos módulos de resiliência das camadas inferiores, foi realizada simulação numérica do pavimento para as seções 01, 02 e 04 nos três carregamentos e na temperatura de 40°C, através do *software* ANSYS ® *Academic Teaching Introductory*, Release 17.0, baseado no método dos elementos finitos.

Lançado pela primeira vez em 1971, o ANSYS®, *Swanson Analysis System*, é um dos *softwares* de método dos elementos finitos mais amplamente utilizado para análises de tensões, deformações e deslocamentos em diversas áreas da engenharia, podendo também ser realizadas análises de comportamento de fluidos e sistemas eletromagnéticos (MOAVENI, 2003; SILVA *et al.*, 2001; NAKASONE, YOSHIMOTO e STOLARSKI, 2006).

O ANSYS ® tem uma série de formas de considerar o meio contínuo e seus elementos, podendo levar o modelo do pavimento a um maior realismo, mas, por outro lado, maior esforço computacional com o maior número e complexidade dos modelos introduzidos no *software* (MADENCI e GUVEN, 2006). Na pavimentação, o ANSYS ® já foi utilizado em algumas pesquisas como as de Torrrão (2015), Freitas (2012), Fontes *et al.* (2009), Coutinho *et al.* (2009), Xia *et al.* (2015) e Beskou *et al.* (2016), seja em simulações estáticas ou dinâmicas, elásticas ou viscoelásticas, lineares ou não lineares, podendo ser avaliada a resposta mecânica do pavimento e suas camadas, considerando ou não efeitos de temperatura, tempo, e a propagação de dano. Na sequência se faz uma descrição de como foi realizada a modelagem no ANSYS ® para esta pesquisa.

3.12.1 Definição dos tipos de elementos

O primeiro passo na modelagem no ANSYS ® foi a escolha dos tipos de elementos para compor o modelo, sendo que o *software* tem mais de 100 elementos à escolha. Cada tipo de elemento tem definido possíveis formas, números de nós e seus graus de liberdade, comportamentos mecânicos e solicitações que podem sofrer, devendo ser escolhidos conforme as solicitações e comportamento mecânico da estrutura e do tipo de modelagem, em duas ou três dimensões (NAKASONE *et al.*, 2006).

Foi utilizado um tipo de elemento tridimensional (SOLID185) com oito nós e três graus de liberdade cada, translações nas direções x, y e z, com capacidade para grandes deformações e deflexões. A forma indicada para a utilização desse elemento é a hexaédrica como mostrado na Figura 54. Outras formas podem ser utilizadas sobrepondo os nós, mas não é indicado (ANSYS, 2007).

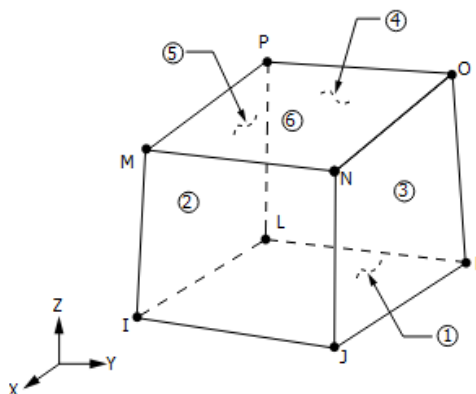


Figura 54 – Elemento finito SOLID185.

Fonte: ANSYS, 2007.

O tipo de elemento escolhido é comumente utilizado em simulações com três dimensões no *software* ANSYS®, como nas pesquisas de Torrão (2015), Freitas (2012), Fontes *et al.* (2009), Coutinho *et al.* (2009), Xia *et al.* (2015) e Beskou *et al.* (2016).

3.12.2 Escolha dos modelos mecânicos e suas propriedades

Definidos previamente os elementos, posteriormente foram definidos os materiais das camadas, escolhendo o comportamento mecânico de cada uma e suas respectivas propriedades mecânicas. Apesar de ter disponível o modelo viscoelástico que se enquadraria de melhor forma para o revestimento, o *software* exige propriedades reológicas, como viscosidade, que não estão disponíveis, impedindo a utilização do mesmo.

Neste trabalho, todos os materiais foram considerados linearmente elásticos, tendo como propriedades mecânicas de entrada o módulo dinâmico para o revestimento e o módulo de resiliência linearizado para as demais camadas, além dos seus respectivos coeficientes de Poisson. Destaca-se que, segundo Chen *et al.* (1995), a diferença entre simulações lineares e não lineares para deformações de tração na fibra inferior do revestimento asfáltico são pequenas e em torno de 1,3 %.

Muitas pesquisas utilizaram a simplificação de considerar todos os materiais do pavimento como elásticos lineares, citando os trabalhos de Torrão (2015), Freitas (2012), Fontes *et al.* (2009), Coutinho *et al.* (2009) e Beskou *et al.* (2016). Os materiais desta pesquisa foram numerados de acordo com a Tabela 5.

Tabela 5 – Numeração de referência dos materiais das camadas para simulação no ANSYS.

| Nº do Material | Camada |
|----------------|------------------------------|
| 1 | Revestimento Original |
| 2 | Revestimento de recomposição |
| 3 | Base |
| 4 | Sub-base |
| 5 | Reforço do subleito |
| 6 | Subleito |

3.12.3 Modelo geométrico

Definidos os tipos de elementos e os modelos mecânicos dos materiais, em seguida foi gerado o modelo geométrico, escolhendo o tamanho do domínio e a malha de elementos finitos para cada camada do pavimento.

Nesta pesquisa, foi utilizado um modelo geométrico tridimensional, levando em conta orientações presentes na literatura (NCHRP/TRP, 2004), tendo na horizontal, ou seja, no plano horizontal de cada camada, 1,70 x 2,20 m, respeitando as orientações de distância mínima do centro da carga, teoricamente circular de raio 10,8 cm, até o contorno do modelo de 10 a 12 vezes o raio da mesma, já na vertical 5,40 m respeitando a orientação de 50 vezes o raio da carga.

As camadas foram modeladas separadamente uma a uma, começando do revestimento até o subleito, que terá profundidade de 4,94 m, sendo em seguida gerados contatos entre as camadas definindo um coeficiente de atrito e as malhas de elementos finitos para cada camada.

Na camada de revestimento asfáltico recomposto foi utilizada a malha do tipo regular por ser a camada de interesse, sendo esta camada dividida em três “subcamadas” de elementos com dimensões horizontais de 0,05 m. Já na camada de revestimento original, também dividida em três “subcamadas”, foi utilizada malha do tipo irregular com elementos de dimensão horizontal de 0,05 m na zona de maior influência da carga e 0,10 m na zona de menor influência (TORRÃO, 2015).

Para as demais camadas foi utilizada a malha regular com dimensão dos elementos na horizontal de 0,10 m na zona de maior influência da carga e 0,30 m na zona de menor influência,

e no caso do subleito a camada foi “subdividida” na vertical a cada 0,30 m. A Figura 55 apresenta o modelo geométrico gerado através do *software* ANSYS ®.

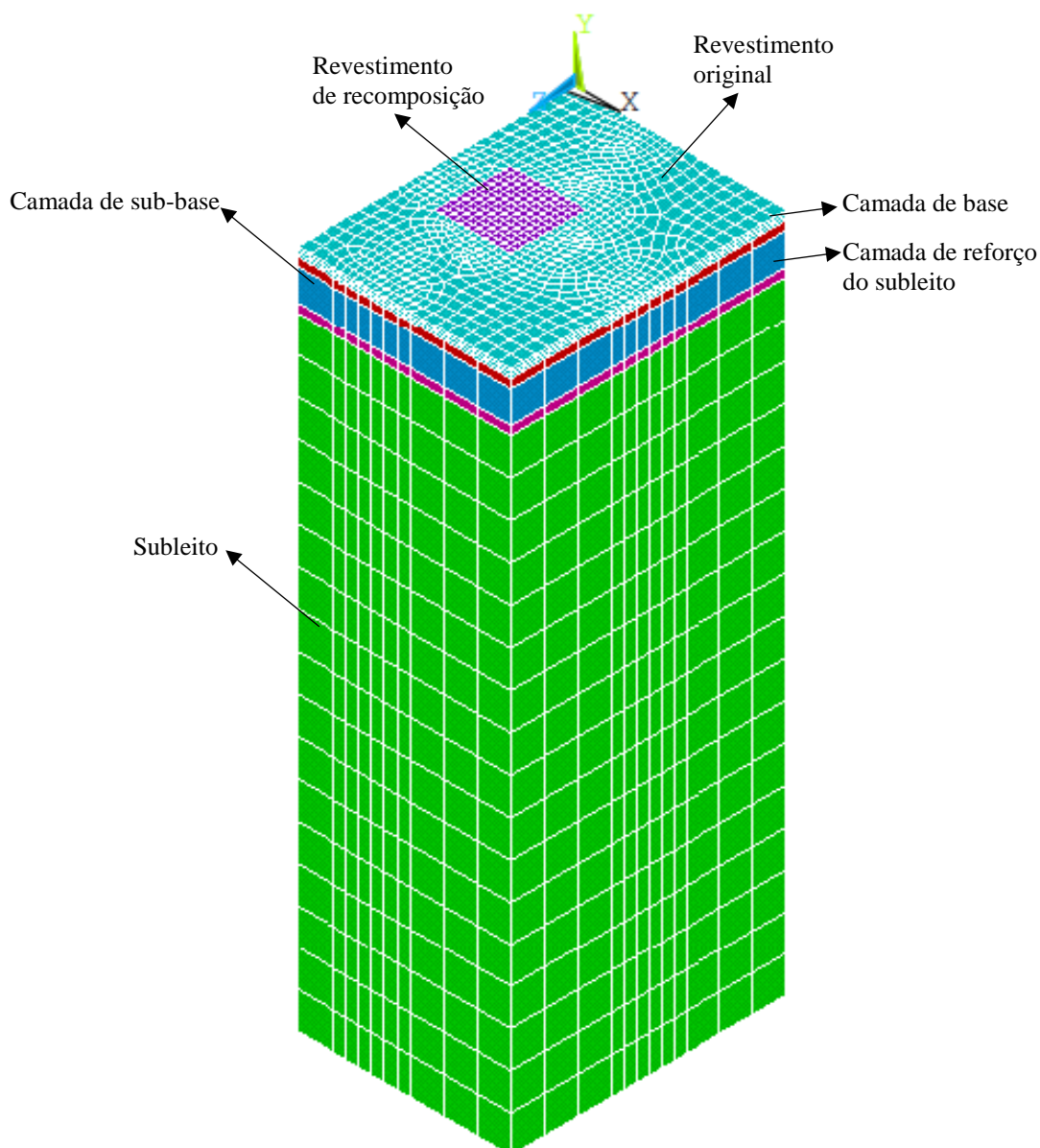


Figura 55 – Modelo geométrico gerado através do ANSYS ®.

3.12.4 Cargas externas e condições de contorno

Antes de definir as cargas que serão aplicadas, deve-se definir o tipo de análise que será realizado, que depende das condições de carregamento e as respostas desejadas. A análise pode ser do tipo estática, modal, harmônica, transiente, espectral, flambagem e subestrutural (NAKASONE *et al.*, 2006). A análise realizada nesse trabalho é a estática, que é condizente com o carregamento quase-estático utilizado nas medições com a instrumentação.

Os carregamentos no *software* podem ser dos seguintes tipos: restrições de deslocamento; forças; cargas distribuídas; forças de corpo; forças de inércia; e forças eletromagnéticas (NAKASONE *et al.*, 2006).

Por fim, foram aplicadas no modelo duas cargas distribuídas no revestimento referentes à cada pneu do semieixo, com intensidades relativas a cada carregamento e área de contato de 20,0 x 30,0 cm, não utilizando a área real devido à restrição de número de elementos finitos do *software* na versão acadêmica. Foram também inseridas as condições de contorno de restrição de deslocamento na horizontal para as faces laterais do modelo e na vertical para a base do subleito.

A Figuras 56 e 57 apresentam as condições de contorno utilizadas e o carregamento externo.

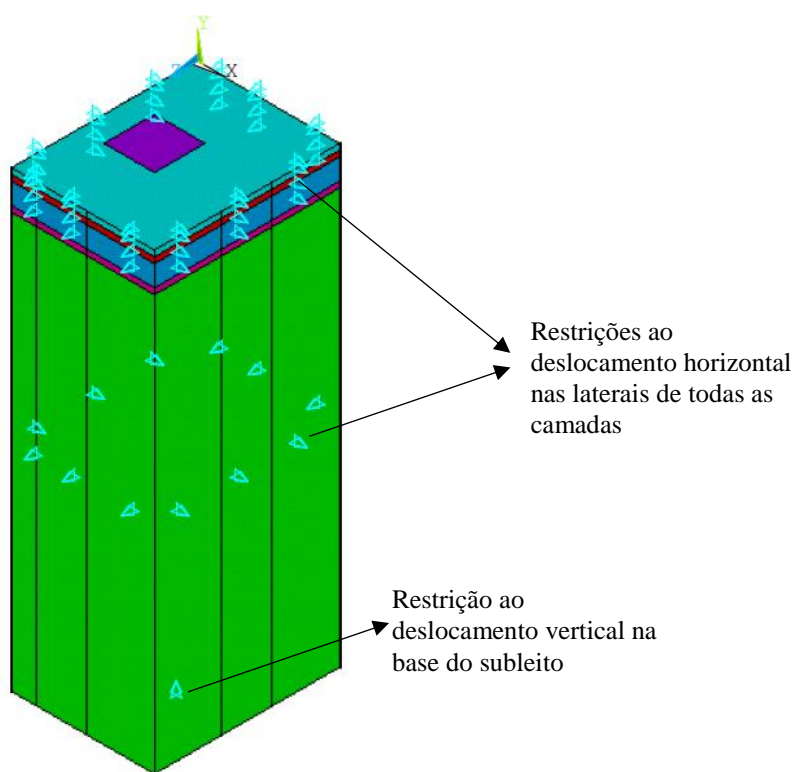


Figura 56 – Condições de contorno do modelo no ANSYS ®.

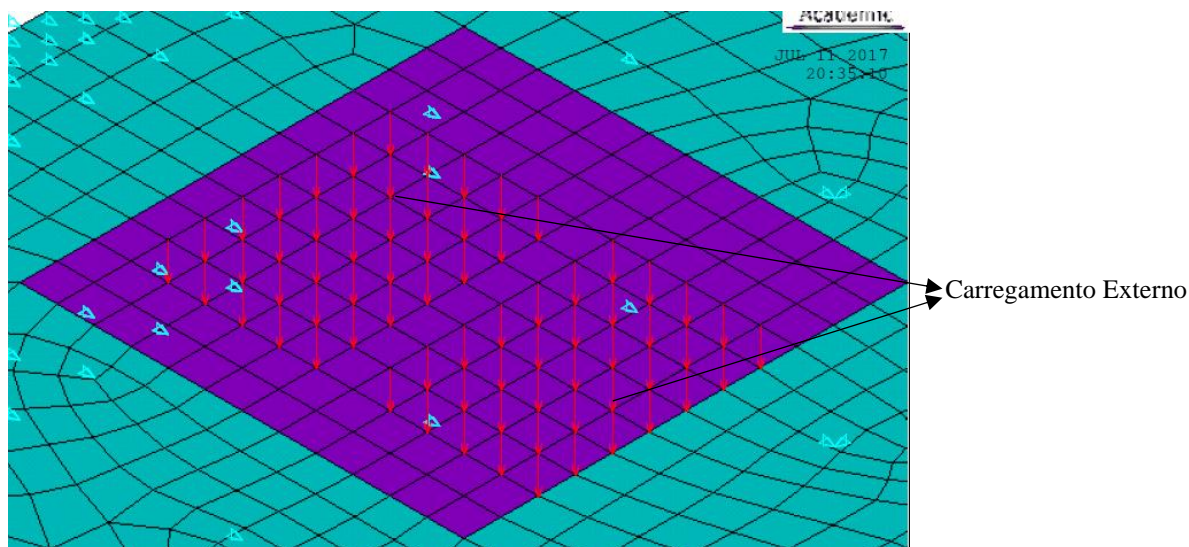


Figura 57 – Configuração de aplicação da carga.

3.12.5 Etapa de solução

Foram realizadas, assim como para o método das múltiplas camadas elásticas, 24 simulações, utilizando a ferramenta *solve* para calcular as respostas do pavimento, e a ferramenta *General Postprocessor*, que possibilita listar as deformações específicas em cada nó dos elementos finitos.

3.13 Análise dos resultados

Realizadas as medições de campo e as análises numéricas do pavimento, coletando dados de deformações específicas horizontais na fibra inferior da camada de revestimento asfáltico, foi realizada a análise e comparação dos resultados.

3.13.1 Deformações medidas em campo

Como explicado no item 3.6, foram realizadas medições de deformações com três repetições em cada seção instrumentada, com três tipos de carregamentos diferentes e duas faixas de temperaturas, conforme o plano fatorial para uma seção padrão apresentado na Tabela 6.

Tabela 6 – Plano fatorial para medições de deformações em campo para uma seção padrão.

| | | Limite Inferior | Valor Médio | Limite Superior |
|-------|------------|-----------------|-------------------|-----------------|
| Fator | Código | (-1) | (0) | (+1) |
| 1 | T_i | T_1 | - | T_2 |
| 2 | P_{ESRD} | $\cong 8,20$ t | 10,00 t a 11,00 t | $>11,0$ t |

| Configuração | Variável Codificada | | Réplicas por Ensaio |
|--------------|---------------------|------------|---------------------|
| | T_i | P_{ESRD} | 03 repetições |
| 1 | -1 | -1 | r_1, r_2 e r_3 |
| 2 | +1 | -1 | r_1, r_2 e r_3 |
| 3 | -1 | 0 | r_1, r_2 e r_3 |
| 4 | +1 | 0 | r_1, r_2 e r_3 |
| 5 | -1 | +1 | r_1, r_2 e r_3 |
| 6 | +1 | +1 | r_1, r_2 e r_3 |

Como pode ser visto na Tabela 6, cada seção teve 06 configurações de levantamentos de campo, ou seja, foram realizados 24 levantamentos (amostras) com três repetições (réplicas) cada, sendo cada amostra tratada estatisticamente avaliando a precisão da amostra e eliminando os valores discrepantes, que foram rejeitados utilizando o critério de Chauvenet, onde o desvio da amostra suspeita (x) em relação à média (μ), dado por $d = x - \mu$, não deve ser maior que o desvio máximo ($d_{máx}$) dado pela Equação 43, sendo N o número de amostras:

$$\frac{1}{2N} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{d_{máx}}{\sigma} \right)^2 \right]. \quad (43)$$

O valor estimado da deformação para cada amostra foi dado pela deformação média (\bar{x}) dos dados aceitos mais ou menos a respectiva incerteza absoluta dada pelo desvio padrão da amostra.

Com os valores de deformação média calculados, foi realizada análise fatorial dos dados, onde as temperaturas e magnitudes dos carregamentos foram transformadas em variáveis codificadas através das Equações 44 e 45 respectivamente.

$$T = \frac{t - (t_{m\acute{a}x} + t_{m\acute{i}n})/2}{(t_{m\acute{a}x} - t_{m\acute{i}n})/2}. \quad (44)$$

Onde T é o nível de temperatura, t é a temperatura medida em campo a ser codificada, $t_{m\acute{a}x}$ a maior temperatura medida em campo e $t_{m\acute{i}n}$ a menor temperatura medida em campo.

$$P = \frac{p - (p_{m\acute{a}x} + p_{m\acute{i}n})/2}{(p_{m\acute{a}x} - p_{m\acute{i}n})/2}. \quad (45)$$

Onde P é o nível de carregamento, p é a magnitude do carregamento a ser codificado, $p_{m\acute{a}x}$ é a magnitude do maior carregamento e $p_{m\acute{i}n}$ é a magnitude do menor carregamento.

Na análise fatorial a relação entre a deformação, a temperatura e a magnitude do carregamento aplicado ao pavimento foi avaliada através do modelo fatorial linear apresentado na Equação 46.

$$\varepsilon = b_o + b_1.T + b_2.P + b_3.T.P. \quad (46)$$

Onde ε é a magnitude da deformação específica de tração, T é o nível de temperatura, P é o nível de carregamento, b_o, b_1, b_2 e b_3 são os coeficientes do modelo que foram obtidos através de regressão linear.

Com o uso da análise fatorial foi possível analisar o comportamento da deformação específica com a variação de temperatura e de magnitude do carregamento, e em complemento foi levantada e analisada a variação percentual das deformações com a variação unitária da temperatura e da magnitude do carregamento.

3.13.2 Simulações numéricas x Medições diretas

Nessa etapa foi avaliada a acurácia dos métodos de simulação de deformações específicas horizontais na fibra inferior do revestimento, tomando como valor de referência o intervalo de confiança do valor estimado através da instrumentação. Pretendendo-se identificar o método numérico mais eficaz e quais simulações numéricas que obtiveram melhores resultados.

3.13.3 Consequência do uso de métodos numéricos

Foi avaliado o erro na previsão de fadiga ocasionado pela utilização dos métodos numéricos, utilizando modelo de previsão de vida de fadiga para revestimento asfáltico do

Manual de Engenharia de Pavimentos da África do Sul, publicado em 2014, pela *South African National Roads Agency Ltd*. O modelo indicado no manual é apresentado na Equação 47 (SANRAL, 2014):

$$N_f = 10^\alpha \left(1 - \frac{\log \varepsilon_t}{\beta} \right). \quad (47)$$

Onde N_f é a vida de fadiga em repetição da passagem de eixo padrão de 8,20 t, ε_t é a deformação específica de tração na fibra inferior do revestimento asfáltico e α e β são constantes que dependem do tipo de camada asfáltica e nível de confiança do projeto ou tipo de via.

De acordo com o manual citado anteriormente, o pavimento estudado, projetado para um período de 20 anos, com repetições do eixo padrão acumuladas de $1,00 \times 10^6$, conforme método de cálculo da AASHTO (UFS, 2011), foi caracterizado na categoria D, se enquadrando nas características de vias coletoras, tendo então as constantes α e β os valores de 17,71 e 3,46 (SANRAL, 2014).

O erro de previsão de vida de fadiga foi encontrado através da relação entre a vida de fadiga para as deformações específicas de tração na fibra inferior do revestimento estimadas através das simulações numéricas e as medidas através da instrumentação, sendo em seguida utilizado para avaliar se a diferença entre as duas provoca superdimensionamento ou subdimensionamento do revestimento asfáltico.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Levantamentos de campo

Foram realizadas três etapas de medições e levantamentos defletoométricos, nas datas de 03 de fevereiro, 06 de março e 08 de março de 2017. As duas primeiras foram em dias típicos ensolarados e a última, ensolarado no início e nublado sem chuva no fim da manhã. Primeiramente, após calibração dos pneus do veículo de testes, este foi carregado com brita e devidamente pesado em usina de concreto na região metropolitana de Aracaju. A massa inferida no eixo traseiro do veículo nos três dias foi de 8,27 t, 10,47 t e 11,54 t, respectivamente. A Figura 58 apresenta a pesagem do eixo traseiro na carga de 11,54 t.



Figura 58 – Pesagem do eixo traseiro do veículo de testes.

Com o caminhão devidamente pesado, foram realizadas as medições de deformações específicas horizontais no revestimento e, em paralelo, os levantamentos defletoométricos. Foram realizados dois levantamentos para cada carregamento. O primeiro das 10h às 12h (T1), e o segundo das 14h às 16h (T2), com exceção do carregamento de 11,54 t em que o primeiro levantamento foi de 09h às 11h e o segundo de 11h às 13h. As temperaturas foram levantadas no intervalo entre as medições dos dois pares de seções.

As Tabelas 7, 8 e 9 apresentam as temperaturas medidas em cada carregamento e levantamento.

Tabela 7 – Temperaturas levantadas nas medições com 8,27 t.

| Profundidade (cm) | Levantamento T1 (°C) | Levantamento T2 (°C) |
|-------------------|----------------------|----------------------|
| 2,00 | 48,10 | 45,40 |
| 4,00 | 36,00 | 44,20 |
| 6,00 | 31,40 | 43,70 |
| Média | 38,50 | 44,43 |

Tabela 8 - Temperaturas levantadas nas medições com 10,47 t.

| Profundidade (cm) | Levantamento T1 (°C) | Levantamento T2 (°C) |
|-------------------|----------------------|----------------------|
| 2,00 | 46,20 | 46,20 |
| 4,00 | 38,40 | 42,90 |
| 6,00 | 36,60 | 40,00 |
| Média | 40,40 | 43,00 |

Tabela 9 - Temperaturas levantadas nas medições com 11,54 t.

| Profundidade (cm) | Levantamento T1 (°C) | Levantamento T2 (°C) |
|-------------------|----------------------|----------------------|
| 2,00 | 45,10 | 42,70 |
| 4,00 | 40,30 | 38,00 |
| 6,00 | 36,90 | 35,60 |
| Média | 40,80 | 38,80 |

As Tabelas 10, 11 e 12 apresentam os resultados das relações de tensões elétricas de saída e entrada, e suas respectivas deformações para cada carregamento, seção e faixa temperatura.

Tabela 10 – Dados das medições dos H-Gages para o carregamento de 8,27 t.

| Seção | Réplica | T1 | | | T2 | | |
|-------|---------|---------------------------|-----------------------|--------------------------|---------------------------|-----------------------|--------------------------|
| | | $\frac{e_o}{E}$ (mV/V) | ϵ_o (m/m) | ϵ_{om} (m/m) | $\frac{e_o}{E}$ (mV/V) | ϵ_o (m/m) | ϵ_{om} (m/m) |
| S01 | 01 | 0,339907 | 0,000680 | 0,000675 | 0,491769 | 0,000984 | 0,000968 |
| | 02 | 0,297123 | 0,000594 | | 0,440981 | 0,000882 | |
| | 03 | 0,374964 | 0,000750 | | 0,518618 | 0,001037 | |
| S02 | 01 | 0,067132 | 0,000134 | 0,000190 | 0,249479 | 0,000499 | 0,000589 |
| | 02 | 0,099883 | 0,000200 | | 0,386363 | 0,000773 | |
| | 03 | 0,118510 | 0,000237 | | 0,247624 | 0,000495 | |
| S03 | 01 | 0,200065 | 0,000400 | 0,000365 | 0,360138 | 0,000720 | 0,000758 |
| | 02 | 0,162329 | 0,000325 | | 0,382277 | 0,000765 | |
| | 03 | 0,184817 | 0,000370 | | 0,394620 | 0,000789 | |
| S04 | 01 | 0,268734 | 0,000537 | 0,000431 | 0,336354 | 0,000673 | 0,000738 |
| | 02 | 0,151200 | 0,000302 | | 0,373780 | 0,000748 | |
| | 03 | 0,227489 | 0,000455 | | 0,396725 | 0,000793 | |

Tabela 11 - Dados das medições dos H-Gages para o carregamento de 10,47 t.

| Seção | Réplica | T1 | | | T2 | | |
|-------|---------|---------------------------|-----------------------|--------------------------|---------------------------|-----------------------|--------------------------|
| | | $\frac{e_o}{E}$ (mV/V) | ϵ_o (m/m) | ϵ_{om} (m/m) | $\frac{e_o}{E}$ (mV/V) | ϵ_o (m/m) | ϵ_{om} (m/m) |
| S01 | 01 | 0,200280 | 0,000401 | 0,000402 | 0,363840 | 0,000728 | 0,000781 |
| | 02 | 0,213360 | 0,000427 | | 0,375360 | 0,000751 | |
| | 03 | 0,188880 | 0,000378 | | 0,431520 | 0,000863 | |
| S02 | 01 | 0,268920 | 0,000538 | 0,000497 | 0,268620 | 0,000537 | 0,000565 |
| | 02 | 0,218520 | 0,000437 | | 0,242400 | 0,000485 | |
| | 03 | 0,257880 | 0,000516 | | 0,336000 | 0,000672 | |
| S03 | 01 | 0,169887 | 0,000340 | 0,000388 | 0,108905 | 0,000218 | 0,000314 |
| | 02 | 0,219527 | 0,000439 | | 0,191040 | 0,000382 | |
| | 03 | 0,192960 | 0,000386 | | 0,171360 | 0,000343 | |
| S04 | 01 | 0,229920 | 0,000460 | 0,000493 | 0,240480 | 0,000481 | 0,000521 |
| | 02 | 0,256800 | 0,000514 | | 0,264000 | 0,000528 | |
| | 03 | 0,252000 | 0,000504 | | 0,277440 | 0,000555 | |

Tabela 12 - Dados das medições dos H-Gages para o carregamento de 11,54 t.

| Seção | Réplica | T1 | | | T2 | | |
|-------|---------|----------------------------------|-----------------------|--------------------------|----------------------------------|-----------------------|--------------------------|
| | | $\frac{\epsilon_o}{E}$ (mV/V) | ϵ_o (m/m) | ϵ_{om} (m/m) | $\frac{\epsilon_o}{E}$ (mV/V) | ϵ_o (m/m) | ϵ_{om} (m/m) |
| S01 | 01 | 0,402240 | 0,000804 | 0,000774 | 0,338880 | 0,000678 | 0,000730 |
| | 02 | 0,356640 | 0,000713 | | 0,402720 | 0,000805 | |
| | 03 | 0,402720 | 0,000805 | | 0,353280 | 0,000707 | |
| S02 | 01 | 0,312000 | 0,000624 | 0,000682 | 0,245760 | 0,000492 | 0,000523 |
| | 02 | 0,389760 | 0,000780 | | 0,278400 | 0,000557 | |
| | 03 | 0,320640 | 0,000641 | | 0,260240 | 0,000521 | |
| S03 | 01 | 0,231158 | 0,000462 | 0,000368 | 0,188640 | 0,000377 | 0,000351 |
| | 02 | 0,206266 | 0,000413 | | 0,142080 | 0,000284 | |
| | 03 | 0,114240 | 0,000228 | | 0,195360 | 0,000391 | |
| S04 | 01 | 0,365280 | 0,000731 | 0,000714 | 0,266400 | 0,000533 | 0,000569 |
| | 02 | 0,336960 | 0,000674 | | 0,293280 | 0,000587 | |
| | 03 | 0,369120 | 0,000738 | | 0,293760 | 0,000588 | |

Em todos os três tipos de carregamentos as áreas de contato pneu-pavimento do semieixo foram levantadas, obtendo para a carga de 8,27 t aproximadamente 23,0 x 26,0 cm, com espaçamento entre os pneus de 11,0 cm, para a carga de 10,47 t aproximadamente 23,0 x 28,0 cm, com espaçamento entre os pneus de 10,0 cm, e para a carga de 11,54 t aproximadamente 23,0 x 30,0 cm, com espaçamento entre os pneus de 10,0 cm. As Figuras 59, 60 e 61 apresentam as áreas de contato levantadas em cada carregamento.



Figura 59 – Área de contato pneu-pavimento carregamento de 8,27t.



Figura 60 - Área de contato pneu-pavimento carregamento de 10,47 t.



Figura 61 - Área de contato pneu-pavimento carregamento de 11,54 t.

Os levantamentos deflectométricos realizados nas seções forneceram valores de deflexões incoerentes. Atribui-se à descontinuidade do pavimento, provocada por sua reconstituição após a instalação dos sensores, as falhas na obtenção das bacias deflectométricas, o que resultou na inviabilidade de realizar retroanálises.

4.2 Densidade aparente

Como pré-requisitos para o cálculo dos módulos complexos através do ensaio de ressonância por impacto, foram calculadas as densidades aparentes das misturas asfálticas das quatro seções e do revestimento original. A Tabela 13 apresenta os valores de densidade aparente.

Tabela 13 – Densidades aparente dos revestimentos de recomposição e original.

| Seção | Densidade Aparente (kg/m³) |
|-----------------------|--|
| 01 | 2070 |
| 02 | 2020 |
| 03 | 1990 |
| 04 | 2040 |
| Revestimento original | 2260 |

Observa-se que os valores de densidade aparente encontrados foram baixos, em especial nas seções de ensaio, onde o indicado seria por volta de 2.400 kg/m³, segundo fabricante do concreto asfáltico de recomposição, o que indica falha na compactação.

4.3 Curvas mestras e módulos dinâmicos

Através do ensaio de ressonância por impacto, foram elaboradas curvas mestras de módulo dinâmico para o revestimento asfáltico original do pavimento e para o revestimento novo em cada seção, obtendo através das curvas o módulo dinâmico referente à temperatura de 40° C, temperatura esta que se repetiu, mesmo que aproximadamente, em todos os três dias de ensaios de campo.

As Figuras 62 a 71 apresentam as curvas mestras dos módulos dinâmicos ($|E^*|$) em função da frequência reduzida resultantes dos ensaios de ressonância por impacto na temperatura de 40°C. Na seção 3 não se pode obter o módulo dinâmico devido à má qualidade dos resultados para os corpos de prova CP-3.1 e CP-3.2, provavelmente por causa da grande concentração de agregados graúdos nos corpos de prova, no último inclusive não foi possível obter a curva mestra a 40°C. O corpo de prova 4.4 também foi rejeitado devido à má qualidade dos resultados.

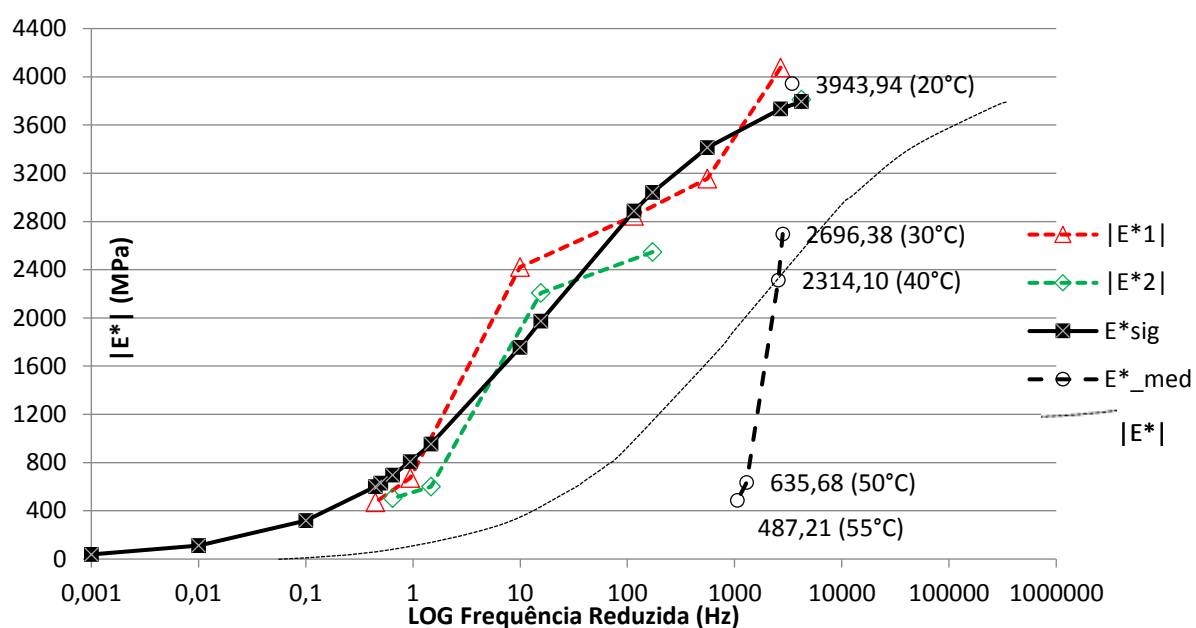


Figura 62 – Curva mestra na temperatura de 40°C para o CP-1.1.

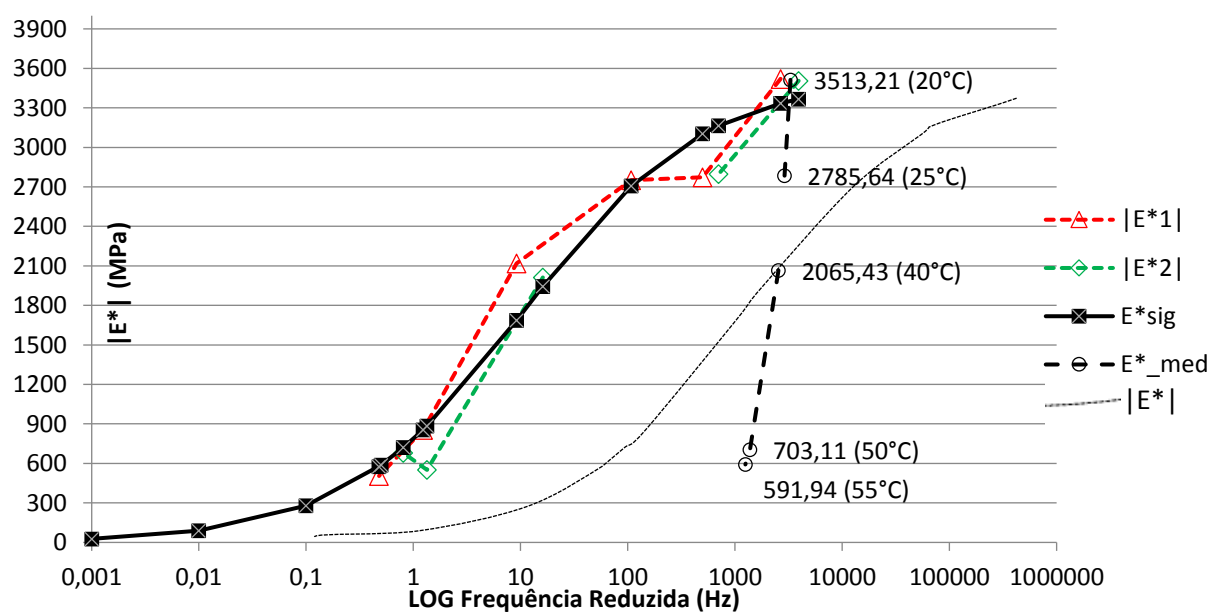


Figura 63 – Curva mestra na temperatura de 40°C para o CP-1.2.

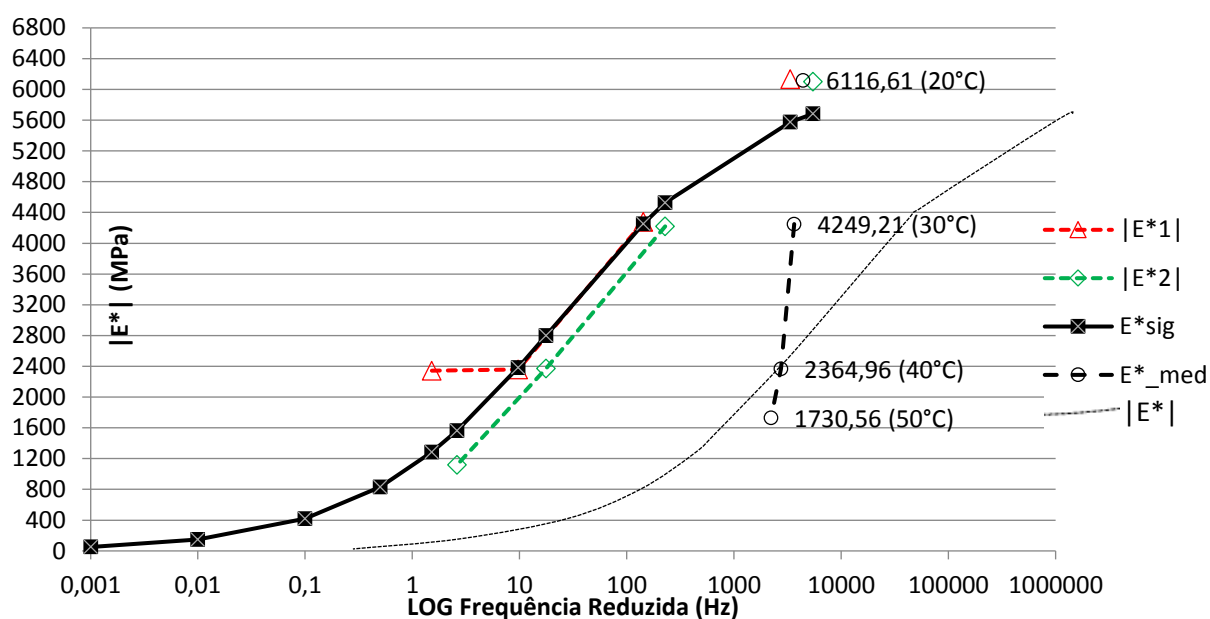


Figura 64 - Curva mestra na temperatura de 40°C para o CP-2.

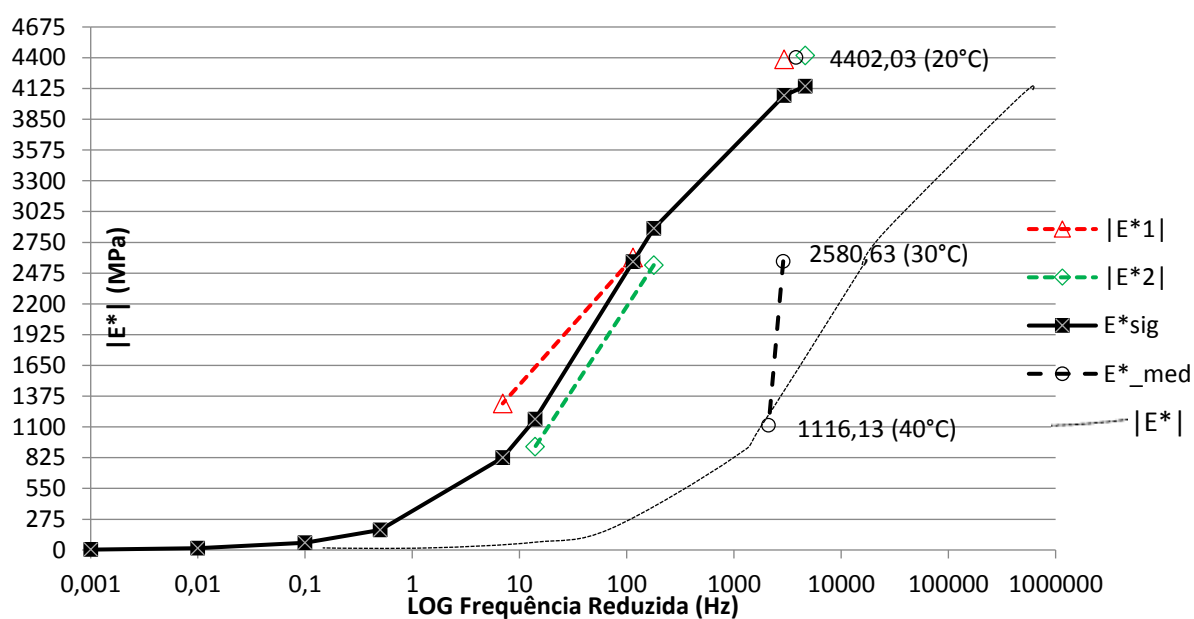


Figura 65 – Curva mestra na temperatura de 40°C para o CP-3.1.

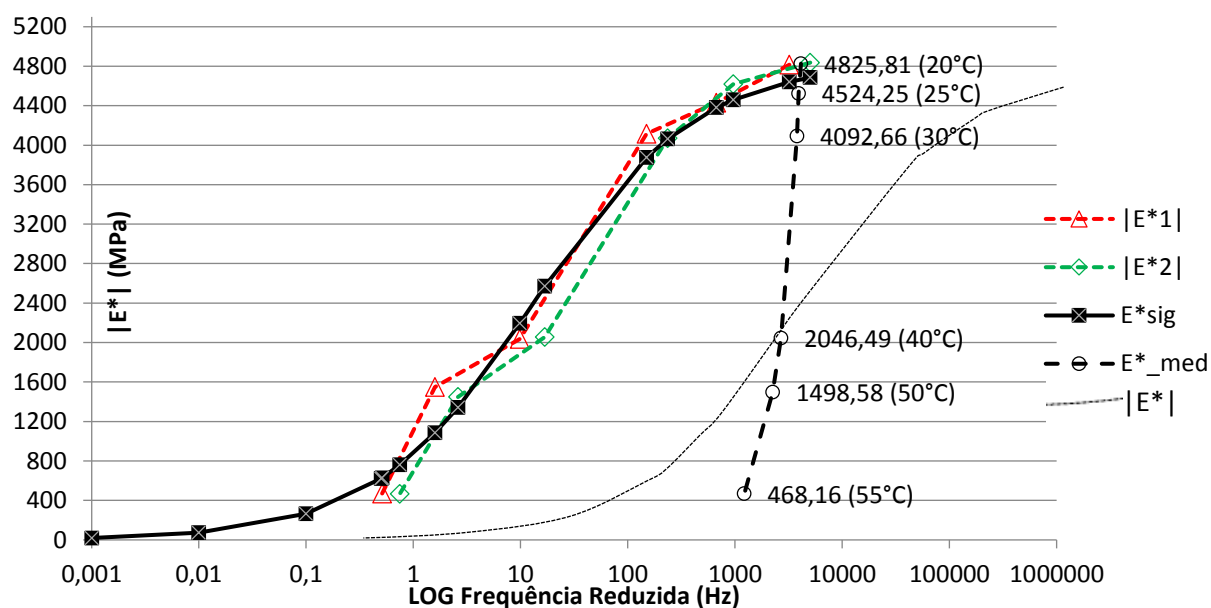


Figura 66 - Curva mestra na temperatura de 40°C para o CP-4.1.

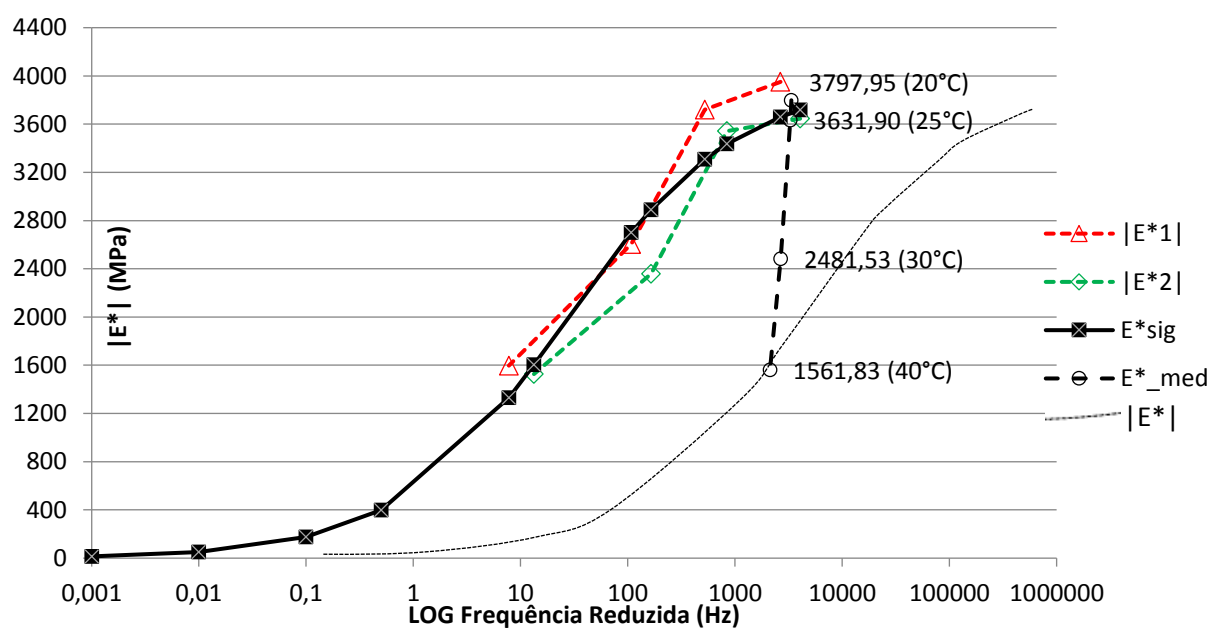


Figura 67 - Curva mestra na temperatura de 40°C para o CP-4.2.

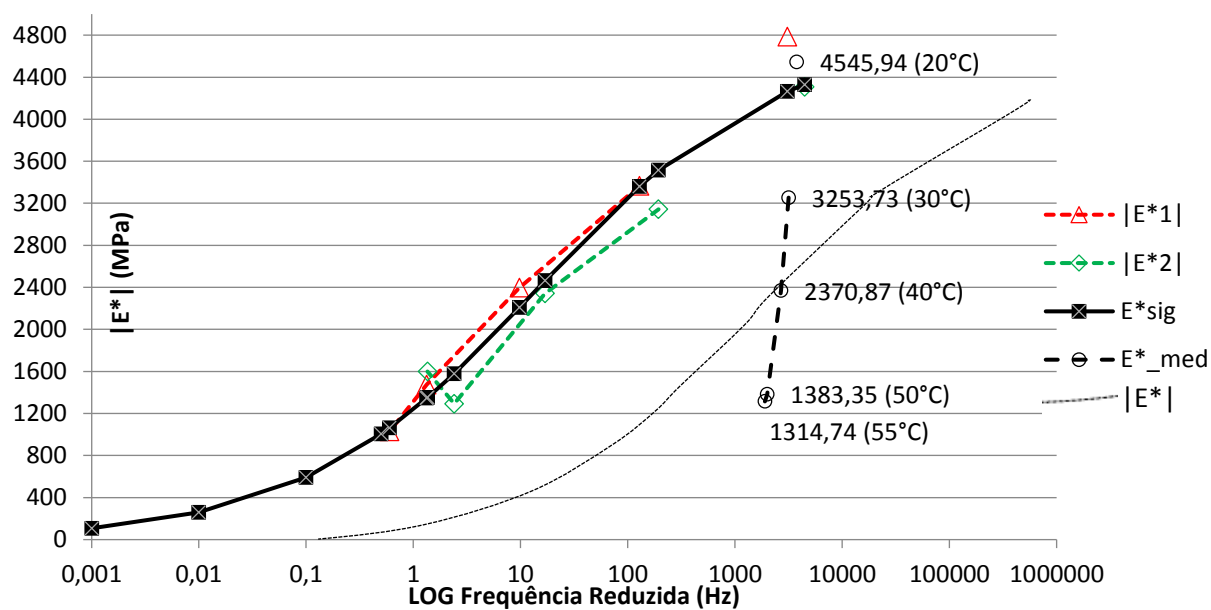


Figura 68 - Curva mestra na temperatura de 40°C para o CP-4.3.

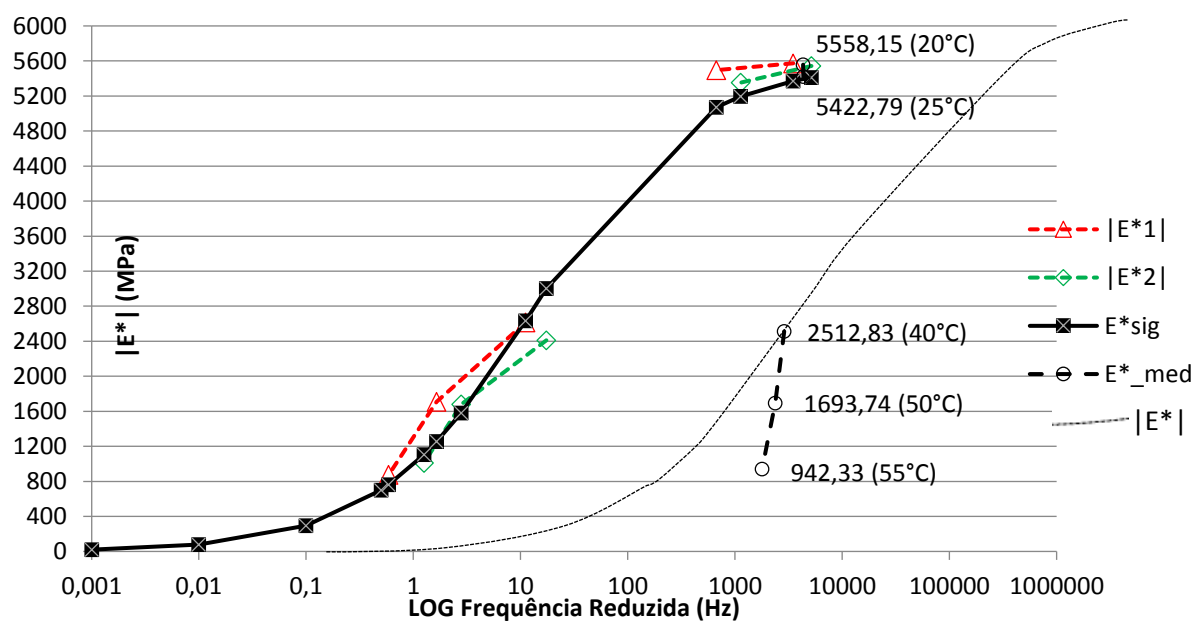


Figura 69 - Curva mestra na temperatura de 40°C para o CP-4.4.

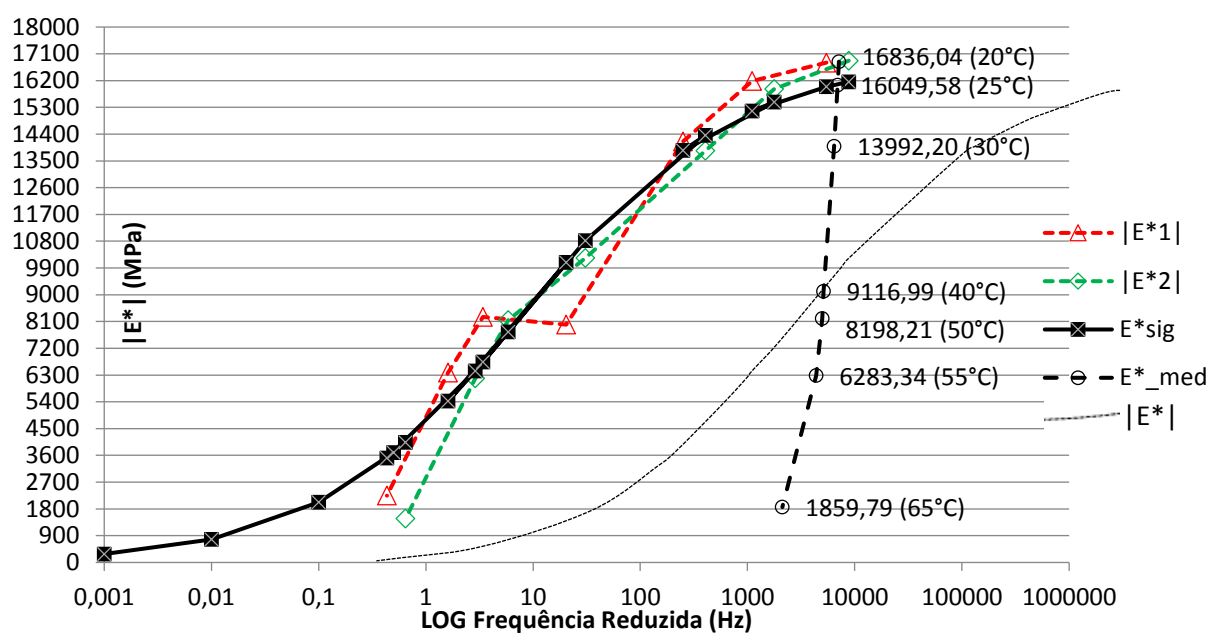


Figura 70 - Curva mestra na temperatura de 40°C para o CP-R1.

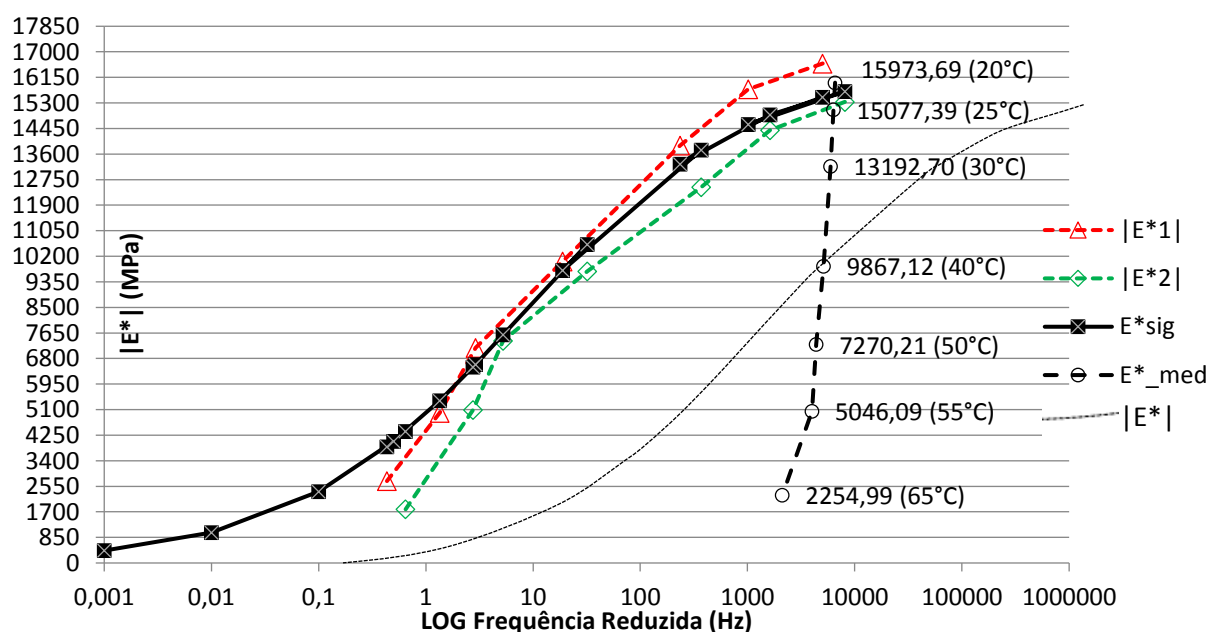


Figura 71 - Curva mestra na temperatura de 40°C para o CP-R2.

Analisando os pulsos de deformação medidos através dos H-Gages, foi verificado que as frequências dos carregamentos foram na faixa de 0,40 Hz. Para facilitar a leitura do módulo dinâmico no gráfico, que é em escala semilogarítmica, foi fixada a frequência de 1,00 Hz, o que se presume um valor de $|E^*|$ maior que na frequência anterior. A Tabela 14 apresenta os

resultados dos módulos dinâmicos obtidos no ensaio de ressonância, assim como os seus respectivos coeficientes de Poisson.

Tabela 14 – Módulos dinâmicos e coeficientes de Poisson dos revestimentos asfálticos a 40°C.

| Corpo de Prova | E* (MPa) | E* méd (MPa) | v méd |
|-----------------------|-------------------|-----------------------|--------------|
| 1.1 | 140 | 110 | 0,36 |
| 1.2 | 80 | | |
| 2 | 100 | 100 | 0,44 |
| 4.1 | 50 | 70 | 0,39 |
| 4.2 | 50 | | |
| 4.3 | 110 | | |
| R1 | 240 | 320 | 0,28 |
| R2 | 400 | | |

Observa-se que os resultados de módulos dinâmicos mostrados na Tabela 14 foram baixos. Isto não foi só devido apenas à temperatura estudada, mas também, principalmente para os revestimentos de recomposição, devido à deficiência de compactação mostrada no item 4.2 indicadas conforme as densidades aparentes (Tabela 13).

4.4 Ensaio de resistência à tração indireta

Como pré-requisito ao ensaio de módulo de resiliência, foram realizados os ensaios de resistência à tração indireta nas seções instrumentadas e no pavimento original, e os resultados obtidos encontram-se na Tabela 15.

Tabela 15 – Valores de resistência à tração indireta.

| Seção | RTI (MPa) |
|-----------------------|------------------|
| 01 | 0,426 |
| 02 | 0,322 |
| 03 | 0,285 |
| 04 | 0,388 |
| Revestimento original | 0,647 |

Observa-se que o valores de resistência à tração indireta são considerados insatisfatórios para concreto asfáltico, estando abaixo de 0,65 MPa, que é a exigência mínima da norma DNIT 031/2016-ES. Exceção se deu para o revestimento original, que atingiu esse patamar mínimo, contudo abaixo do esperado para uma mistura asfáltica com idade de 3 anos.

Observa-se que as resistências à tração indireta apresentadas na Tabela 15 são proporcionais aos valores de densidade aparente (Tabela 13), o que justifica os valores

insatisfatórios, e que a seção 03 de menor densidade foi justamente a que apresentou resultados de má qualidade no ensaio de ressonância.

4.5 Deformações específicas horizontais utilizando o modelo das múltiplas camadas elásticas

As deformações específicas horizontais foram calculadas utilizando, como dados de entrada, os módulos dinâmicos e coeficientes de Poisson para o revestimento em cada seção, conforme apresentado na Tabela 16, e os módulos de resiliência obtidos em laboratório e coeficientes de Poisson, de acordo com Matos (2015), para as camadas de base, sub-base e reforço de subleito, além do módulo de resiliência retroanalísado para a camada de subleito (todos apresentados no subitem 3.1).

Essas deformações específicas horizontais na base do revestimento asfáltico no sentido longitudinal da pista experimental foram calculadas para cada carregamento nas seções 1, 2 e 4 através do *software* AEMC/SisPav que utiliza o método das camadas finitas. Também foi simulada a situação com aderência entre a camada de revestimento e de base, mas essa condição não forneceu diferenças significativas na deformação.

A Tabela 16 apresenta os resultados de deformações específicas horizontais obtidas para cada carregamento na temperatura de 40°C na direção do tráfego com o *software* AEMC/SisPav.

Tabela 16 – Deformações específicas horizontais com o método das camadas finitas.

| Seção | 8,27 t | 10,47 t | 11,54 t |
|-------|---------------------|---------------------|---------------------|
| | ε (m/m) | ε (m/m) | ε (m/m) |
| 1 | 0,000510 | 0,000636 | 0,000684 |
| 2 | 0,000647 | 0,000805 | 0,000867 |
| 4 | 0,000580 | 0,000725 | 0,000782 |

Os resultados de deformação específicas horizontais são considerados altos, o que é decorrente da baixa rigidez dos revestimentos de recomposição devido à alta temperatura de analisada (40°C) e a deficiência de compactação já mencionada anteriormente, e como esperado as deformações aumentaram proporcionalmente com o aumento do carregamento.

Observa-se que as deformações foram maiores na seção 02, seguida da 04 e da 01, isso é decorrente do valor de coeficiente de Poisson, que mostrou mais influência nas estimativas

do que o módulo dinâmico, a Figura 72 apresenta a variação da estimativa de deformação com o coeficiente de Poisson.

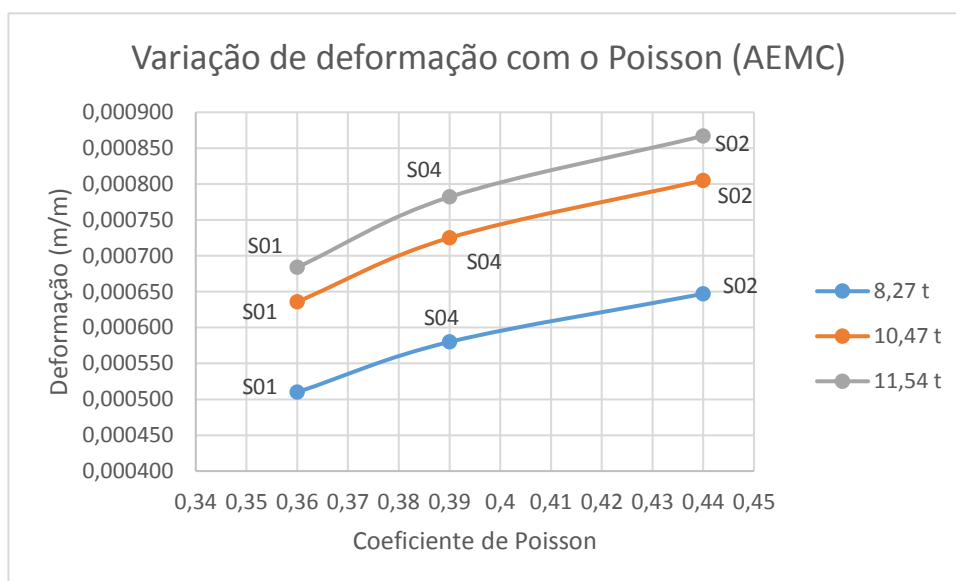


Figura 72 – Variação da estimativa de deformação do AEMC/SisPav com o valor do coeficiente de Poisson.

4.6 Modelagem em elementos finitos

4.6.1 Módulos de resiliência linearizados

Como o *software* utilizado para a modelagem em elementos finitos, o ANSYS®, não possibilita a introdução de modelos não lineares para os materiais, exceto através de linguagem de programação. Foi optado por linearizar os módulos de resiliência para as camadas de base, sub-base e reforço de subleito, levantando através do *software* AEMC/SisPav o estado de tensões na metade das camadas para cada carregamento.

As Tabelas 17 a 25 apresentam as tensões principais e os respectivos módulos de resiliência para cada carregamento e seção.

Tabela 17 – Módulos linearizados para 8,27 t na seção 01.

| Carregamento de 8,27 t | | | |
|------------------------|------------------|------------------|----------------|
| Camada | Seção 01 | | |
| | σ_1 (MPa) | σ_3 (MPa) | MR (MPa) |
| Base | 0,169163 | 0,052218 | 107,63 |
| Sub-base | 0,109456 | -0,017947 | 1780,27 |
| Reforço de subleito | 0,053808 | 0,010184 | 89,07 |

Tabela 18 - Módulos linearizados para 8,27 t na seção 02.

| Carregamento de 8,27 t | | | |
|------------------------|------------------|------------------|----------------|
| Camada | Seção 02 | | |
| | σ_1 (MPa) | σ_3 (MPa) | MR (MPa) |
| Base | 0,165936 | 0,044665 | 104,47 |
| Sub-base | 0,105431 | -0,019903 | 1761,01 |
| Reforço de subleito | 0,051988 | 0,009813 | 87,74 |

Tabela 19 - Módulos linearizados para 8,27 t na seção 04.

| Carregamento de 8,27 t | | | |
|------------------------|------------------|------------------|----------------|
| Camada | Seção 04 | | |
| | σ_1 (MPa) | σ_3 (MPa) | MR (MPa) |
| Base | 0,165103 | 0,048532 | 106,14 |
| Sub-base | 0,108454 | -0,017656 | 1768,25 |
| Reforço de subleito | 0,053732 | 0,010344 | 89,20 |

Tabela 20 - Módulos linearizados para 10,47 t na seção 01.

| Carregamento de 10,47 t | | | |
|-------------------------|------------------|------------------|----------------|
| Camada | Seção 01 | | |
| | σ_1 (MPa) | σ_3 (MPa) | MR (MPa) |
| Base | 0,222577 | 0,068761 | 113,42 |
| Sub-base | 0,136478 | -0,028829 | 2116,59 |
| Reforço de subleito | 0,066596 | 0,012418 | 97,45 |

Tabela 21 - Módulos linearizados para 10,47 t na seção 02.

| Carregamento de 10,47 t | | | |
|-------------------------|------------------|------------------|----------------|
| Camada | Seção 02 | | |
| | σ_1 (MPa) | σ_3 (MPa) | MR (MPa) |
| Base | 0,218445 | 0,059325 | 110,28 |
| Sub-base | 0,131449 | -0,031055 | 2092,68 |
| Reforço de subleito | 0,064382 | 0,011978 | 96,02 |

Tabela 22 - Módulos linearizados para 10,47 t na seção 04.

| Carregamento de 10,47 t | | | |
|-------------------------|------------------|------------------|----------------|
| Camada | Seção 04 | | |
| | σ_1 (MPa) | σ_3 (MPa) | MR (MPa) |
| Base | 0,218357 | 0,064220 | 111,96 |
| Sub-base | 0,135233 | -0,028385 | 2102,20 |
| Reforço de subleito | 0,066483 | 0,012610 | 97,58 |

Tabela 23 - Módulos linearizados para 11,54 t na seção 01.

| Carregamento de 11,54 t | | | |
|-------------------------|------------------|------------------|----------|
| Camada | Seção 01 | | |
| | σ_1 (MPa) | σ_3 (MPa) | MR (MPa) |
| Base | 0,253678 | 0,078331 | 116,27 |
| Sub-base | 0,149216 | -0,033706 | 2263,89 |
| Reforço de subleito | 0,072496 | 0,013533 | 101,09 |

Tabela 24 - Módulos linearizados para 11,54 t na seção 02.

| Carregamento de 11,54 t | | | |
|-------------------------|------------------|------------------|----------|
| Camada | Seção 02 | | |
| | σ_1 (MPa) | σ_3 (MPa) | MR (MPa) |
| Base | 0,249086 | 0,068027 | 113,19 |
| Sub-base | 0,143704 | -0,036413 | 2240,76 |
| Reforço de subleito | 0,070148 | 0,013047 | 99,63 |

Tabela 25 - Módulos linearizados para 11,54 t na seção 04.

| Carregamento de 11,54 t | | | |
|-------------------------|------------------|------------------|----------|
| Camada | Seção 04 | | |
| | σ_1 (MPa) | σ_3 (MPa) | MR (MPa) |
| Base | 0,249996 | 0,073535 | 114,88 |
| Sub-base | 0,147853 | -0,033234 | 2248,77 |
| Reforço de subleito | 0,072365 | 0,013748 | 101,22 |

4.6.2 Modelo numérico em elementos finitos e as estimativas de deformação

Realizada a modelagem geométrica, inseridas as condições de contorno e a carga externa, foram calculadas as deformações específicas horizontais na base do revestimento asfáltico recomposto na direção Z (longitudinal ao tráfego). Foram realizadas simulações com e sem atrito entre a camada de revestimento e a base, adotando-se um coeficiente de atrito igual a 0,7. A Tabela 26 apresenta os resultados das deformações para cada carregamento e seção estudada.

Observa-se, como esperado, devido à baixa rigidez do revestimento, que os resultados de deformação específica horizontal foram altos, e, ainda, que as estimativas de deformação considerando o atrito foram maiores que o dobro das estimativas sem considerar o atrito. As maiores deformações considerando o atrito já eram esperadas, pois a aderência entre as camadas aumenta as tensões horizontais e, consequente, as deformações (BALBO, 2007).

Tabela 26 – Deformações específicas horizontais calculadas através do MEF.

| Carregamento | | 8,27 t | 10,47 t | 11,54 t |
|--------------|----------|--------------|--------------|--------------|
| Com atrito | Seção 01 | 0,000315 m/m | 0,000418 m/m | 0,000469 m/m |
| | Seção 02 | 0,000350 m/m | 0,000470 m/m | 0,000527 m/m |
| | Seção 04 | 0,000378 m/m | 0,000511 m/m | 0,000575 m/m |
| Sem atrito | Seção 01 | 0,000148 m/m | 0,000181 m/m | 0,000196 m/m |
| | Seção 02 | 0,000157 m/m | 0,000193 m/m | 0,000209 m/m |
| | Seção 04 | 0,000146 m/m | 0,000181 m/m | 0,000196 m/m |

Observa-se que, considerando o atrito, as estimativas de deformação são inversamente proporcionais ao módulo dinâmico do revestimento, porém essa relação desaparece quando sem atrito, onde as maiores estimativas são na seção de maior coeficiente de Poisson (seção 02). As Figuras 73 e 74 apresentam a relação da estimativa de deformação com o módulo dinâmico do revestimento na simulação com atrito e com o coeficiente de Poisson do revestimento na simulação sem atrito.

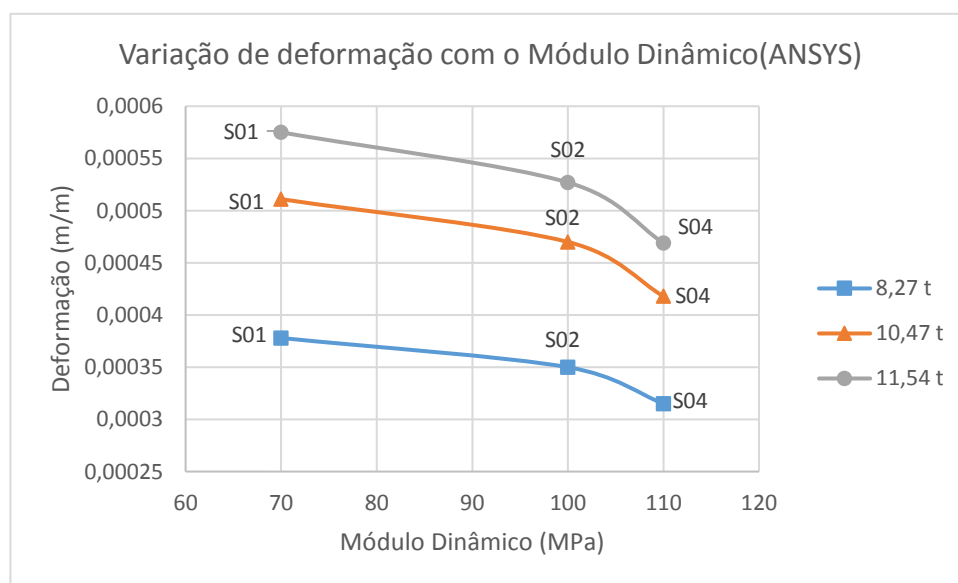


Figura 73 – Variação da estimativa de deformação no modelo em elementos finitos com o módulo dinâmico do revestimento na simulação com atrito.

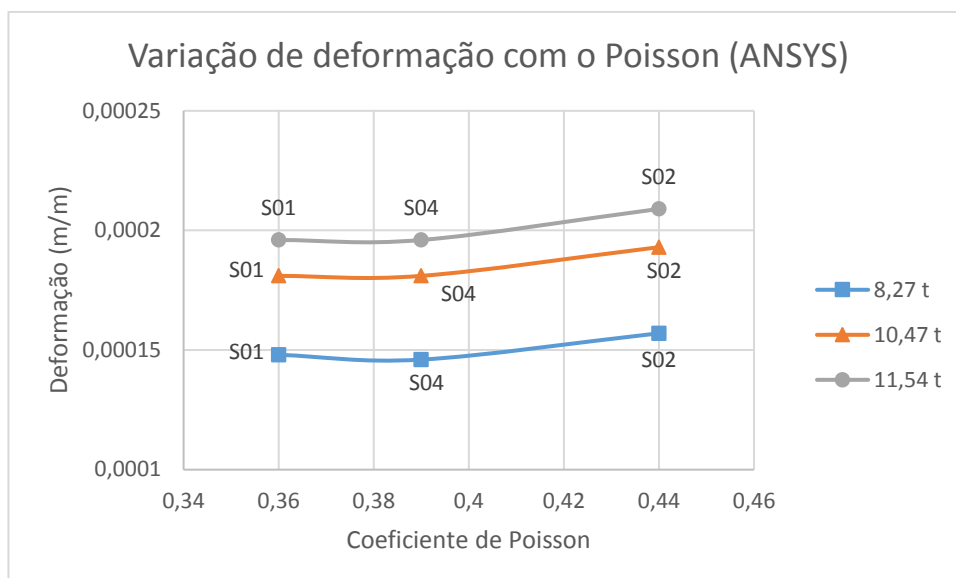


Figura 74 - Variação da estimativa de deformação do modelo em elementos finitos com o coeficiente de Poisson do revestimento na simulação sem atrito.

As Figuras 75 e 76 apresentam, para o carregamento de 10,47 t na seção 04 considerando o atrito, as deformações específicas de tração no sentido longitudinal do pavimento na superfície do revestimento asfáltico e na base do revestimento asfáltico.

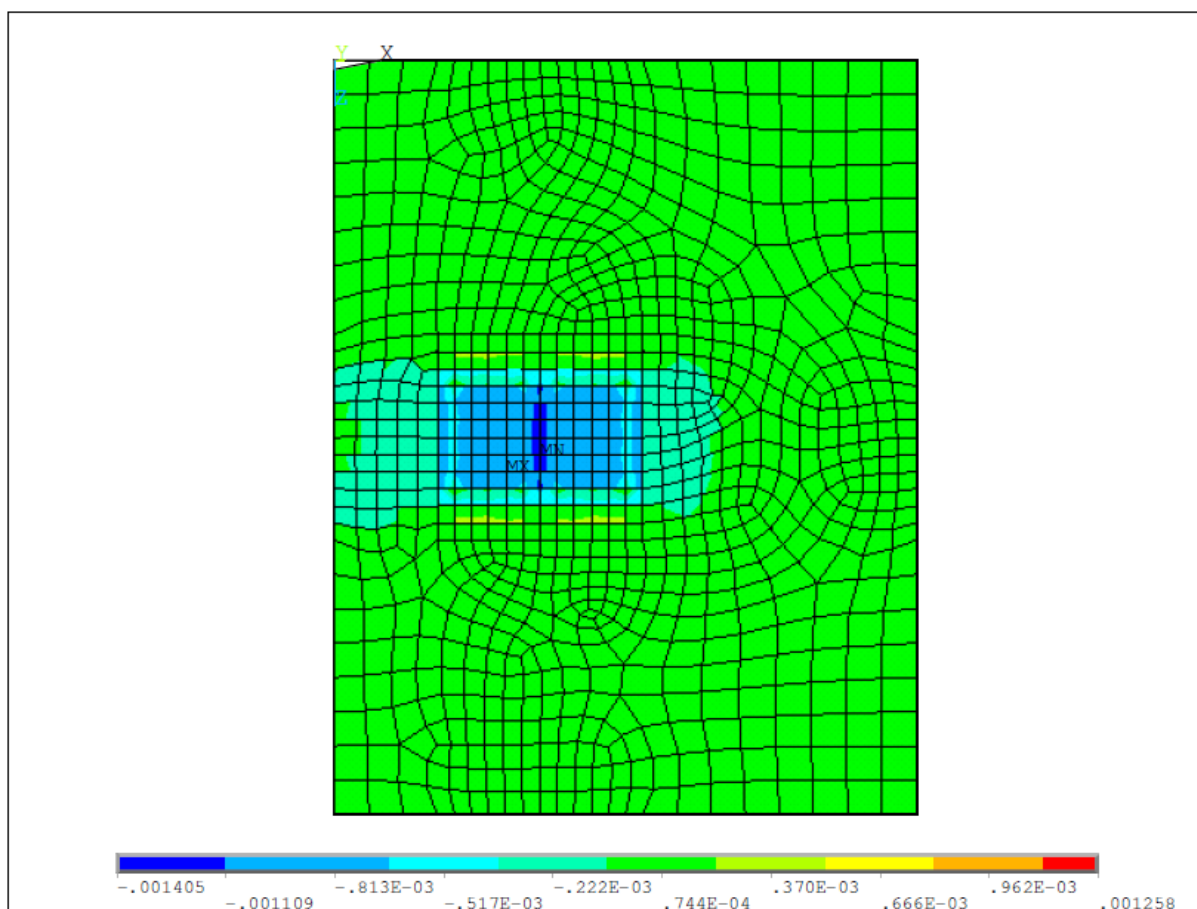


Figura 75 - Deformações na superfície do revestimento asfáltico na direção longitudinal do pavimento utilizando o ANSYS ® para a seção 04 e carregamento de 10,47 t (considerando o atrito).

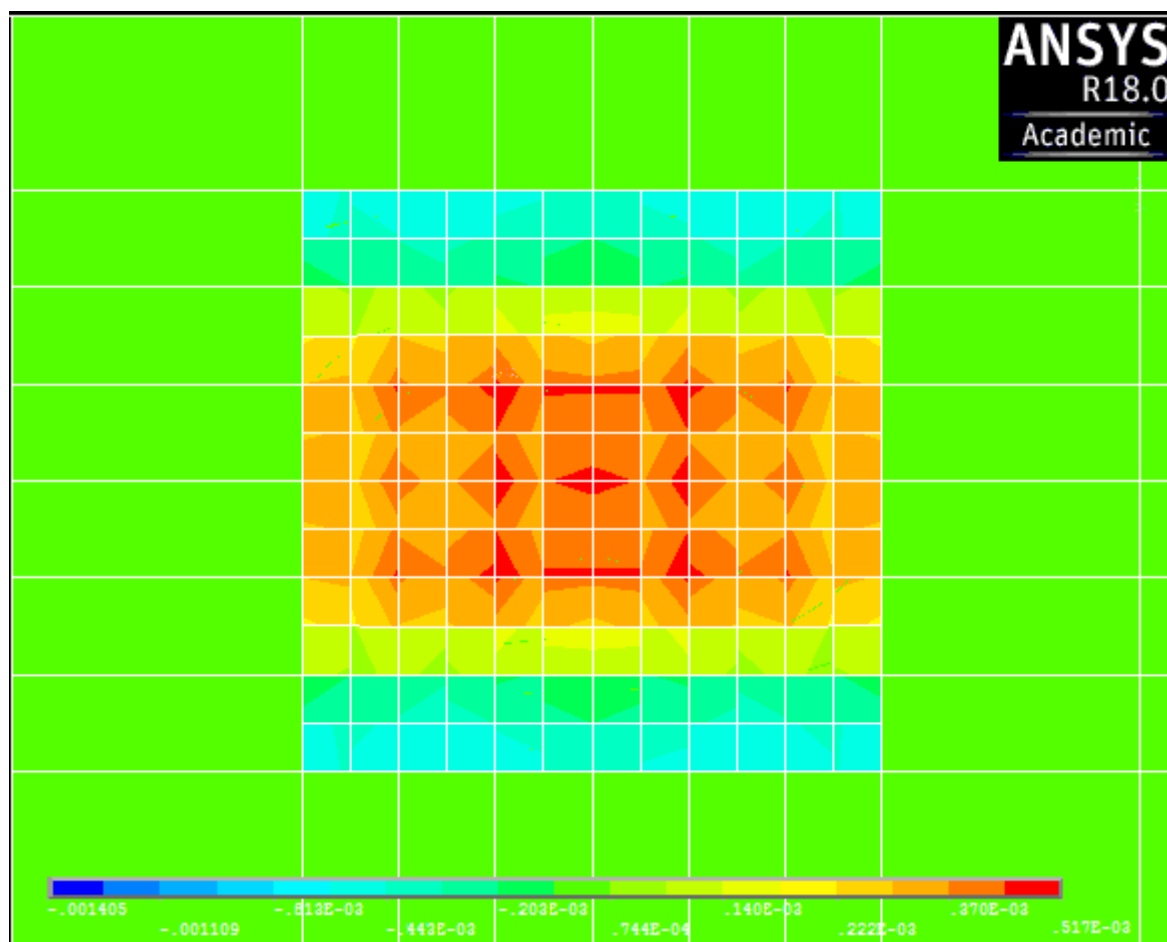


Figura 76 - Deformações na base do revestimento asfáltico na direção longitudinal do pavimento utilizando o ANSYS ® para a seção 04 e carregamento de 10,47 t (considerando o atrito).

Observando as duas figuras mostradas anteriormente vê-se que as deformações são maiores quanto mais próximas do centro do revestimento de recomposição e que na superfície do revestimento acontece deformações de compressão enquanto na base de tração, o que era o esperado.

4.7 Análise e comparativo dos resultados de deformação específica horizontal

4.7.1 Análise das deformações medidas através da instrumentação

Primeiramente foi realizado o tratamento estatístico dos levantamentos (amostras), buscando os dados discrepantes de cada amostra através do critério de Chauvenet e avaliando a precisão do resultado. Nenhuma das amostras teve dados discrepantes suficientemente para serem eliminados, mantendo-se todos os dados para o cálculo da deformação específica de tração média e as respectivas incertezas absolutas e relativas.

As Tabelas 27, 28 e 29 apresentam as deformações específicas de tração médias (ϵ_{om}) e as respectivas incertezas para os carregamentos de 8,27 t, 10,47 t e 11,54 t, respectivamente, apresentando os valores para cada seção e temperatura de campo. Observa-se que algumas incertezas relativas são consideradas altas (maiores que 20,0 %), tendo maior incidência no carregamento de 8,27 t, que é o menor. Efeitos eletromagnéticos e variações de velocidade na passagem do veículo também podem provocar desvios nas medições.

Tabela 27 – Deformações específicas médias medidas em campo e suas respectivas incertezas (8,27 t).

| Seção | T1 = 38,5 °C | | | T2 = 44,43 °C | | |
|-------|--------------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------------|-----------------------|-----------------------|
| | ϵ_{om} (m/m) | Incerteza Absoluta | Incerteza Relativa | ϵ_{om} (m/m) | Incerteza Absoluta | Incerteza Relativa |
| S01 | 0,000675 | 0,000064 | 9,45% | 0,000968 | 0,000064 | 6,65% |
| S02 | 0,000190 | 0,000043 | 22,42% | 0,000589 | 0,000130 | 22,09% |
| S03 | 0,000365 | 0,000031 | 8,44% | 0,000758 | 0,000029 | 3,77% |
| S04 | 0,000431 | 0,000097 | 22,60% | 0,000738 | 0,000049 | 6,71% |

Tabela 28 - Deformações específicas médias medidas em campo e suas respectivas incertezas (10,47 t).

| Seção | T1 = 40,40 °C | | | T2 = 43,00 °C | | |
|-------|--------------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------------|-----------------------|-----------------------|
| | ϵ_{om} (m/m) | Incerteza Absoluta | Incerteza Relativa | ϵ_{om} (m/m) | Incerteza Absoluta | Incerteza Relativa |
| S01 | 0,000402 | 0,000020 | 4,98% | 0,000781 | 0,000059 | 7,55% |
| S02 | 0,000497 | 0,000043 | 8,73% | 0,000565 | 0,000079 | 13,96% |
| S03 | 0,000388 | 0,000040 | 10,42% | 0,000314 | 0,000070 | 22,25% |
| S04 | 0,000493 | 0,000023 | 4,76% | 0,000521 | 0,000031 | 5,86% |

Tabela 29 - Deformações específicas médias medidas em campo e suas respectivas incertezas (11,54 t).

| Seção | T1 = 40,80 °C | | | T2 = 38,80 °C | | |
|-------|--------------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------------|-----------------------|-----------------------|
| | ϵ_{om} (m/m) | Incerteza Absoluta | Incerteza Relativa | ϵ_{om} (m/m) | Incerteza Absoluta | Incerteza Relativa |
| S01 | 0,000774 | 0,000043 | 5,57% | 0,000730 | 0,000054 | 7,44% |
| S02 | 0,000682 | 0,000070 | 10,25% | 0,000523 | 0,000027 | 5,08% |
| S03 | 0,000368 | 0,000101 | 27,41% | 0,000351 | 0,000047 | 13,54% |
| S04 | 0,000714 | 0,000029 | 4,01% | 0,000569 | 0,000026 | 4,51% |

Para analisar a influência da mudança de temperatura e da magnitude dos carregamentos nas deformações medidas, foi realizada uma análise fatorial. A Tabela 30 apresenta o resultado do plano fatorial desenvolvido, onde as temperaturas de campo e os carregamentos são representados através de variáveis codificadas T e P , respectivamente, obtidas através das Equações 44 e 45 mostradas no item 3.13.

Tabela 30 – Plano fatorial das medições de campo.

| | Levantamento | Variáveis | | | | | | |
|----------|--------------|-----------|-------|-------|-------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | | t(°C) | p(t) | T | P | ϵ_1 (m/m) | ϵ_2 (m/m) | ϵ_3 (m/m) |
| Seção 01 | 1 | 38,50 | 8,27 | -1,00 | -1,00 | 0,000680 | 0,000594 | 0,000750 |
| | 2 | 44,43 | 8,27 | 1,00 | -1,00 | 0,000984 | 0,000882 | 0,001037 |
| | 3 | 40,40 | 10,47 | -0,36 | 0,35 | 0,000401 | 0,000427 | 0,000378 |
| | 4 | 43,00 | 10,47 | 0,52 | 0,35 | 0,000728 | 0,000751 | 0,000863 |
| | 5 | 40,80 | 11,54 | -0,22 | 1,00 | 0,000804 | 0,000713 | 0,000805 |
| | 6 | 38,80 | 11,54 | -0,90 | 1,00 | 0,000678 | 0,000805 | 0,000707 |
| Seção 02 | 7 | 38,50 | 8,27 | -1,00 | -1,00 | 0,000134 | 0,000200 | 0,000237 |
| | 8 | 44,43 | 8,27 | 1,00 | -1,00 | 0,000499 | 0,000773 | 0,000495 |
| | 9 | 40,40 | 10,47 | -0,36 | 0,35 | 0,000538 | 0,000437 | 0,000516 |
| | 10 | 43,00 | 10,47 | 0,52 | 0,35 | 0,000537 | 0,000485 | 0,000672 |
| | 11 | 40,80 | 11,54 | -0,22 | 1,00 | 0,000624 | 0,000780 | 0,000641 |
| | 12 | 38,80 | 11,54 | -0,90 | 1,00 | 0,000492 | 0,000557 | 0,000521 |
| Seção 03 | 13 | 38,50 | 8,27 | -1,00 | -1,00 | 0,000400 | 0,000325 | 0,000370 |
| | 14 | 44,43 | 8,27 | 1,00 | -1,00 | 0,000720 | 0,000765 | 0,000789 |
| | 15 | 40,40 | 10,47 | -0,36 | 0,35 | 0,000340 | 0,000439 | 0,000386 |
| | 16 | 43,00 | 10,47 | 0,52 | 0,35 | 0,000218 | 0,000382 | 0,000343 |
| | 17 | 40,80 | 11,54 | -0,22 | 1,00 | 0,000462 | 0,000413 | 0,000228 |
| | 18 | 38,80 | 11,54 | -0,90 | 1,00 | 0,000377 | 0,000284 | 0,000391 |
| Seção 04 | 19 | 38,50 | 8,27 | -1,00 | -1,00 | 0,000537 | 0,000302 | 0,000455 |
| | 20 | 44,43 | 8,27 | 1,00 | -1,00 | 0,000673 | 0,000748 | 0,000793 |
| | 21 | 40,40 | 10,47 | -0,36 | 0,35 | 0,000460 | 0,000514 | 0,000504 |
| | 22 | 43,00 | 10,47 | 0,52 | 0,35 | 0,000481 | 0,000528 | 0,000555 |
| | 23 | 40,80 | 11,54 | -0,22 | 1,00 | 0,000731 | 0,000674 | 0,000738 |
| | 24 | 38,80 | 11,54 | -0,90 | 1,00 | 0,000533 | 0,000587 | 0,000588 |

Através de regressão linear, foram gerados modelos fatoriais completos para os dados observados em cada seção estudada e para todo o conjunto de dados, de forma que tornou possível observar como os níveis de temperatura e de carregamento influenciam na inferência da deformação específica de tração medida, todos com nível de confiança de 95,0%. As Equações 48 a 52 apresentam os modelos considerando todas as medições, somente as medições da seção 01, da seção 02, da seção 03 e da seção 04 respectivamente.

$$\varepsilon = 0,000555 + 0,000081.T - 0,000014.P - 0,000095.T.P \quad (48)$$

$$\varepsilon = 0,000728 + 0,000090.T - 0,000052.P - 0,000076.T.P \quad (49)$$

$$\varepsilon = 0,000506 + 0,000139.T + 0,000125.P - 0,000057.T.P \quad (50)$$

$$\varepsilon = 0,000418 + 0,000037.T - 0,000138.P - 0,000155.T.P \quad (51)$$

$$\varepsilon = 0,000570 + 0,000059.T + 0,000007.P - 0,000093.T.P \quad (52)$$

Vale salientar que o objetivo dos modelos não é de efetuar inferências de deformações específicas de tração, mas sim observar as influências de T , P e do produto $T \times P$ no comportamento da deformação. Caso o coeficiente (p -level) de algum termo tenha valor de probabilidade maior que 5% (0,05) (p -value), o mesmo tem pouca influência na inferência da deformação. Esses valores são apresentados nas Tabelas 31 a 35 para cada modelo desenvolvido.

Tabela 31 – Resultado da regressão linear para o modelo que considera os levantamentos de todas as seções.

| Modelo 01 | | | | | | |
|-----------|-----------|-------------|-----------|----------|----------------------------|----------------------------|
| Constante | Valor | Erro Padrão | t-value | p-level | Limite de Confiança Mínimo | Limite de Confiança Máximo |
| b0 | 0,000555 | 0,000022 | 24,450300 | 0,000000 | 0,000512 | 0,000599 |
| b1 | 0,000081 | 0,000034 | 2,416090 | 0,018379 | 0,000014 | 0,000148 |
| b2 | -0,000014 | 0,000028 | -0,519400 | 0,605167 | -0,000070 | 0,000041 |
| b3 | -0,000095 | 0,000036 | -2,636030 | 0,010383 | -0,000168 | -0,000230 |

Tabela 32 – Resultado da regressão linear para o modelo que considera somente a seção 01.

| Modelo 02 | | | | | | |
|-----------|-----------|-------------|-----------|----------|----------------------------|----------------------------|
| Constante | Valor | Erro Padrão | t-value | p-level | Limite de Confiança Mínimo | Limite de Confiança Máximo |
| b0 | 0,000728 | 0,000041 | 17,617110 | 0,000000 | 0,000640 | 0,000817 |
| b1 | 0,000090 | 0,000064 | 1,414790 | 1,178987 | -0,000046 | 0,000227 |
| b2 | -0,000052 | 0,000053 | -0,993730 | 0,337221 | -0,000165 | 0,000060 |
| b3 | -0,000076 | 0,000069 | -1,114810 | 0,283704 | -0,000223 | 0,000071 |

Tabela 33 – Resultado da regressão linear para o modelo que considera somente a seção 02.

| Modelo 03 | | | | | | |
|-----------|-----------|-------------|-----------|----------|----------------------------|----------------------------|
| Constante | Valor | Erro Padrão | t-value | p-level | Limite de Confiança Mínimo | Limite de Confiança Máximo |
| b0 | 0,000506 | 0,000024 | 20,846300 | 0,000000 | 0,000454 | 0,000558 |
| b1 | 0,000139 | 0,000037 | 3,730430 | 0,002238 | 0,000059 | 0,000219 |
| b2 | 0,000125 | 0,000031 | 4,053630 | 0,001185 | 0,000059 | 0,000191 |
| b3 | -0,000057 | 0,000040 | -1,409950 | 0,180830 | -0,000143 | 0,000030 |

Tabela 34 – Resultado da regressão linear para o modelo que considera somente a seção 03.

| Modelo 04 | | | | | | |
|-----------|-----------|-------------|-----------|----------|----------------------------|----------------------------|
| Constante | Valor | Erro Padrão | t-value | p-level | Limite de Confiança Mínimo | Limite de Confiança Máximo |
| b0 | 0,000418 | 0,000200 | 20,723180 | 0,000000 | 0,000375 | 0,000461 |
| b1 | 0,000037 | 0,000031 | 1,175590 | 0,259363 | -0,000003 | 0,000103 |
| b2 | -0,000138 | 0,000026 | -5,369800 | 0,000099 | -0,000193 | -0,000083 |
| b3 | -0,000155 | 0,000033 | -4,644390 | 0,000379 | -0,000227 | -0,000084 |

Tabela 35 – Resultado da regressão linear para o modelo que considera somente a seção 04.

| Modelo 05 | | | | | | |
|-----------|-----------|-------------|-----------|----------|----------------------------|----------------------------|
| Constante | Valor | Erro Padrão | t-value | p-level | Limite de Confiança Mínimo | Limite de Confiança Máximo |
| b0 | 0,000570 | 0,000025 | 22,804160 | 0,000000 | 0,000516 | 0,000263 |
| b1 | 0,000059 | 0,000038 | 1,530630 | 0,148139 | -0,000024 | 0,000141 |
| b2 | 0,000007 | 0,000031 | 0,230440 | 0,821085 | -0,000061 | 0,000075 |
| b3 | -0,000093 | 0,000041 | -2,247020 | 0,041285 | -0,000182 | -0,000004 |

Esses modelos também são representados graficamente nas Figuras 77 a 81, onde “m” é a deformação medida (m/m), T o fator de temperatura e P o fator de carregamento.

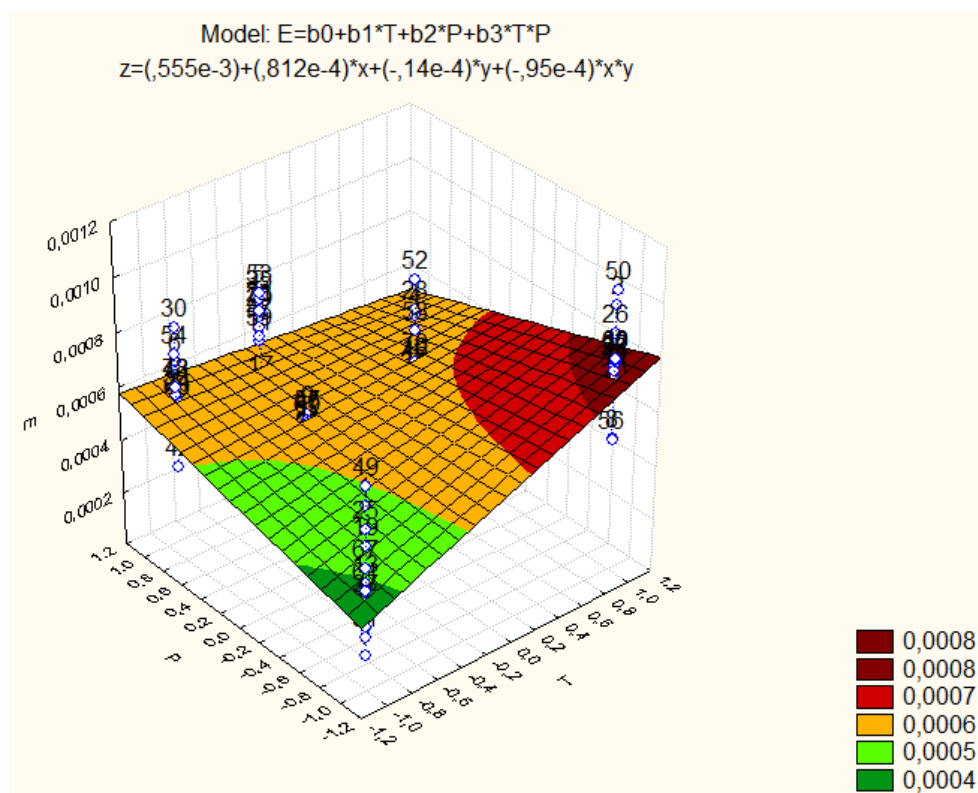


Figura 77 – Representação gráfica do modelo que considera os levantamentos de todas a seções.

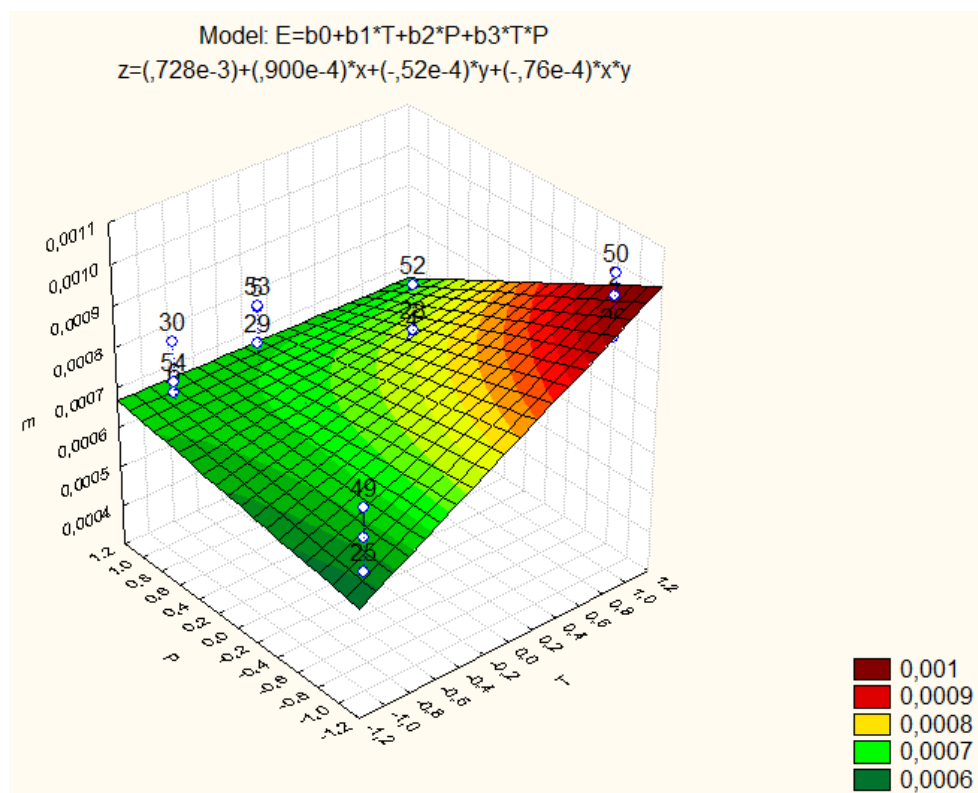


Figura 78 – Representação gráfica do modelo que considera somente a seção 01.

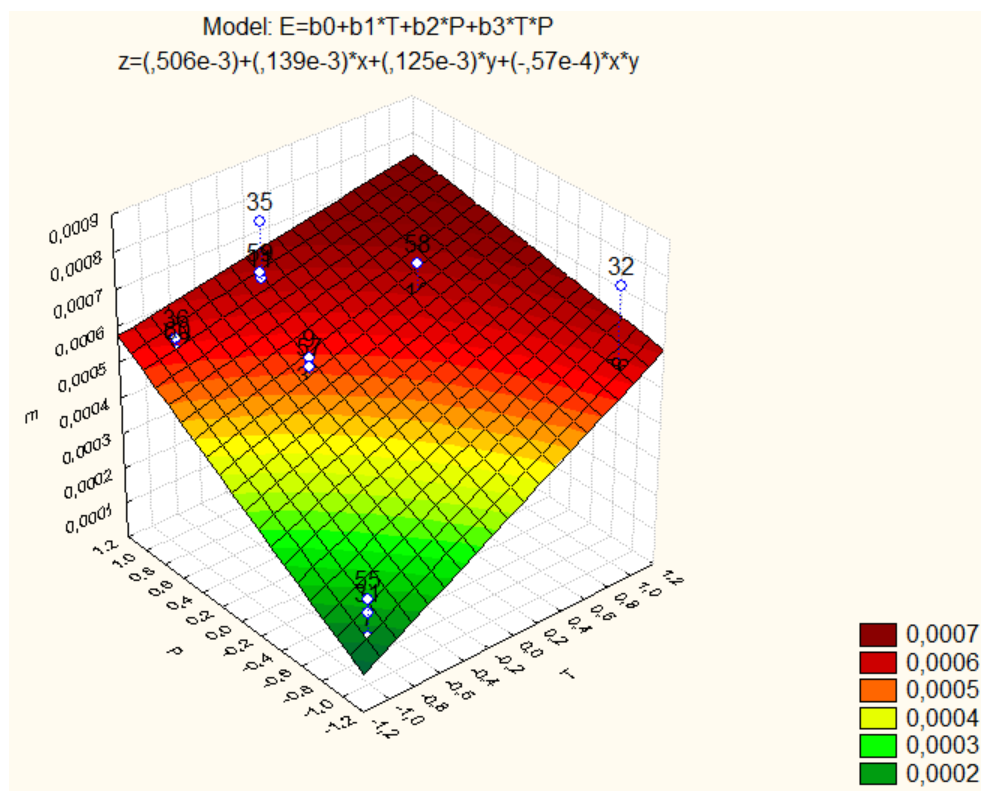


Figura 79 – Representação gráfica do modelo que considera somente a seção 02.

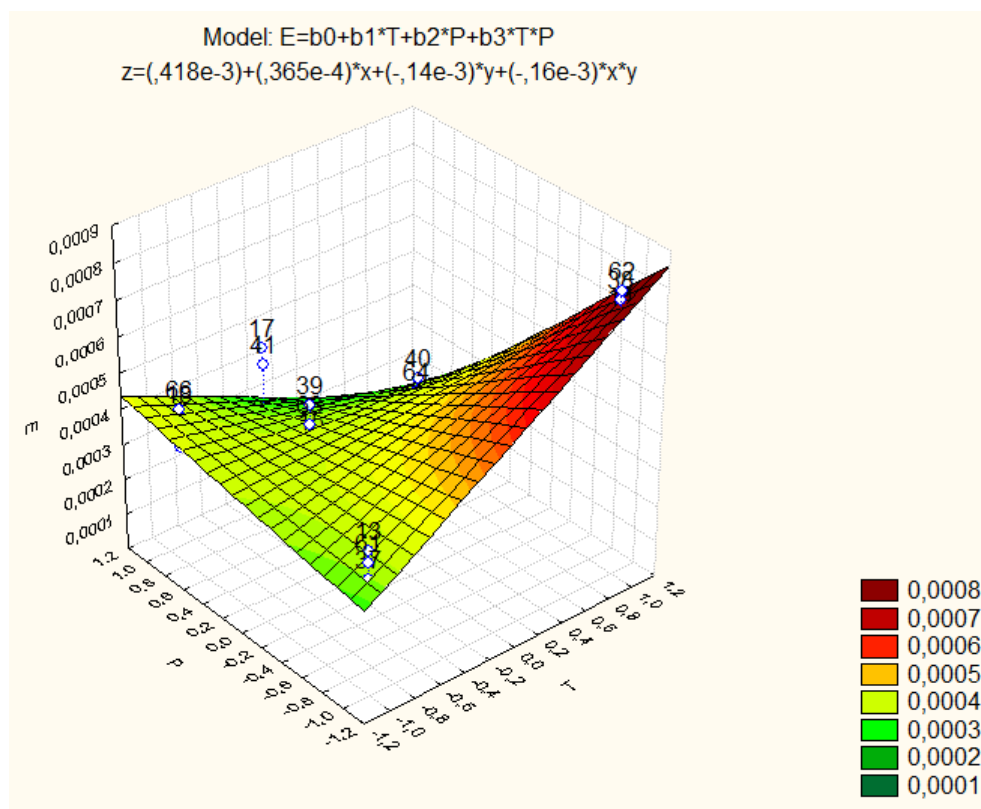


Figura 80 – Representação gráfica do modelo que considera somente a seção 03.

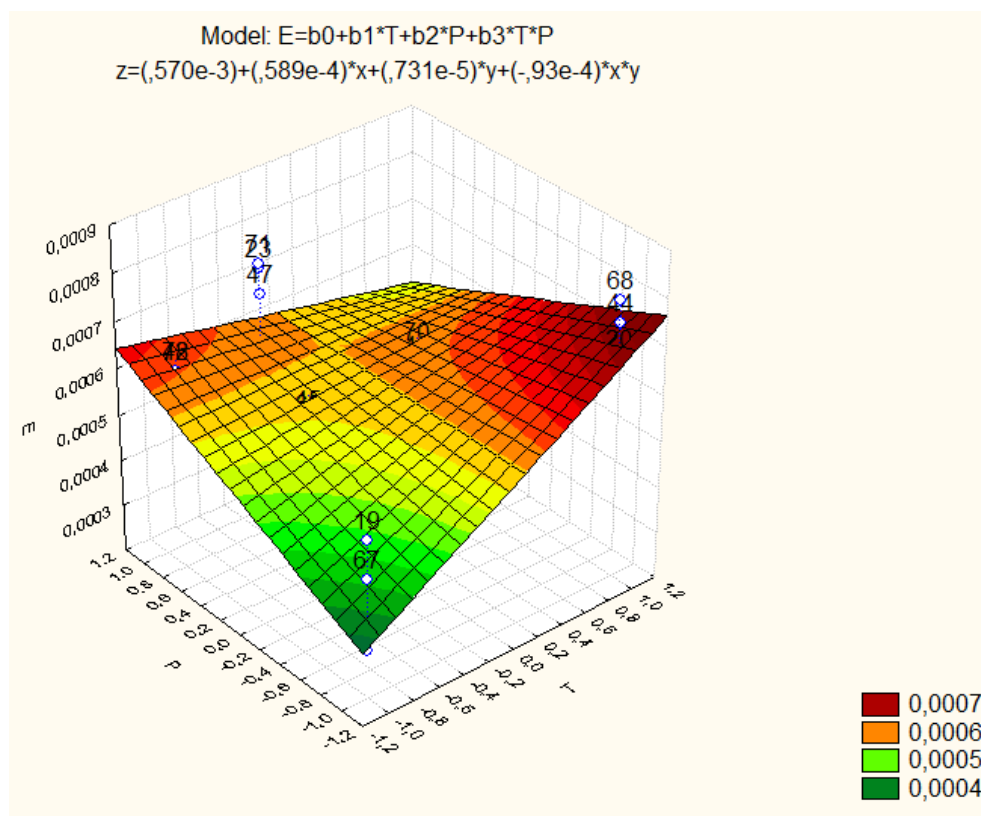


Figura 81 – Representação gráfica do modelo que considera somente a seção 04.

Observando os resultados das regressões lineares e as representações gráficas dos modelos fatoriais, apresentados nas figuras anteriores, é possível identificar que os fatores que mais influenciam (probabilidade $< 0,05$) são o nível de temperatura (T) e o produto entre os níveis de temperatura e de carregamento ($T.P$), mostrando que a deformação é mais influenciada pela temperatura do que pela magnitude do carregamento e que esta influência é maior nos menores carregamentos.

Ainda se observa nos gráficos dos modelos, que os pontos de maior deformação foram exatamente os de fator de temperatura máximo, sendo que o valor máximo de fator de carregamento só forneceu o valor máximo de deformação na seção 02, que inclusive o ponto de deformação máxima foi o de maior fator de carregamento e de temperatura concomitantemente.

Também foi avaliado o aumento da deformação específica de tração com o aumento da temperatura. Para tanto, calculou-se o percentual de aumento de deformação para cada acréscimo de $1,0^\circ \text{C}$ em cada intensidade de carregamento. As Tabelas 36, 37 e 38 apresentam

a variação percentual da deformação com o aumento da temperatura para os carregamentos de 8,27 t, 10,47 t e 11,54 t, respectivamente.

Tabela 36 – Variação de deformação específica com a temperatura (8,27 t).

| Seção | ϵ_{om} (m/m) T1 = 38,5 °C | ϵ_{om} (m/m) T2 = 44,43 °C | Variação por °C | Variação média por °C |
|-------|---------------------------------------|--|-----------------|-----------------------|
| S01 | 0,000675 | 0,000968 | 7,32 % | 18,23 % |
| S02 | 0,000190 | 0,000589 | 35,41 % | |
| S03 | 0,000365 | 0,000758 | 18,16 % | |
| S04 | 0,000431 | 0,000738 | 12,01 % | |

Tabela 37 - Variação de deformação específica com a temperatura (10,47 t).

| Seção | ϵ_{om} (m/m) T1 = 40,40 °C | ϵ_{om} (m/m) T2 = 43,00 °C | Variação por °C | Variação média por °C |
|-------|--|--|-----------------|-----------------------|
| S01 | 0,000402 | 0,000781 | 36,23 % | 14,57 % |
| S02 | 0,000497 | 0,000565 | 5,24 % | |
| S03 | 0,000388 | 0,000314 | -7,33 % | |
| S04 | 0,000493 | 0,000521 | 2,24 % | |

Tabela 38 - Variação de deformação específica com a temperatura (11,54 t).

| Seção | ϵ_{om} (m/m) T1 = 40,80 °C | ϵ_{om} (m/m) T2 = 38,80 °C | Variação por °C | Variação média por °C |
|-------|--|--|-----------------|-----------------------|
| S01 | 0,000774 | 0,000730 | 2,84 % | 6,73 % |
| S02 | 0,000682 | 0,000523 | 11,61 % | |
| S03 | 0,000368 | 0,000351 | 2,31 % | |
| S04 | 0,000714 | 0,000569 | 10,15 % | |

Com exceção da seção 03 no carregamento de 10,47 t (Tabela 37), o acréscimo de temperatura significou acréscimo de deformação, e, portanto, só essa medição foi excluída do cálculo da variação percentual média. Em relação ao comparativo da influência térmica nos três carregamentos, observa-se que a variação de deformação devido ao acréscimo térmico foi maior nos menores carregamentos, apontando para maior influência da temperatura na deformação em menores carregamentos, como mostrado na análise fatorial.

Em complemento, as Figuras 82, 83 e 84 apresentam graficamente a variação da deformação com a temperatura para cada intensidade de carregamento, observando-se que a seção 03, nos carregamentos de 10,47 t e 11,54 t, apresentou comportamento atípico e pouca variação, provavelmente pela baixa rigidez do revestimento que fez com que a diferença de temperatura não fosse significativa na variação de deformação.

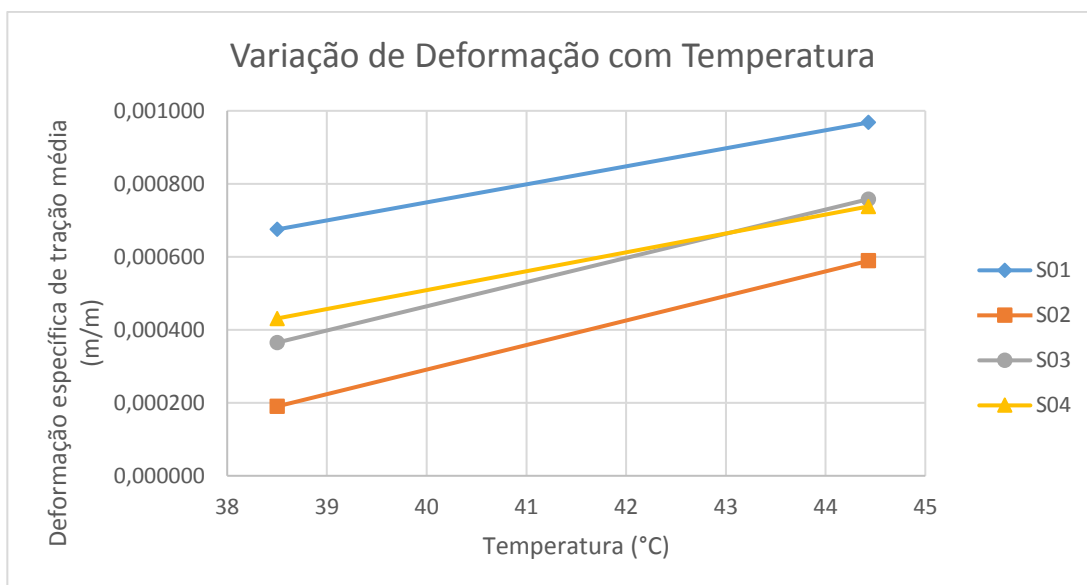


Figura 82 – Variação de deformação específica com a temperatura (8,27 t).

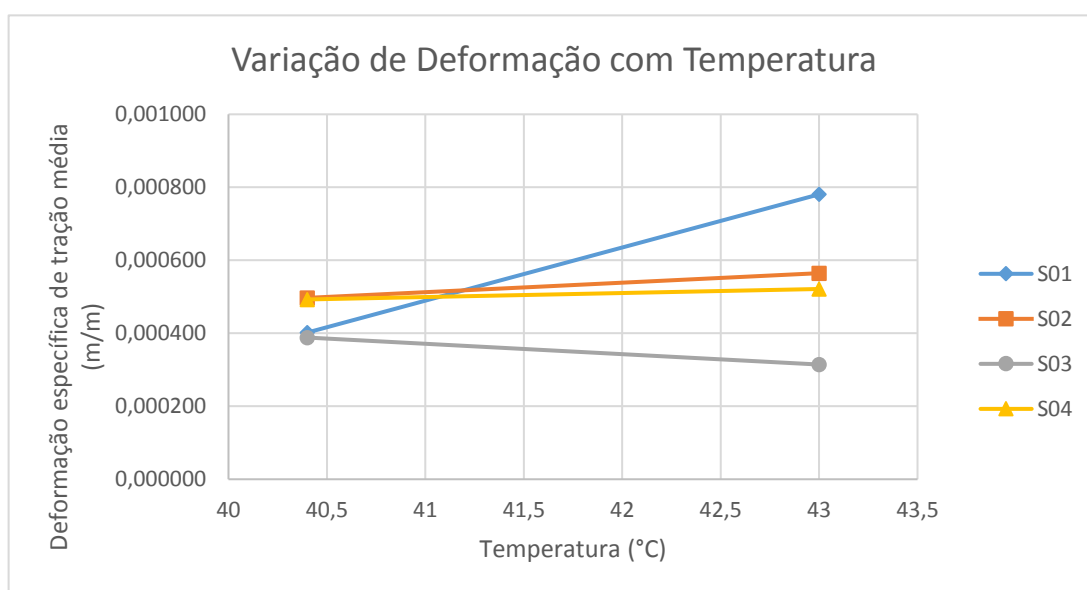


Figura 83 - Variação de deformação específica com a temperatura (10,47 t).

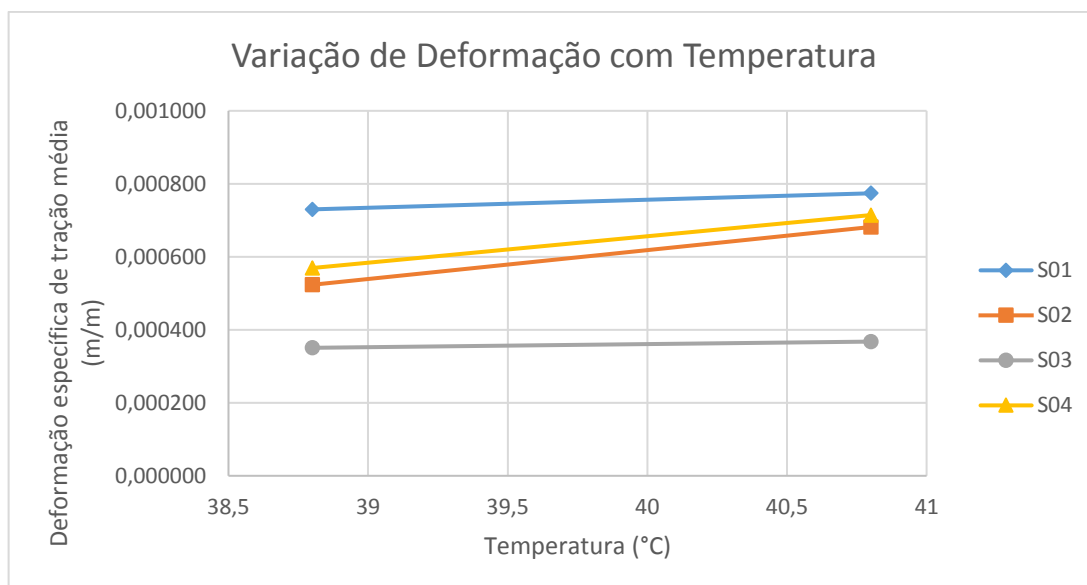


Figura 84 - Variação de deformação específica com a temperatura (11,54 t).

Para avaliar a variação da deformação específica de tração com a intensidade do carregamento foi fixada a temperatura média de 40° C, utilizando a temperatura T1 nas três medições, devido às temperaturas medidas estarem mais próximas a este valor.

A Tabela 39 e a Figura 85 apresentam a variação da deformação com a intensidade do carregamento, onde se observa que na seção 01 o valor de deformação para o carregamento de 8,27 t é incoerente, sendo 40,44 % maior do que o valor para 10,47 t, sendo ainda a temperatura medida em campo no carregamento de 8,27 t menor do que no carregamento de 10,47 t em 2,0° C, o que deveria promover maior rigidez no revestimento asfáltico no carregamento de 8,27 t e consequentemente menor deformação.

Na seção 02, para o carregamento de 8,27 t, o valor medido está fora da ordem de grandeza dos demais carregamentos, inclusive comparando com os outros carregamentos. Já na seção 03 praticamente não houve variação nas três medições, apresentando inclusive pequeno decréscimo de deformação do carregamento de 10,47 t para 11,54 t, sendo que a diferença de temperatura entre os dois é de apenas 0,4° C.

A inconsistência na seção 01 foi provavelmente decorrente de efeitos eletromagnéticos no sensor, que não foram observados no momento da medição. Na seção 02 aparentemente foi decorrente da passagem do carregamento fora do alinhamento do sensor. Na seção 03 acredita-se que tenha ocorrido alguma falha na ancoragem do sensor. Excluindo as medições citadas, o

comportamento da deformação com a variação do carregamento foi coerente, aumentando proporcionalmente com a magnitude do carregamento.

Tabela 39 – Variação de deformação específica com a intensidade da carga para temperatura aproximadamente de 40°C.

| Seção | ϵ_{om} (m/m) - T1 | | | Diferença entre 8,27 t e 10,47 t | Diferença entre 8,27t e 11,54 t | Diferença entre 10,47 t e 11,54 t |
|-------|----------------------------|----------|----------|----------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|
| | 8,27 t | 10,47 t | 11,54t | | | |
| S01 | 0,000675 | 0,000402 | 0,000774 | -40,44% | 14,67% | 92,54% |
| S02 | 0,000190 | 0,000497 | 0,000682 | 161,58% | 258,77% | 37,16% |
| S03 | 0,000365 | 0,000388 | 0,000368 | 6,39% | 0,73% | -5,32% |
| S04 | 0,000431 | 0,000493 | 0,000714 | 14,31% | 65,74% | 44,99% |

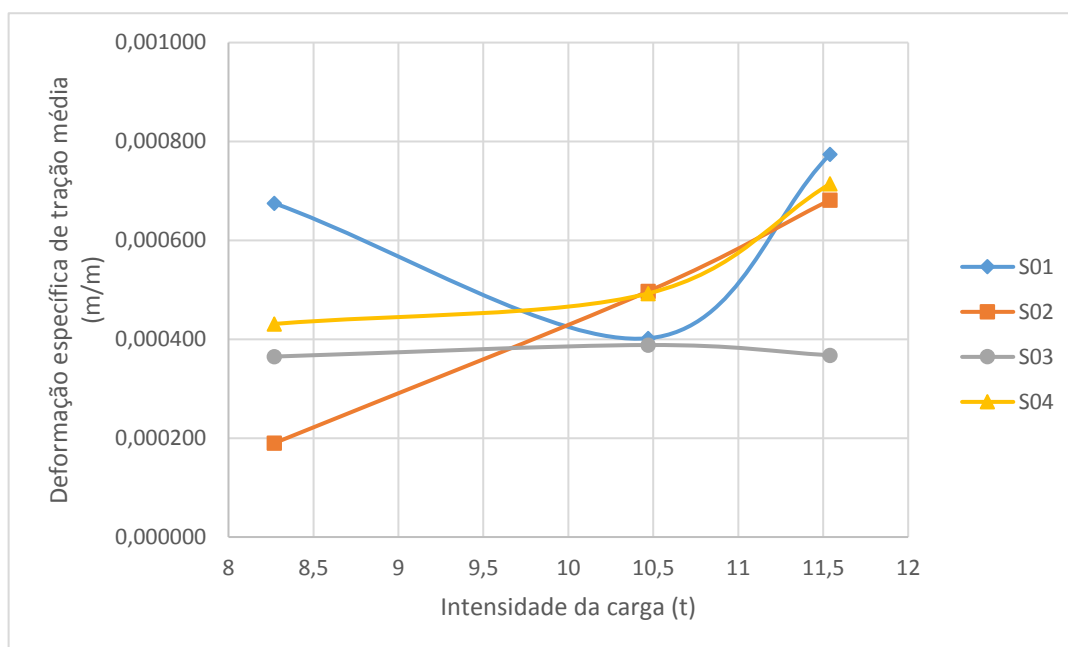


Figura 85 – Variação deformação com a intensidade da carga para temperatura aproximadamente de 40° C.

Assim como no ensaio de ressonância por impacto, a seção 03 apresentou muitas inconsistências, tanto na análise da variação térmica, como na análise da variação da intensidade do carregamento, o que reforça ainda mais a exclusão dessa seção nas análises posteriores.

4.7.2 Comparativo entre instrumentação e o método das múltiplas camadas finitas

No comparativo entre as deformações de campo e as calculadas através do método das camadas finitas, a diferença percentual média, desconsiderando todos os resultados da seção 03

e os resultados das seções 01 e 02 no carregamento de 8,27 t, foi de 32,42 % a mais para a simulação no *software* AEMC/SisPav, estando um pouco acima do intervalo de 18% a 30% encontrado por Dong *et al.* (2012). Essa diferença entre os valores medidos e estimados são decorrentes das hipóteses simplificadores do método numérico.

A Tabela 40 apresenta as diferenças percentuais entre as simulações com o método das camadas finitas (ϵ_{AEMC}) e as medições de campo em T1 (ϵ_{om}), onde, com exceção da seção 01 no carregamento de 11,54 t, as estimativas com o método das camadas finitas forneceram valores maiores, ou seja, superestimaram as deformações.

Tabela 40 – Comparativo de deformações específicas de tração medidas em campo e estimadas através do *software* AEMC/SisPav ($T = T1 \cong 40^\circ\text{C}$).

| Seção | 8,27 t | | | 10,47 t | | | 11,54 t | | |
|-------|---------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------|
| | ϵ_{om} (m/m) T1 | ϵ_{AEMC} (m/m) | $\Delta\epsilon$ (%) | ϵ_{om} (m/m) T1 | ϵ_{AEMC} (m/m) | $\Delta\epsilon$ (%) | ϵ_{om} (m/m) T1 | ϵ_{AEMC} (m/m) | $\Delta\epsilon$ (%) |
| S01 | 0,000675 | 0,000510 | -24,44 | 0,000402 | 0,000636 | 58,21 | 0,000774 | 0,000684 | -11,63 |
| S02 | 0,000190 | 0,000647 | 240,53 | 0,000497 | 0,000805 | 61,97 | 0,000682 | 0,000867 | 27,19 |
| S04 | 0,000431 | 0,000580 | 34,57 | 0,000493 | 0,000725 | 47,16 | 0,000714 | 0,000782 | 9,47 |

4.7.3 Comparativo entre instrumentação e o método dos elementos finitos

Assim como no método das camadas finitas, as estimativas através do método dos elementos finitos também foram comparadas às medições de campo, excluindo-se as mesmas medições indicadas no item 4.7.2, sendo que neste caso a diferença percentual média foi de -13,09 % considerando o atrito na modelagem, estando abaixo do intervalo de 18% a 30% encontrado por Dong *et al.* 2012, e -66,02 % sem considerar o atrito sendo uma diferença inaceitável.

A Tabela 41 apresenta as diferenças percentuais entre a simulação com método dos elementos finitos (ϵ_{ANSYS}), considerando o atrito, e as medições de campo em T1 (ϵ_{om}). Neste caso, pode-se observar que as diferenças na maioria dos casos foram negativas, e, especificamente para a intensidade de carga de 10,47 t, foram bem pequenas. No caso do modelo em elementos finitos, essas diferenças são decorrentes principalmente do grau de discretização do modelo, das condições de contorno utilizadas e do uso de módulos de resiliência linearizados.

Tabela 41 - Comparativo de deformações específicas de tração medidas em campo e estimadas através do *software* ANSYS® com atrito ($T = T1 \cong 40\text{ }^{\circ}\text{C}$).

| Seção | 8,27 t | | | 10,47 t | | | 11,54 t | | |
|-------|--------------------------------|-----------------------------|-------------------------|--------------------------------|-----------------------------|-------------------------|--------------------------------|-----------------------------|-------------------------|
| | ϵ_{om} (m/m) T1 | ϵ_{ANSYS} (m/m) | $\Delta\epsilon$ (%) | ϵ_{om} (m/m) T1 | ϵ_{ANSYS} (m/m) | $\Delta\epsilon$ (%) | ϵ_{om} (m/m) T1 | ϵ_{ANSYS} (m/m) | $\Delta\epsilon$ (%) |
| S01 | 0,000675 | 0,000315 | -53,33 | 0,000402 | 0,000418 | 3,98 | 0,000774 | 0,000469 | -39,41 |
| S02 | 0,000190 | 0,000350 | 84,21 | 0,000497 | 0,000470 | -5,43 | 0,000682 | 0,000527 | -22,69 |
| S04 | 0,000431 | 0,000378 | -12,30 | 0,000493 | 0,000511 | 3,72 | 0,000714 | 0,000575 | -19,51 |

A Tabela 42 apresenta as diferenças percentuais entre a simulação com método dos elementos finitos (ϵ_{ANSYS}), desconsiderando o atrito, e as medições de campo em T1 (ϵ_{om}), apresentando novamente diferença negativa, porém bem maior. A desconsideração do atrito, como já falado anteriormente, minimiza a transferência de tensões entre as camadas e consequentemente as deformações. As diferenças apresentadas são tão grandes que invalidam a utilização dos resultados.

Tabela 42 - Comparativo de deformações específicas de tração medidas em campo e estimadas através do *software* ANSYS® sem atrito ($T = T1 \cong 40\text{ }^{\circ}\text{C}$).

| Seção | 8,27 t | | | 10,47 t | | | 11,54 t | | |
|-------|-----------------------------|-----------------------------|-------------------------|--------------------------------|-----------------------------|-------------------------|--------------------------------|-----------------------------|-------------------------|
| | ϵ_{om} (m/m) T1 | ϵ_{ANSYS} (m/m) | $\Delta\epsilon$ (%) | ϵ_{om} (m/m) T1 | ϵ_{ANSYS} (m/m) | $\Delta\epsilon$ (%) | ϵ_{om} (m/m) T1 | ϵ_{ANSYS} (m/m) | $\Delta\epsilon$ (%) |
| S01 | 0,000675 | 0,000148 | -78,07 | 0,000402 | 0,000181 | -54,98 | 0,000774 | 0,000196 | -74,68 |
| S02 | 0,000190 | 0,000157 | -17,37 | 0,000497 | 0,000193 | -61,17 | 0,000682 | 0,000209 | -69,34 |
| S04 | 0,000431 | 0,000146 | -66,13 | 0,000493 | 0,000181 | -63,26 | 0,000714 | 0,000196 | -72,56 |

O modelo em elementos finitos, diferentemente da modelagem com o método das camadas finitas, possibilita não só a retroanálise dos módulos de resiliência, mas também a calibração da malha de elementos finitos e das condições de contorno. Para ambos seriam necessárias não só as medições de deformação específica de tração na base do revestimento, mas também outras respostas mecânicas, preferencialmente as críticas de cada uma das camadas.

4.7.4 Comparativo entre o método das múltiplas camadas finitas e o método dos elementos finitos

Realizando comparativo entre as estimativas com os dois métodos numéricos utilizados, através dos *softwares* AEMC/SisPav e ANSYS®, foi verificado que a modelagem em elementos finitos forneceu valores significativamente inferiores ao método das camadas finitas,

principalmente desconsiderando o atrito entre a camada de revestimento e a base, onde a diferença foi de -74,04 %, enquanto, com a consideração do atrito -35,72%.

As Tabelas 43 e 44 apresentam o comparativo entre as estimativas com o AEMC/SisPav e com o ANSYS®, considerando ou não a aderência/atrito entre as camadas.

Tabela 43 - Comparativo de deformações específicas de tração estimadas através do AEMC/SisPav sem aderência e estimadas através do *software* do modelo do ANSYS® com atrito ($T = T1 \cong 40^\circ C$).

| Seção | 8,27 t | | | 10,47 t | | | 11,54 t | | |
|-------|----------------------------|-----------------------------|----------------------|----------------------------|-----------------------------|-------------------------|----------------------------|-----------------------------|-------------------------|
| | ϵ_{AEMC} (m/m) | ϵ_{ANSYS} (m/m) | $\Delta\epsilon$ (%) | ϵ_{AEMC} (m/m) | ϵ_{ANSYS} (m/m) | $\Delta\epsilon$ (%) | ϵ_{AEMC} (m/m) | ϵ_{ANSYS} (m/m) | $\Delta\epsilon$ (%) |
| S01 | 0,000510 | 0,000315 | -38,24 | 0,000636 | 0,000418 | -34,28 | 0,000684 | 0,000469 | -31,43 |
| S02 | 0,000647 | 0,000350 | -45,90 | 0,000805 | 0,000470 | -41,61 | 0,000867 | 0,000527 | -39,22 |
| S04 | 0,000580 | 0,000378 | -34,83 | 0,000725 | 0,000511 | -29,52 | 0,000782 | 0,000575 | -26,47 |

Tabela 44 - Comparativo de deformações específicas de tração estimadas através do AEMC/SisPav sem aderência e estimadas através do *software* ANSYS® sem atrito ($T = T1 \cong 40^\circ C$).

| Seção | 8,27 t | | | 10,47 t | | | 11,54 t | | |
|-------|----------------------------|-----------------------------|-------------------------|----------------------------|-----------------------------|-------------------------|----------------------------|-----------------------------|-------------------------|
| | ϵ_{AEMC} (m/m) | ϵ_{ANSYS} (m/m) | $\Delta\epsilon$ (%) | ϵ_{AEMC} (m/m) | ϵ_{ANSYS} (m/m) | $\Delta\epsilon$ (%) | ϵ_{AEMC} (m/m) | ϵ_{ANSYS} (m/m) | $\Delta\epsilon$ (%) |
| S01 | 0,000510 | 0,000148 | -70,98 | 0,000636 | 0,000181 | -71,54 | 0,000684 | 0,000196 | -71,35 |
| S02 | 0,000647 | 0,000157 | -75,73 | 0,000805 | 0,000193 | -76,02 | 0,000867 | 0,000209 | -75,89 |
| S04 | 0,000580 | 0,000146 | -74,83 | 0,000725 | 0,000181 | -75,03 | 0,000782 | 0,000196 | -74,94 |

Essas diferenças são consideradas grandes comparadas ao trabalho de Calderón e Muñoz (2015), por exemplo, que encontrou somente 3,0%. As diferenças poderiam diminuir utilizando módulo de resiliência não lineares no modelo em elementos finitos e ainda melhorando a discretização e as condições de contorno, porém ambos os modelos tiveram diferenças semelhantes, apesar de contrárias, em relação às medições de campo.

Observa-se no comparativo considerando o atrito no modelo em elementos finitos, que a diferença de deformação se torna menor com o acréscimo de carregamento e ainda que as diferenças são maiores na seção com maior coeficiente de Poisson (seção 02). Já no comparativo desconsiderando o atrito não se observa o mesmo comportamento em relação à mudança de carregamento, porém a mesma influência do coeficiente de Poisson.

4.7.5 Análise de vida de fadiga

Foi realizado o levantamento do erro na previsão de desempenho à fadiga das estimativas numéricas. As Tabelas 45 a 50 apresentam a vida de fadiga calculada através do modelo de fadiga apresentado na Equação 47 do subitem 3.13.3, com base nas medições de campo, nas estimativas com o AEMC/SisPav e nas estimativas com o ANSYS®, considerando o atrito e desconsiderando o atrito, para cada magnitude de carregamento nas seções 01, 02 e 04.

Tabela 45 - Análise de vida de fadiga para 8,27 t em campo e no ANSYS® considerando o atrito ($T = T1 \cong 40^{\circ} C$).

| Seção | ϵ_{om} (m/m) T1 | Nf (campo) | ϵ_{ANSYS} (m/m) | Nf (ANSYS) | Erro (ANSYS) |
|-------|--------------------------|-------------------|--------------------------|-------------------|--------------|
| S04 | 0,000431 | $1,68 \cdot 10^4$ | 0,000378 | $3,29 \cdot 10^4$ | 95,74% |

Tabela 46 – Análise de vida de fadiga para 8,27 t em campo, no AEMC/SisPav e no ANSYS® desconsiderando o atrito ($T = T1 \cong 40^{\circ} C$).

| Seção | ϵ_{om} (m/m) T1 | Nf (campo) | ϵ_{AEMC} (m/m) | Nf (AEMC) | Erro AEMC (%) | ϵ_{ANSYS} (m/m) | Nf (ANSYS) | Erro ANSYS (%) |
|-------|--------------------------|-------------------|-------------------------|-------------------|---------------|--------------------------|-------------------|----------------|
| S04 | 0,000431 | $1,68 \cdot 10^4$ | 0,000580 | $3,68 \cdot 10^3$ | -78,12 | 0,000146 | $4,28 \cdot 10^6$ | 25387,69 |

Tabela 47 - Análise de vida de fadiga para 10,47 t em campo e no ANSYS® considerando o atrito ($T = T1 \cong 40^{\circ} C$).

| Seção | ϵ_{om} (m/m) T1 | Nf (campo) | ϵ_{ANSYS} (m/m) | Nf (ANSYS) | Erro (ANSYS) |
|-------|--------------------------|-------------------|--------------------------|-------------------|--------------|
| S01 | 0,000402 | $2,40 \cdot 10^4$ | 0,000418 | $1,97 \cdot 10^4$ | -18,11% |
| S02 | 0,000497 | $8,10 \cdot 10^3$ | 0,000470 | $1,08 \cdot 10^4$ | 33,10% |
| S04 | 0,000493 | $8,48 \cdot 10^3$ | 0,000511 | $7,03 \cdot 10^3$ | -17,06% |

Tabela 48 - Análise de vida de fadiga para 10,47 t em campo, no AEMC/SisPav e no ANSYS® desconsiderando o atrito ($T = T1 \cong 40^{\circ} C$).

| Seção | ϵ_{om} (m/m) T1 | Nf (campo) | ϵ_{AEMC} (m/m) | Nf (AEMC) | Erro AEMC (%) | ϵ_{ANSYS} (m/m) | Nf (ANSYS) | Erro ANSYS (%) |
|-------|--------------------------|-------------------|-------------------------|-------------------|---------------|--------------------------|-------------------|----------------|
| S01 | 0,000402 | $2,40 \cdot 10^4$ | 0,000636 | $2,29 \cdot 10^3$ | -90,44 | 0,000181 | $1,43 \cdot 10^6$ | 5840,22 |
| S02 | 0,000497 | $8,10 \cdot 10^3$ | 0,000805 | $6,87 \cdot 10^2$ | -91,53 | 0,000193 | $1,03 \cdot 10^6$ | 12567,00 |
| S04 | 0,000493 | $8,48 \cdot 10^3$ | 0,000725 | $1,17 \cdot 10^3$ | -86,16 | 0,000181 | $1,43 \cdot 10^6$ | 16723,04 |

Tabela 49 - Análise de vida de fadiga para 11,54 t em campo e no ANSYS ® desconsiderando o atrito ($T = T1 \cong 40^{\circ} C$).

| Seção | ϵ_{om} (m/m) T1 | Nf (campo) | ϵ_{ANSYS} (m/m) | Nf (ANSYS) | Erro (ANSYS) |
|-------|-----------------------------|-------------------|-----------------------------|-------------------|-----------------|
| S01 | 0,000774 | $8,39 \cdot 10^2$ | 0,000469 | $1,09 \cdot 10^4$ | 1199,04% |
| S02 | 0,000682 | $1,61 \cdot 10^3$ | 0,000527 | $6,00 \cdot 10^3$ | 273,29% |
| S04 | 0,000714 | $1,27 \cdot 10^3$ | 0,000575 | $3,84 \cdot 10^3$ | 203,62% |

Tabela 50 - Análise de vida de fadiga para 11,54 t em campo, no AEMC/SisPav e no ANSYS ® desconsiderando o atrito ($T = T1 \cong 40^{\circ} C$).

| Seção | ϵ_{om} (m/m) T1 | Nf (campo) | ϵ_{AEMC} (m/m) | Nf (AEMC) | Erro AEMC (%) | ϵ_{ANSYS} (m/m) | Nf (ANSYS) | Erro ANSYS (%) |
|-------|-----------------------------|-------------------|----------------------------|-------------------|---------------------|-----------------------------|-------------------|----------------------|
| S01 | 0,000774 | $8,39 \cdot 10^2$ | 0,000684 | $1,58 \cdot 10^3$ | 88,27 | 0,000196 | $9,49 \cdot 10^5$ | 112907,22 |
| S02 | 0,000682 | $1,61 \cdot 10^3$ | 0,000867 | $4,70 \cdot 10^2$ | -70,80 | 0,000209 | $6,83 \cdot 10^5$ | 42358,86 |
| S04 | 0,000714 | $1,27 \cdot 10^3$ | 0,000782 | $7,96 \cdot 10^2$ | -37,08 | 0,000196 | $9,49 \cdot 10^5$ | 74851,01 |

Observa-se nas Tabelas 45 a 50 que os erros das estimativas numéricas através do método das camadas finitas foram altos em relação às medições de campo, em média, considerando os erros em módulo (77,49%) e que os erros foram menores com o acréscimo de carregamento. Já no comparativo das estimativas do modelo em elementos finitos em relação aos valores de campo, os erros das estimativas chegaram a ser ainda maiores, em média, considerando os erros em módulo (262,85% e 41519,29%, com e sem o atrito, respectivamente), o que aponta para um dano gravíssimo no uso do modelo.

Conforme analisado, o método das camadas finitas mostrou-se mais confiável do que o modelo em elementos finitos desenvolvido, sendo que o primeiro estimou vida de fadiga mais próxima às das medições de campo e tendência ao superdimensionamento do revestimento, o que é preferível ao subdimensionamento. Já o método dos elementos finitos apresentou previsões de vida de fadiga muito mais discrepantes às das medições de campo, apesar de estarem na mesma ordem de grandeza, e tendência ao subdimensionamento que leva à degradação precoce do revestimento asfáltico.

5 CONCLUSÕES

A instalação dos sensores *H-Gages* após a construção da pista experimental se apresentou, por um lado, de fácil execução, pois permitiu o trabalho em baixas temperaturas, evita os danos causados pela compactação com rolo e facilitou a logística da instalação. Por outro lado, representou um problema, devido à necessidade de remover o revestimento existente e reconstituir um novo. A solução dada foi utilizar um material com características mecânicas diferentes do revestimento original e um método de compactação menos eficaz, ocasionando descontinuidade na camada e baixa rigidez do revestimento de reconstituição.

Todos os levantamentos de deformação específica de tração nas fibras inferiores do revestimento, medida através do sensor *H-Gage*, passaram por tratamento estatístico e nenhum deles foi rejeitado, calculando-se a deformação média para cada um deles. As deformações médias foram consideradas grandes, o que é devido à baixa rigidez do revestimento de recomposição. Esses levantamentos passaram por análise fatorial para verificar a influência do nível de temperatura e de magnitude de carregamento nas deformações, onde o nível de temperatura se mostrou mais influente do que o carregamento o que é decorrente da alta sensibilidade térmica do revestimento de recomposição utilizado.

Em complemento à análise fatorial, foi realizada análise da variação percentual das deformações com acréscimo de temperatura ou de magnitude de carregamento, onde também foi verificada a grande influência da temperatura, principalmente nos menores carregamentos. Analisando o aumento de deformação com o aumento da temperatura, somente a seção 03 apresentou comportamento contrário em um dos carregamentos, diminuindo a deformação com o acréscimo de temperatura. Já analisando o aumento de deformação com o acréscimo de carregamento, em uma temperatura de referência de 40° C, todos o levantamento da seção 03 se mostraram incoerentes e ainda um levantamento da seção 01 e um da seção 02. Presume-se que as falhas nas medições são ocasionadas por efeitos eletromagnéticos, falha na ancoragem do sensor ou falha na execução das medições.

As medições que se mostraram incoerentes, no total 5 (cinco), foram excluídas das análises posteriores, sendo que as restantes, validadas, apresentaram resultados de deformação dentro do esperado para o material de revestimento utilizado e o seu grau de compactação. Isso confirma a instrumentação como um bom método para medição direta de deformações mediante análise criteriosa dos levantamentos.

Para posterior modelagem numérica, os revestimentos de recomposição do pavimento e original da pista experimental passaram por caracterização mecânica, onde foram obtidos através de ensaios de laboratório a resistência à tração indireta, a densidade aparente, o módulo dinâmico e o coeficiente de Poisson. Não só o módulo dinâmico, mas todos os parâmetros mecânicos apontaram para uma baixa rigidez dos revestimentos recompostos, onde a resistência à tração ficou abaixo do indicado por norma, assim como a densidade aparente.

As modelagens numéricas foram realizadas tomando como temperatura de referência 40° C. Portanto, os módulos dinâmicos foram calculados através das curvas mestras para essa temperatura, curvas estas obtidas através de ensaio de ressonância, assim como o coeficiente de Poisson. A seção 03, que apresentou inconsistências nas medições de campo, também apresentou nas curvas mestras obtidas, não sendo possível obter o módulo dinâmico do revestimento da seção.

A análise numérica com o método das camadas finitas, utilizando o AEMC/SisPav, apresentou estimativas de deformação maiores que as medições de campo (cerca de 32,42 %), estando acima do esperado com base na bibliografia consultada. Foi observado o coeficiente de Poisson do revestimento como um fator de muita influência nas estimativas de deformação, inclusive mais influente do que os módulos dinâmicos, provavelmente devido à baixa rigidez do revestimento de recomposição, sendo as maiores estimativas de deformação nas seções de maiores coeficientes de Poisson.

A modelagem em elementos finitos realizada no ANSYS ® apresentou resultados de deformação inferiores às medições de campo, onde o modelo que considerou atrito entre a camada de revestimento e a base apresentou deformações em média 13,09 % menores e desconsiderando o atrito em média 66,02 % menores, que é uma diferença inaceitável, tornando o modelo sem atrito inviável de ser utilizado para as condições aqui analisadas. Já era esperado que a desconsideração do atrito provocasse esse decréscimo nas estimativas das deformações, até porque as tensões no contato das camadas diminuem.

Analizando a influência das propriedades mecânicas nas estimativas do modelo em elementos finitos, foi observado que as estimativas de deformações considerando o atrito são inversamente proporcionais ao módulo dinâmico, o que era esperado. Já sem considerar o atrito essa influência reduz, sendo as estimativas mais influenciadas e proporcionais ao coeficiente de Poisson, o que, juntamente com o que foi concluído na modelagem em camadas finitas,

reforça a grande importância desse parâmetro nas modelagens numéricas, principalmente com revestimentos asfálticos de baixa rigidez.

Avaliando as previsões de fadiga das estimativas numéricas e comparando-as às calculadas através das medições diretas de deformação, foram verificados erros significantes em ambas as modelagens numéricas. O método das camadas finitas apresentou uma melhor eficiência, apresentando erro no cálculo da vida de fadiga de 77,49% e tendência ao superdimensionamento do revestimento o que é preferível ao subdimensionamento.

Já no modelo em elementos finitos, os resultados de previsão de vida de fadiga foram piores, apresentando erros de 262,85% e 41519,29%, com atrito e sem atrito, respectivamente. Com ou sem atrito, as previsões baseadas na modelagem em elementos finitos indicaram uma grande tendência ao subdimensionamento do revestimento, o que pode acarretar em degradação prematura e falhas de manutenção.

Neste trabalho, utilizando-se como referência de exatidão a instrumentação, o método das camadas finitas mostrou-se mais exato, porém, o pior desempenho da modelagem em elementos finitos não traz a conclusão que este é o método menos adequado e nem que deve ser evitado. O método dos elementos finitos tem várias formas de ser trabalhado, com diferentes condições de contorno, modelos de materiais, formas de aplicação do carregamento e, ainda, vários tipos de *softwares* que podem ser utilizados, aumentando o nível de detalhamento do modelo e consequentemente a sua exatidão.

Por fim, vale destacar o caráter experimental deste trabalho, que apesar de ter os métodos de trabalho desenvolvidos tomando outros trabalhos como referência, teve as suas próprias peculiaridades e serve aqui como uma futura referência na análise de deformações específicas de tração na fibra inferior de revestimento asfáltico através de instrumentação e métodos numéricos.

6 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Baseado nos resultados e dificuldades encontradas na execução do trabalho, são apresentadas sugestões para futuros trabalhos dentro da temática aqui estudada:

- Estudar os efeitos da instalação da instrumentação durante a fase executiva do pavimento, o que iria fornecer continuidade ao pavimento e possibilidade de realizar retroanálise de bacias deflectométricas;
- Realizar comparativo entre os resultados dos sensores *H-Gages* utilizados e os resultados de *H-Gages* pré-fabricados propriamente para uso em pavimentos;
- Estudar as deformações medidas através de instrumentação com o uso de trem de carga, o que possibilita maior precisão no posicionamento e na velocidade da passagem do carregamento;
- Realizar comparativo entre os resultados do AEMC/SisPav e outros *softwares* baseados no método das camadas finitas;
- Realizar retronálise dos módulos de resiliência das camadas do pavimento combinando levantamentos de bacias deflectométricas e resultados de instrumentação;
- Realizar comparativo entre os resultados do ANSYS ® e outros *softwares* baseados no método dos elementos finitos;
- Estudar o uso de elementos infinitos em conjunto com elementos finitos, principalmente para simular as condições de contorno do pavimento;
- Estudar o uso de carga dinâmica na análise com o método dos elementos finitos, fornecendo condições de carregamento mais semelhantes às de campo;
- Estudar o uso de modelos de ruptura e degradação do pavimento na modelagem em elementos finitos, o que possibilita a simulação em condições de degradação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABU-FARSAKH, M.; GU, J.; VOYIADJIS G.; CHEN, Q. Mechanical-empirical analysis of the results of finite element analysis on flexible pavement with geogrid base reinforcement. **Internacional Journal of Pavement Engineering**, v. 15, n. 9, p 786-798, 2014. DOI: 10.1080/10298436.2014.893315.

AMARAL, S.D.C.. **Estudos de misturas asfálticas densas com agregados do estado do Pará, utilizando asfalto convencional (CAP-40) e asfalto modificado com polímero SBS (BETUFLEX B 65/60)**. 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil - Transportes) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia de São Carlos - USP, São Carlos-SP.

ANSYS. **ANSYS help tutorials: Mechanical APDL**. 2016.

ASTM E1876-09. **Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration**. West Conshohocken - PA: ASTM International, 2015.

BALBO, J. T. **Pavimentação Asfáltica: materiais, projeto e restauração**. Oficina de Textos, 2007. 588 p.

BERNUCCI, L.B; MOTTA, L.M.G da; CERATTI, J.A.P; SOARES, J.B. **Pavimentação asfáltica: Formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: PETROBRAS, ABEDA, 2006.

BESKOU, N. D.; TSINOPOULOS, S. V.; THEODORAKOPOULOS, D. D. Dynamic elastic analysis of 3-D flexible pavements under moving vehicles: A unified FEM treatment. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, v. 82, p. 63-72, 2016. DOI: 10.1016/j.soildyn.2015.11.013.

BURMISTER, D. M. The general theory of stresses and displacements in layered systems I. **Journal of applied physics**, v. 16, n. 2, p 89-94, 1945a. DOI: 10.1063/1.1707558.

BURMISTER, D. M. The general theory of stresses and displacements in layered soil systems II. **Journal of applied physics**, v. 16, n. 3, p 126-127, 1945b. DOI: 10.1063/1.1707562.

BURMISTER, D. M. The general theory of stresses and displacements in layered soil systems III. **Journal of applied physics**, v. 16, n. 5, p 296-302, 1945c. DOI: 10.1063/1.1707590.

CAI, W.; MCDOWELL, G.; AIREY, G. Discrete element modelling of uniaxial constant strain rate tests on asphalt mixtures. **Granular Matter**, Vol.15, pp.163-174, 2013. DOI: 10.1007/s10035-013-0396-x.

CALDERÓN, W. R.; MUÑOS, M. R. P. Three-dimensional modeling of pavement with dual load using finite element. **Dyna**, v. 82, n. 189, p. 30-38, 2015. DOI: 10.15446/dyna.v82n189.41872.

CAVALCANTI, L. S.; de FARIA, V. C.; ODA, S.; BARELLA, R. M. Determinação da resistência à fadiga de misturas asfálticas com diferentes tipos de ligantes asfálticos e agregados. In: 8º Congresso Brasileiro de Rodovias e Concessões, 2013, Santos. **Anais...** Santos: 8º Congresso Brasileiro de Rodovias e Concessões, 2013.

CHEN, D. H.; ZAMAN, M.; LAGUROS, J.; SOLTANI, A. Assessment of computer programs for analysis of flexible computer structure. **Transportation Research Record**, n. 1482, p. 123-133, 1995.

CONSELHO NACIONAL DE TRÂNSITO – CONTRAN. **Resolução nº 12, de 06 de fevereiro de 1998**. Brasília: 1998.

CONSELHO NACIONAL DE TRÂNSITO – CONTRAN. **Resolução nº 526, de 20 de abril de 2015**. Brasília: 2015.

COSTA, G. M. Método de ressonância por impacto: **Obtenção de curvas mestras de módulo dinâmico e ângulo de fase em misturas asfálticas brasileiras**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão/SE, Brasil.

COUTINHO, R. P.; PARENTE JUNIOR, E.; HOLANDA, Á. S. D.; CAVALCANTE, R. N. D. A.; BOTELHO, R. P. Desenvolvimento de um sistema gráfico para análise numérica de pavimentos asfálticos. In: Simpósio Internacional de Avaliação de Pavimentos e Projetos de Reforço, 4, 2009, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: Simpósio Internacional de Avaliação de Pavimentos e Projetos de Reforço, 2009, p. 1-12.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT . **Quadro de fabricantes de veículos 2012**. Diretoria de infraestrutura rodoviária. Coordenação geral de operações rodoviárias. Rio de Janeiro: 2012.

DEPARTAMENTO NACIONAL INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **Identificação de sistemas de pesagem em movimento: Projeto de instrumentação para medição de deformação do pavimento**. 2008.

DEUSEN, D.A.V; NEWCOMB, D.E; LABUZ, J.F. **A Review of Instrumentation Technology for the Minnesota Road Research Project**. Research Administration and Development Section Office of Materials and Research Minnesota Department of Transportation. Minnesota: 1992. 140 p.

DNER.ME 024/94. **Determinação das deflexões pela Viga Benkelman - Pavimento**. Rio de Janeiro – RJ: DNER/DrDTc (IPR), 1994.

DNIT. 031/2006 – ES. **Pavimentos flexíveis - concreto asfáltico – especificação de serviço**. Rio de Janeiro – RJ: Diretoria de Planejamento e Pesquisa/DNIT, 2006.

DNIT.135/2010 - ME. Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas – **Determinação do Módulo de Resiliência – Método de ensaio**. Rio de Janeiro: IPR, 2010.

DNIT.136/2010 - ME. Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas –**Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio**. Rio de Janeiro: IPR, 2010.

DONG, Z.; TAN, Y.; LI, S.; CAO, L. Rutting Mechanism Analysis of Heavy-duty Asphalt Pavement Based on Pavement Survey, Finite Element Simulation, and Instrumentation. **Journal of Testing and Evaluation**, v. 40, n. 7, p. 1-10, 2012. DOI: 10.1520/JTE20120162.

ELSEIFI, M. A.; MOHAMMAD, M. A.; ZHANG, Z. J. Assessment of stress and strain instrumentation in accelerated-pavement testing. **International Journal of Pavement Research and Technology**, v. 5, n. 2, p. 121-127, 2012. DOI: 10.6135/ijprt.org.tw/2012.5(2).121.

FALCÃO, M. F. B.; SOARES, J. B. Considerações sobre o ensaio de compressão diametral no estudo de materiais de pavimentação. In: Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, 16, 2002, Natal. **Anais...** Natal: ANPET, 2002, p. 169-181.

FONSECA, J.; SELK, C. A. C.; PEREIRA, L. T. V.; MARCZAK, R. J.; ALVEZ, D. B.; LUERSEN, M. A. **Ferramentas de simulação em Mecânica: elementos finitos**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2002. 88 p.

FONTES, L. P.; TRINCHÊS, G.; PEREIRA, P. A.; PAIS, J. C. Consideração da propagação de trincas em camadas de reforço com misturas com asfalto-borracha. In: SINAPPRE–Simpósio Internacional de Avaliação de Pavimentos e Projetos de Reforço, 4, 2009, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: SINAPPRE, 2009.

FRANÇA, F. A. **Instrumentação e Medidas: grandezas mecânicas**. Campinas: UNICAMP, 2007.

FRANCO, F. A. C. P. **Método de dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos asfálticos – SISPAV**. 2007. Tese (Doutorado em ciência em Engenharia Civil) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

FREITAS, M. R. A. **Avaliação numérica do comportamento de reforços de pavimentos à reflexão de fendas**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Construção) – Escola Superior de Tecnologia e Gestão, Instituto Politécnico de Bragança, Bragança, Portugal.

GARCIA, G.; THOMPSON, M. R. Strain and Pulse Duration Considerations for Extended-Life Hot-Mix Asphalt Pavement Design. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, No. 2087, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., p 3–11, 2008. DOI: 10.3141/2087-01

GONÇALVES, F. P. **Estudo do Desempenho de Pavimentos Flexíveis a Partir de Instrumentação e Ensaio Acelerados**. 2002. Tese (Doutorado em Geotecnia) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre-RS.

GRAÇA, D.C.S.; CAVALCANTE, E.H; CARDOSO, G. Comportamento mecânico de misturas asfálticas de ligante modificado com borra oleosa de petróleo. **Revista Educação Agrícola Superior**: v.29, n.2, p. 127-130, 2014.

GRECO, R.; MARANO, G.C.. Identification of parameters of Maxwell and Kelvin–Voigt generalized models for fluid viscous dampers. **Journal of Vibration and Control**, v. 21, n. 2, p. 260-274, 2015. DOI: 10.1177/1077546313487937.

HBM. **Operating Manual - PC Measurement electronic Spider 8, Spider 8-30, Spider 8-01**. 2003.

HOLANDA, A. S.; PARENTE JR, E.; ARAÚJO, T. D. P.; MELO, L. T. B.; EVANGELISTA JR, F.; SOARES, J. B. Finite Element Modeling of Flexible Pavements. In: Iberian Latin-

American Congress on Computational Methods in Engineering (CILAMCE), 27, 2006, Belém. **Anais...** Belém: CILAMCE, 2006.

HUANG, Y.H. **Pavement analysis and design**. USA: Pearson Prentice Hall, 2004.

IOANNIDES, A.; M., KHAZANOVICH, L. General formulation for multilayered pavement systems. **Journal of transportation engineering**, v. 124, n. 1, p. 82-90, 1998. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-947X(1998)124:1(82).

KATICA, S.; APEAGYEI, A.; FLINTSCH, G.; LOULIZI, A. Universal linear viscoelastic approximation property of fractional viscoelastic models with application to asphalt concrete. **Mechanics of Time-Dependent Materials**, v.18, n. 3, p. 555-571, 2014. DOI: 10.1007/s11043-014-9241-9.

KYOWA – KYOWA ELETRONIC INSTRUMENTS CO. LTD. **Strain Gages**. 2011.

LEE, H. S.; KIM, J. Backcalculation of dynamic modulus from resilient modulus test data. **Canadian Journal of Civil Engineering**, v. 38, n. 5, p. 582-592, 2011. DOI: 10.1139/111-026.

LOUREIRO, T. G.; SOARES, J. B.; MOTTA, L. M. G. da. Estudo da vida de fadiga de misturas asfálticas com fresado pelo critério da deformação de tração crítica. **Disponível em <www.researchgate.net>**. Acesso em 15 de maio de 2016.

LTT-UFS. Relatório de Ensaios. **Caracterização de Solos para Reforço de Subleito e Base para a Obra de Pavimentação da Área de Laboratórios da UFS**. Relatório Técnico. Laboratório de Topografia e Transportes, Brasil, Sergipe, 2013.

MAADANI, O.; ABD EL HALIM, A. O.; MOSTAFA, N. Instrumentation for monitoring pavement performance in cold regions. **Journal of Cold Regions Engineering**, v. 29, n. 4, 2014. DOI:10.1061/(ASCE)CR.1943-5495.0000087.

MADENCI, Erdogan; GUVEN, Ibrahim. **The finite element method and applications in engineering using ANSYS®**. Springer, 2006.

MATOS, L.J. de S. **Análise de Tensões Verticais em Estrutura de Pavimento Semirrígido Instrumentado Sob Carregamento Variado**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão.

MERCEDES-BENZ. **Especificações modelo L-1318**. 2006.

MINER, M. A. Cumulative damage in fatigue. **Journal of applied mechanics**, v. 12, n. 3, p. 159-164, 1945.

MINHOTO, M.J.C. **Consideração da Temperatura no Comportamento à Reflexão de Fendas dos Reforços de Pavimentos Rodoviários Flexíveis**. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade do Minho, Guimarães, Portugal.

MOAVENI, S. **Finite element analysis: theory and application with ANSYS**. Pearson Education India, 2003.

NAGAKUMAR, M.S; NIDHI, M. Applications of Layered Theory for the Analysis of Flexible Pavements. **IJRET: International Journal of Research in Engineering and Technology**, 2013.

NAKASONE, Y.; YOSHIMOTO, S.; STOLARSKI, T. A. **Engineering analysis with ANSYS software**. Elsevier Butterworth-Heinemann, 2006.

NCHRP/TRB. **Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures, Appendix RR: Finite Element Procedures for Flexible Pavement Analysis**. Illinois, USA, 2004.

NÚÑEZ, W. P.; CERATTI, J. A. P.; PINTO, P. R. R. Afinal porque pavimentos novos estão rompendo precocemente? Um estudo sobre causas de degradações prematuras na superfície de pavimentos asfálticos. In: CBRC e BRASVIAS, 2011, Iguazu. **Anais...** Iguazu: CBRC e BRASVIAS, 2011.

OMEGA. **Thermocouple introduction and theory**. 2004.

PONTE, R.S.; BRANCO, V. T. F. C.; de HOLANDA, Á. S.; SOARES, J. B. Avaliação de diferentes metodologias para obtenção do módulo de resiliência de misturas asfálticas. **Revista Transportes**, v. 22, n. 2, p. 85-94, 2014. DOI: 10.14295/transportes.v22i2.792.

QIU, J.; VAN DE VEN, M.F.C.; WU, S.P.; YU, J.Y.; MOLENAAR, A.A.A. Investigating self healing behaviour of pure bitumen using Dynamic Shear Rheometer. **Fuel**, v. 90, p. 2710-2720, 2011. DOI: 10.1016/j.fuel.2011.03.016.

QUINTANA, H.A.R; LIZCANO, F.A.R. Evaluation of mechanical parameters of an asphalt mixture under the environmental conditions of Bogotá D.C. **Revista Ingeniería de Construcción**, v. 27, p. 57-74, 2012. DOI: 10.4067/S0718-50732012000100004.

SADD, M. H. **Elasticity: Theory, Applications, and Numerics**. Burlington, MA: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005.

SAEVARSDOTTIR, T.; ERLINGSSON, S. Deformation Modelling of Instrumented Flexible Pavement Structure. **Procedia Engineering**, v. 143, p. 937-944, 2016. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.06.076.

SAID, S.F; HAKIM, H; CARLSSON, H; WIMAN, L.G. Fatigue Life Evaluation of Flexible Pavement. **International Journal of Pavement Research and Technology**, v.4, p.80, 2011. DOI: 10.6135/ijprt.org.tw/2011.4(2).80.

SANRAL – SOUTH AFRICAN NATIONAL ROADS AGENCY SOC LTD. **South African pavement engineering manual**. Republic of South Africa, 2014.

SARAVANAN, U. On the use of linear viscoelastic constitutive relations to model asphalt. **International Journal of Pavement Engineering**, v. 13, p. 360-373, 2012. DOI: 10.1080/10298436.2011.599386.

SEO, J.; KIM, Y.; CHO, J.; JEONG, S. Estimation of in situ dynamic modulus by using MEDPDG dynamic modulus and FWD data at different temperatures. **International Journal**

of **Pavement Engineering**, v. 14, n. 4, p. 343-353, 2013. DOI: 10.1080/10298436.2012.664274.

SHAQLAIH, A.; WHITE, L.; ZAMAN, M. Resilient modulus modeling with information theory approach. **International Journal of Geomechanics**, v. 13, n. 4, p. 384-389, 2012. DOI: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000221.

SILVA, J. G. S. da; SOEIRO, F. J. D. C. P.; VELLASCO, P. C. da S.; GUIMARÃES, L. P.; VELOZO, L. T. Uma Experiência Acadêmica nos Cursos de Graduação da Faculdade de Engenharia da UERJ a Partir da Utilização do Programa Ansys. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENSINO DE ENGENHARIA, COBENGE, 24, 2001, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: COBENGE, 2001, p. 96-105.

SILVA, S. A. T.; VIDAL, P. J. F.; HOLANDA, Á. S.; PARENTE JUNIOR, E. Análise viscoelástica de pavimentos asfálticos utilizando elementos finitos e infinitos. **TRANSPORTES**, v. 21, n. 3, p. 5-13, 2013. DOI: 10.4237/transportes.v21i3.676.

SOUZA, F. V.; SOARES, J. B. Considerações sobre módulo resiliente e módulo dinâmico em misturas asfálticas com base na teoria da viscoelasticidade. In: Congresso Ibero-Latinoamericano do Asfalto, 12, Quito, Equador. **Anais...** Quito: CILA, 2003b.

SOUZA, F. V.; SOARES, J.B. Efeito da consideração do comportamento viscoelástico linear do revestimento no cálculo de tensões e deslocamentos em pavimentos asfálticos. In: Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET, 17, 2003, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: ANPET, 2003a.

TANG, X; STOFFELS, S.M; PALOMINO, A.M. Evaluation of Pavement Layer Moduli using Instrumentation Measurements. **International Journal of Pavement Research and Technology**, v.6, p.755, 2013. DOI: 10.6135/ijprt.org.tw/2013.6(6).755.

TEIXEIRA, V. F.; SOUSA, F. V. de; SOARES, J. B. Modelagem da vida de fadiga e do acúmulo de deformações permanentes em pavimentos asfálticos por meio de um modelo de dano contínuo. **Transportes**, v. 15, n. 2, 2007. DOI: 10.14295/transportes.v15i2.32.

Termômetro digital com termopar tipo K.jpg. Fotografia, color. Disponível em: <produto.mercadolivre.com.br/MLB-729396901-termmetro-digital-sensor-tipo-termopar-tipo-k-50-a-1300c-_JM>. Acesso em: 19 set. 2016.

TIMOSHENKO, S.P.; GOODIER, J. N. **Theory of elasticity**. New York: McGraw-Hill, 2006.

TORRÃO, H. C. **Reabilitação de pavimentos rodoviários flexíveis**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Construção) – Escola Superior de Tecnologia e Gestão. Instituto Politécnico de Bragança, Bragança, Portugal.

ÚNICO ASFALTOS. Dados técnicos CBUQ com aditivo tipo único (FÁCIL-PRO). Disponível em < <http://www.unicoasfaltos.com.br/dados-tecnicos.pdf>>. Acesso em 15 de novembro de 2016.

XIA, R. X.; LI, J. H.; HE, J.; SHI, D. F. Effect Analysis of Vehicle System Parameters on Dynamic Response of Pavement. **Mathematical Problems in Engineering**, v. 2015, 2015. DOI: 10.1155/2015/561478.

YIN, H. An analytical procedure for strain response prediction of flexible pavement. **International Journal of Pavement Engineering**, v. 14, n. 5, p. 486-497, 2013. DOI: 10.1080/10298436.2012.736619.

ZHAO, Y.; TANG, J.; LIU, H. Construction of triaxial dynamic modulus master curve for asphalt mixtures. **Construction and Building Materials**, v. 37, p. 21-26, 2012. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.01a6.067.

APÊNDICE A – Pulsos de variação de tensões elétricas nas medições de deformações específicas de tração em campo

As Figuras 86 a 157 apresentam os pulsos de variação de tensões elétricas nas medições de deformação específica de tração em campo para cada seção, carregamento e faixa de temperatura.

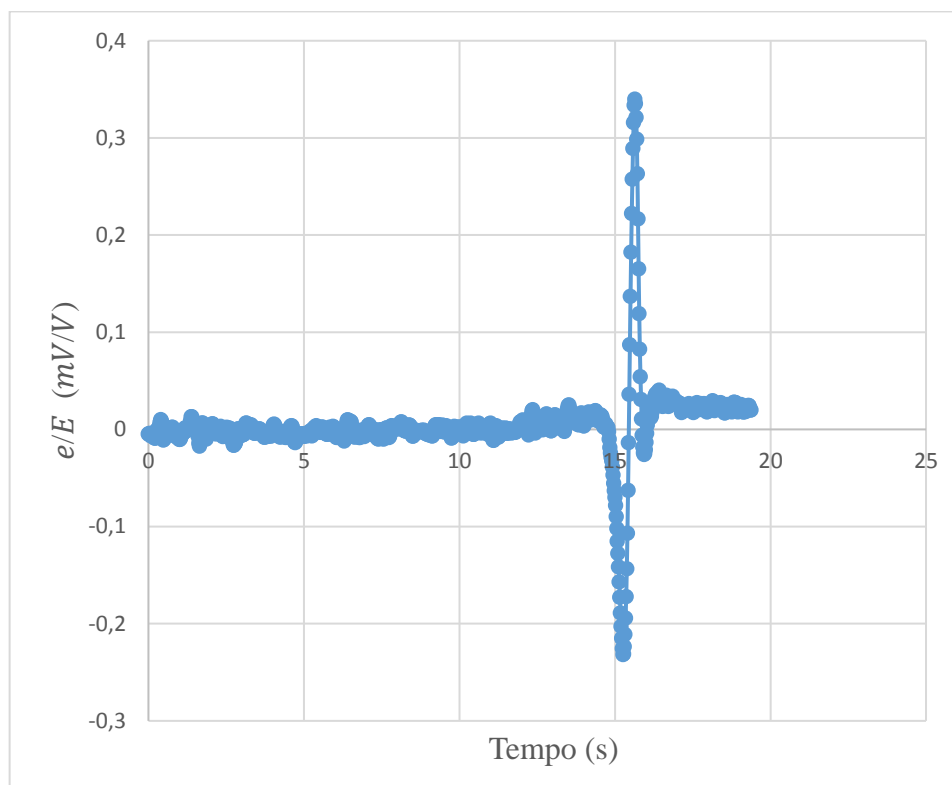


Figura 86 – Pulso de variação de tensão elétrica S01 T01 01 (8,27t).

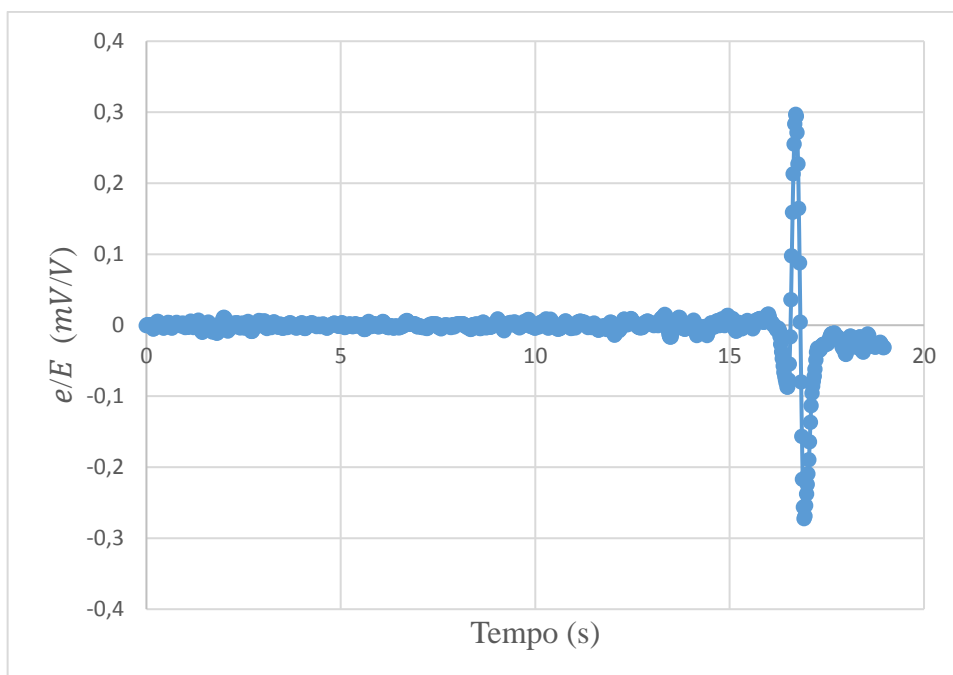


Figura 87 – Pulso de variação de tensão elétrica S01 T01 02 (8,27t).

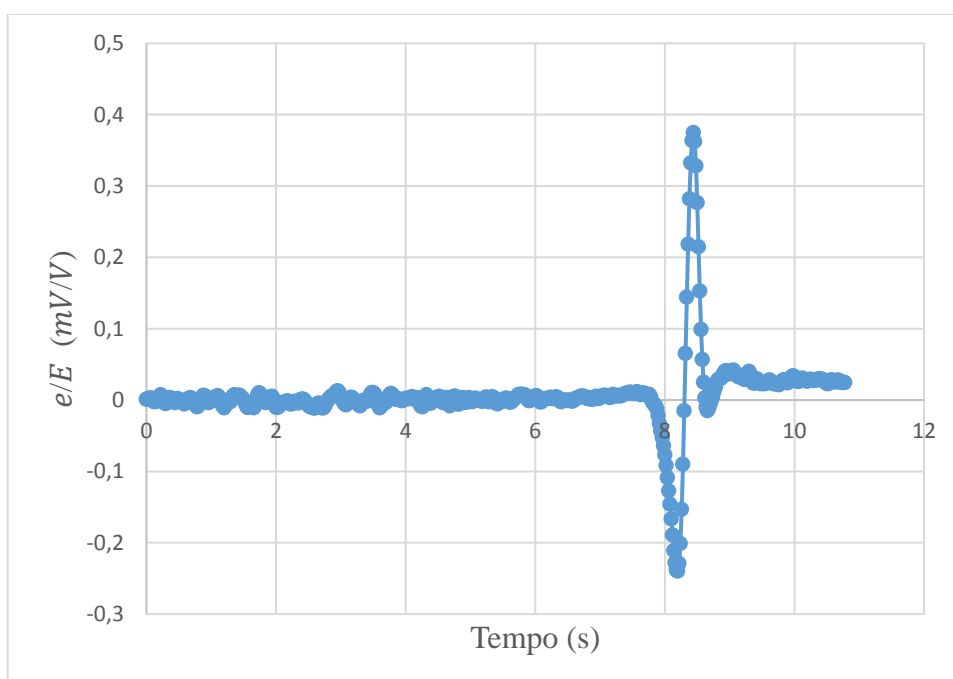


Figura 88 – Pulso de variação de tensão elétrica S01 T01 03 (8,27t).

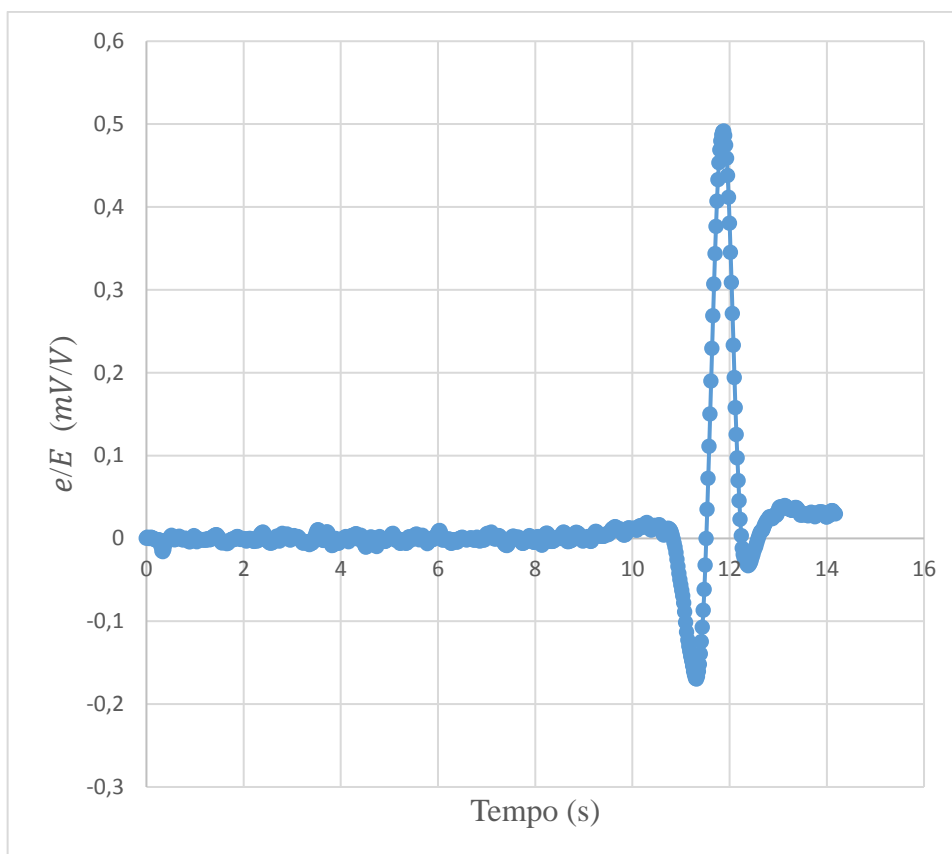


Figura 89 – Pulso de variação de tensão elétrica S01 T02 01 (8,27t).

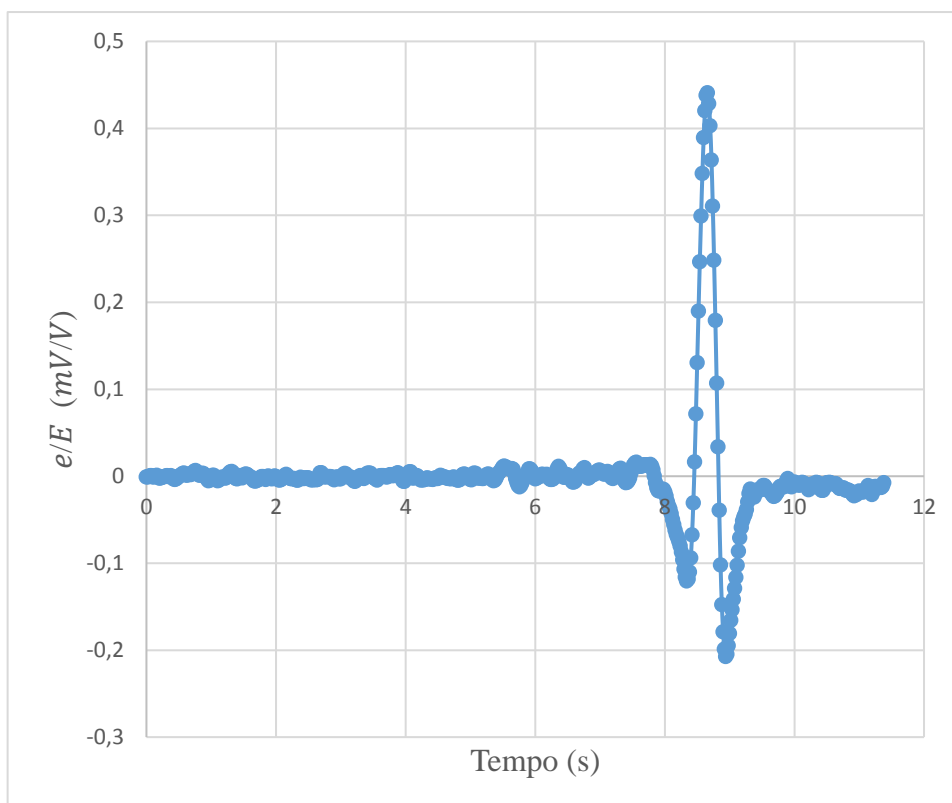


Figura 90 – Pulso de variação de tensão elétrica S01 T02 02 (8,27t).

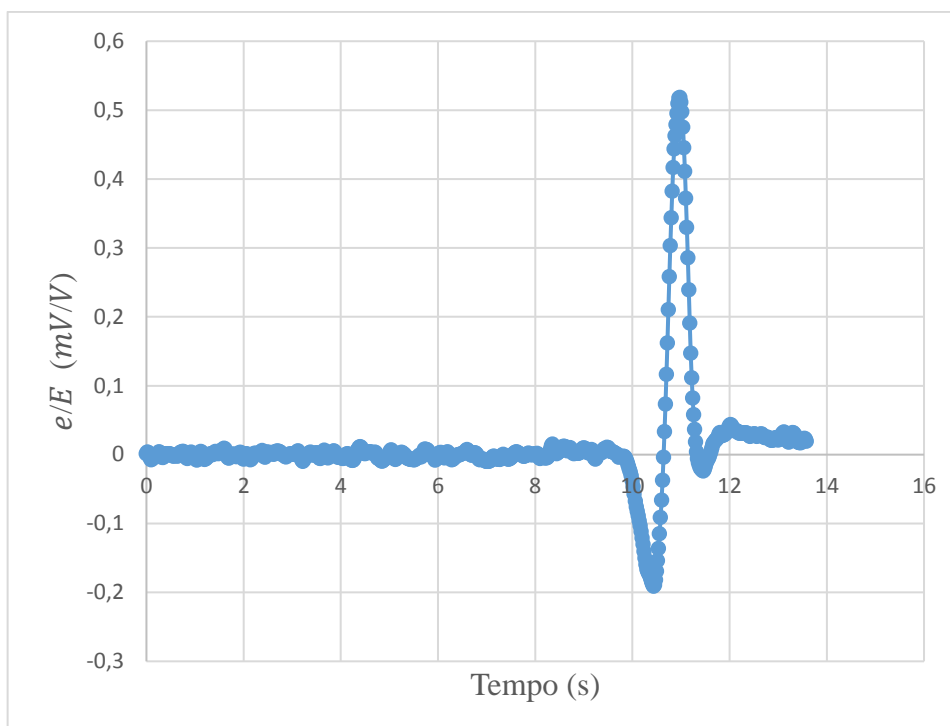


Figura 91 – Pulso de variação de tensão elétrica S01 T02 03 (8,27t).

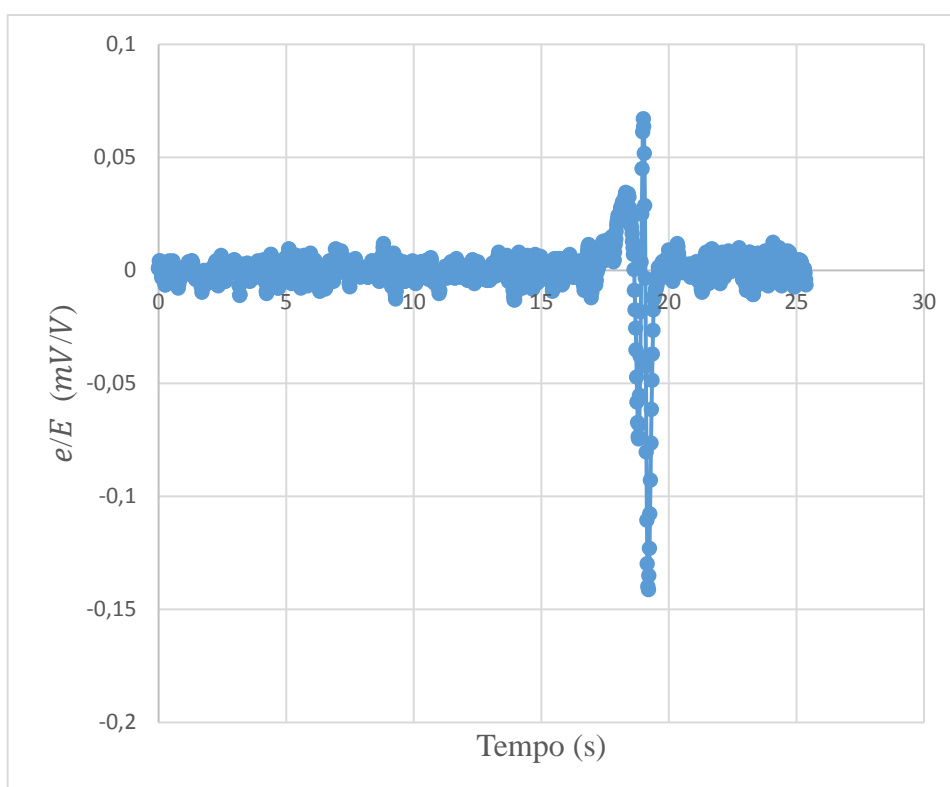


Figura 92 – Pulso de variação de tensão elétrica S02 T01 01 (8,27t).

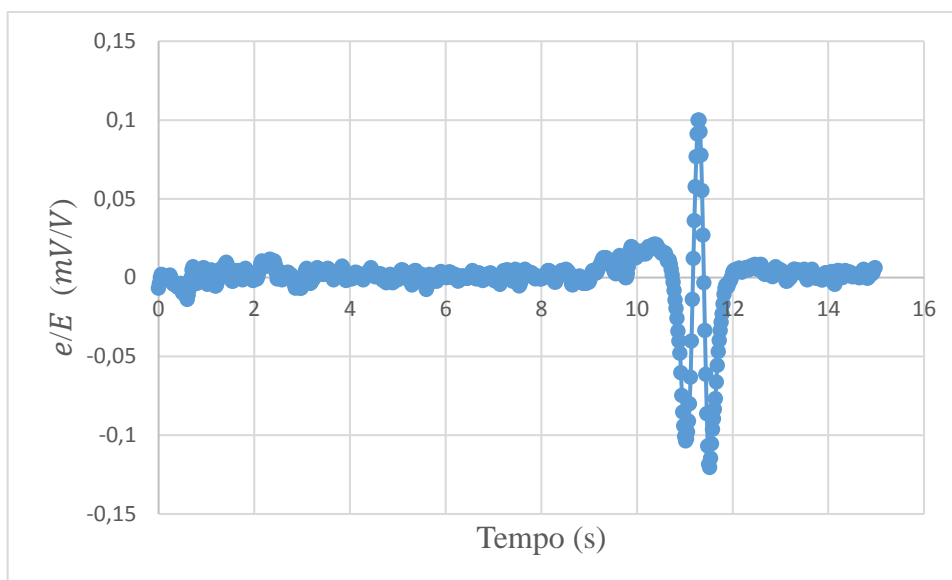


Figura 93 – Pulso de variação de tensão elétrica S02 T01 02.

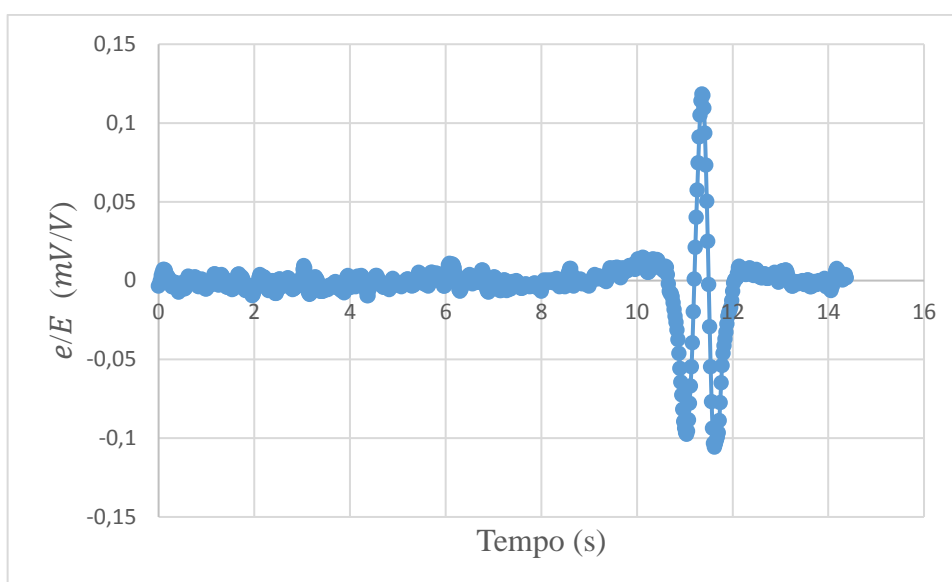


Figura 94 – Pulso de variação de tensão elétrica S02 T01 03 (8,27t).

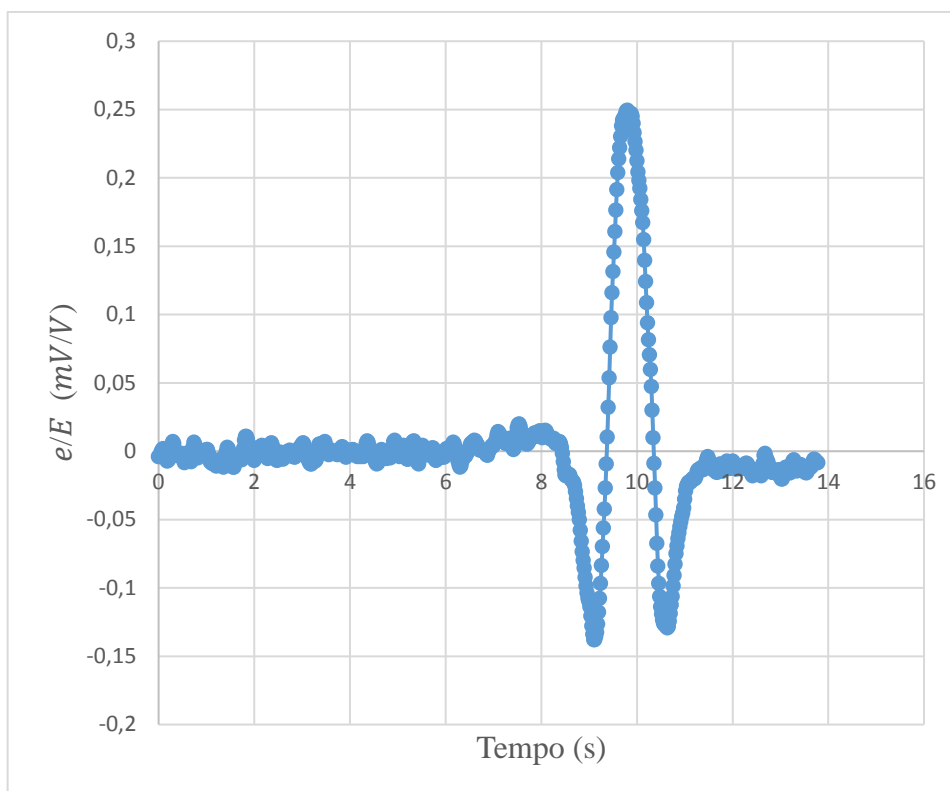


Figura 95 – Pulso de variação de tensão elétrica S02 T02 01 (8,27t).

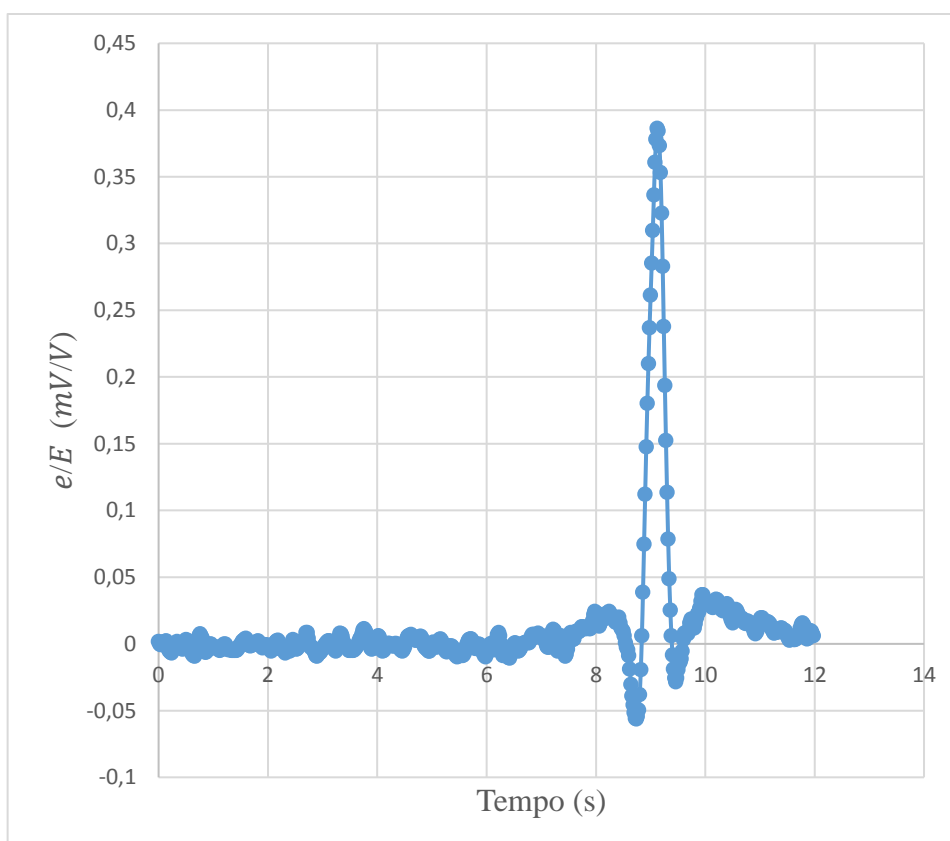


Figura 96 – Pulso de variação de tensão elétrica S02 T02 02 (8,27t).

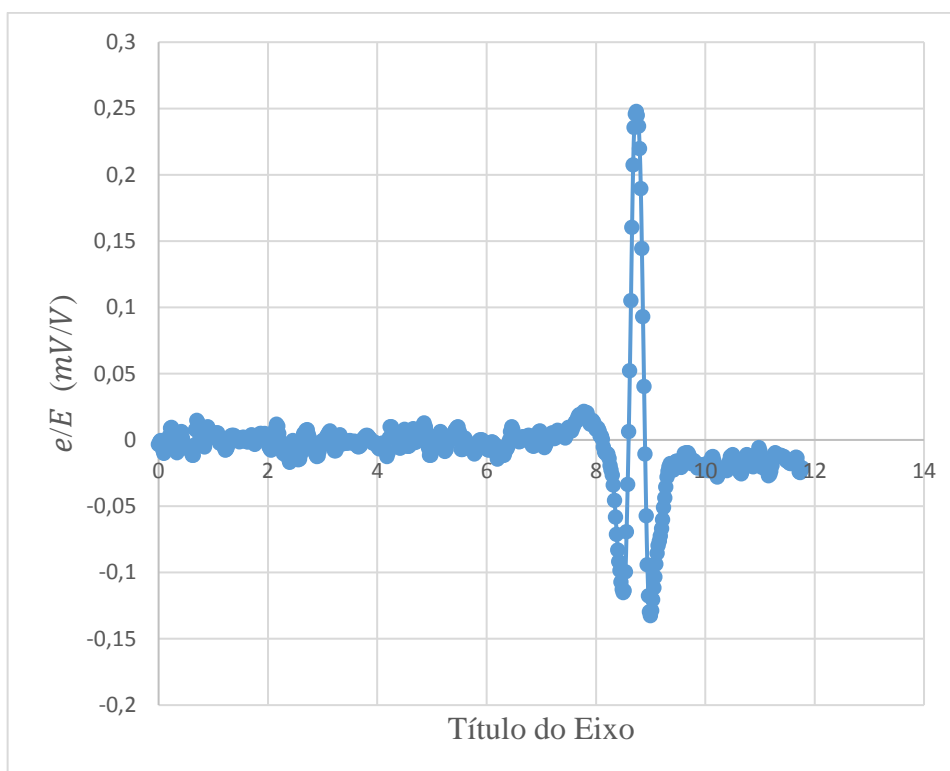


Figura 97 – Pulso de variação de tensão elétrica S02 T02 03 (8,27t).

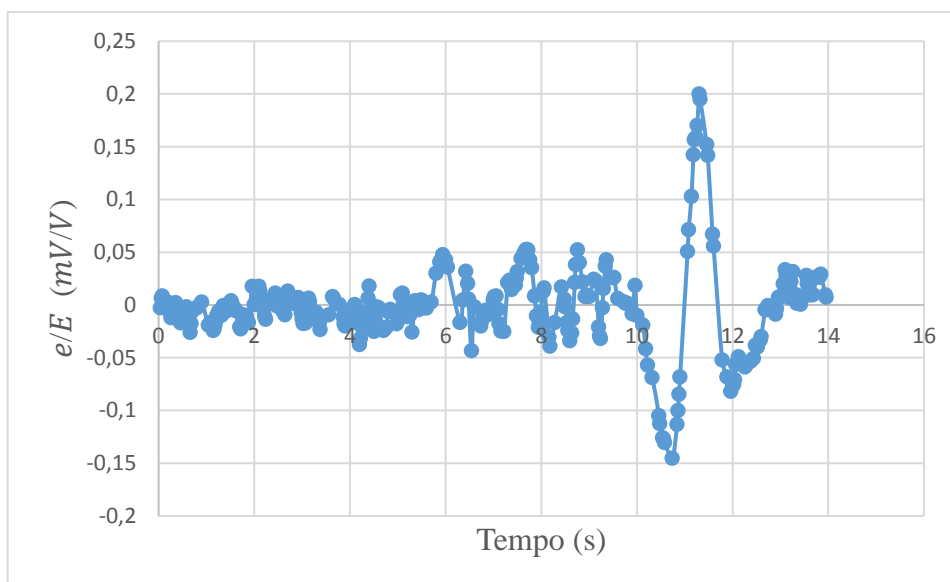


Figura 98 – Pulso de variação de tensão elétrica S03 T01 01 (8,27t).

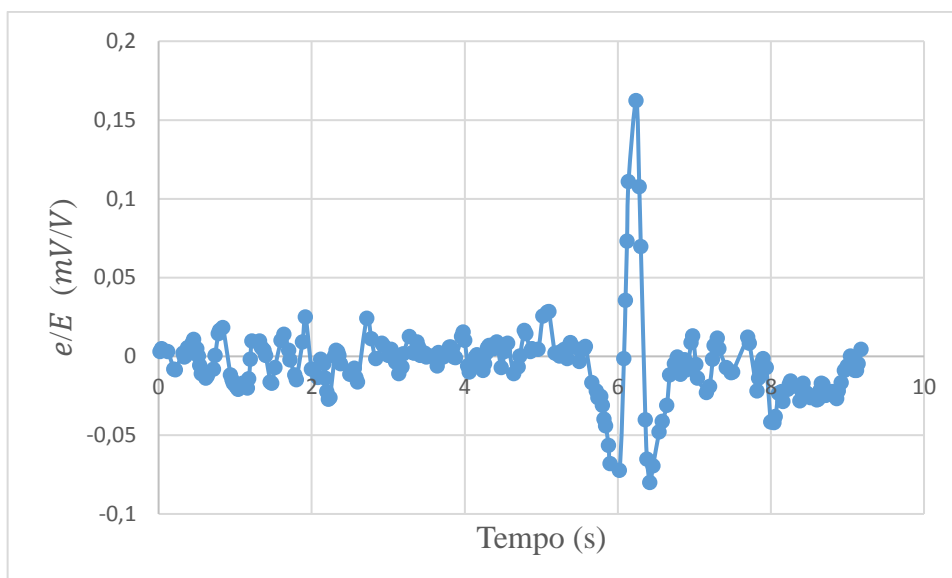


Figura 99 – Pulso de variação de tensão elétrica S03 T01 02 (8,27t).

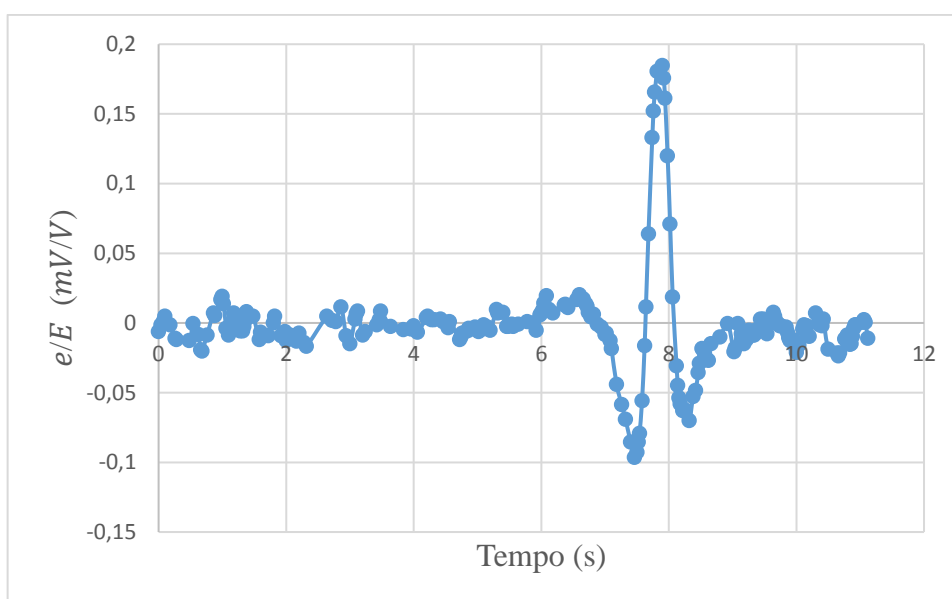


Figura 100 – Pulso de variação de tensão elétrica S03 T01 03 (8,27t).

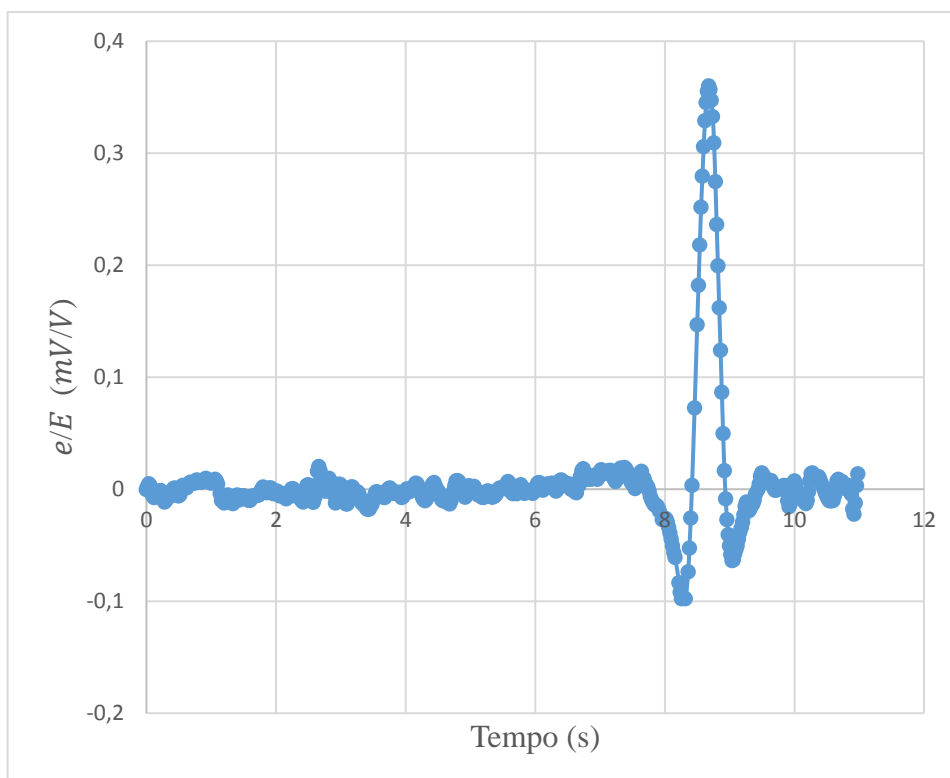


Figura 101 – Pulso de variação de tensão elétrica S03 T02 01 (8,27t).

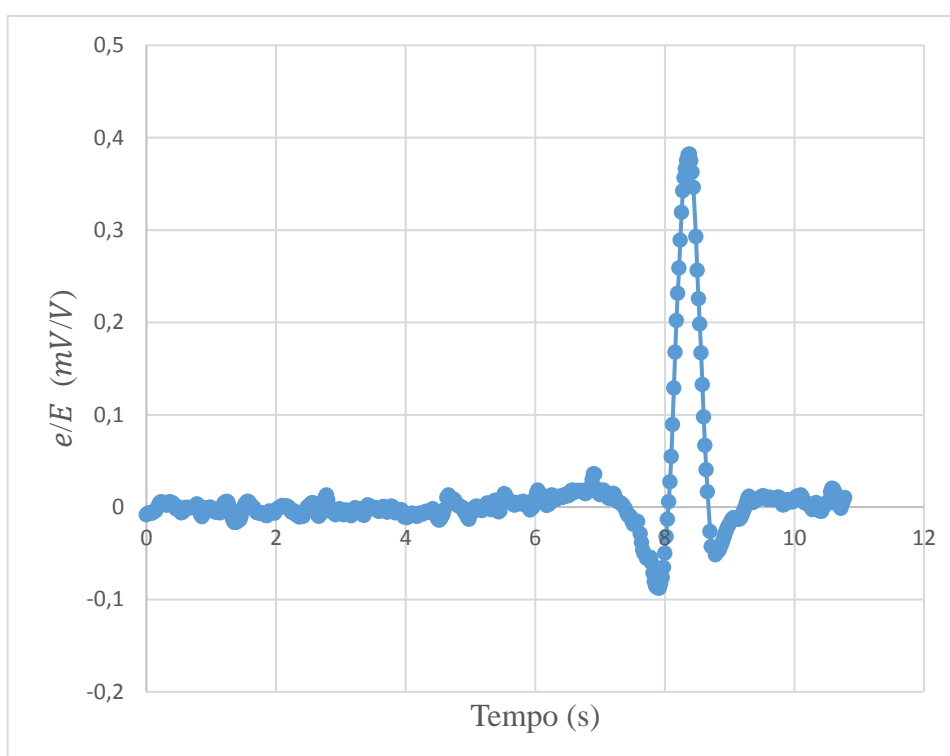


Figura 102 – Pulso de variação de tensão elétrica S03 T02 02 (8,27t).

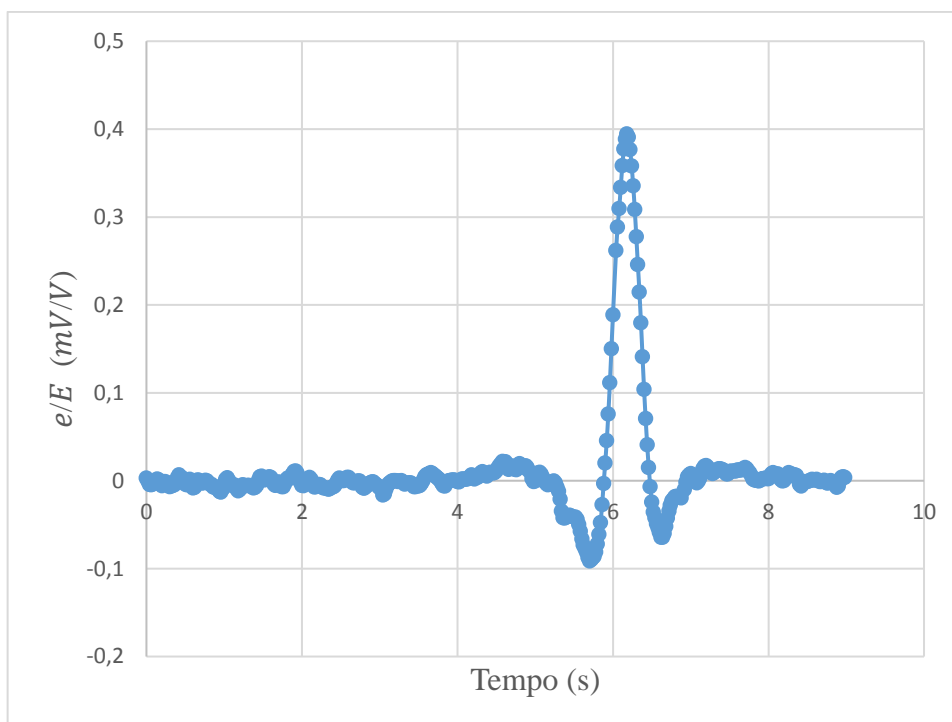


Figura 103 – Pulso de variação de tensão elétrica S03 T02 03 (8,27t).

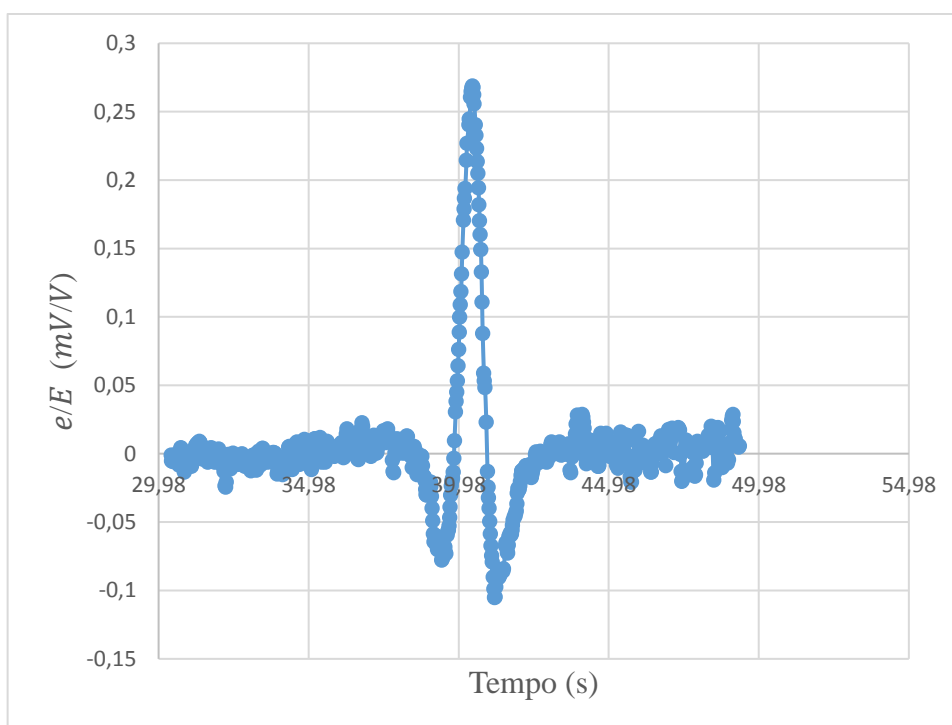


Figura 104 – Pulso de variação de tensão elétrica S04 T01 01 (8,27t).

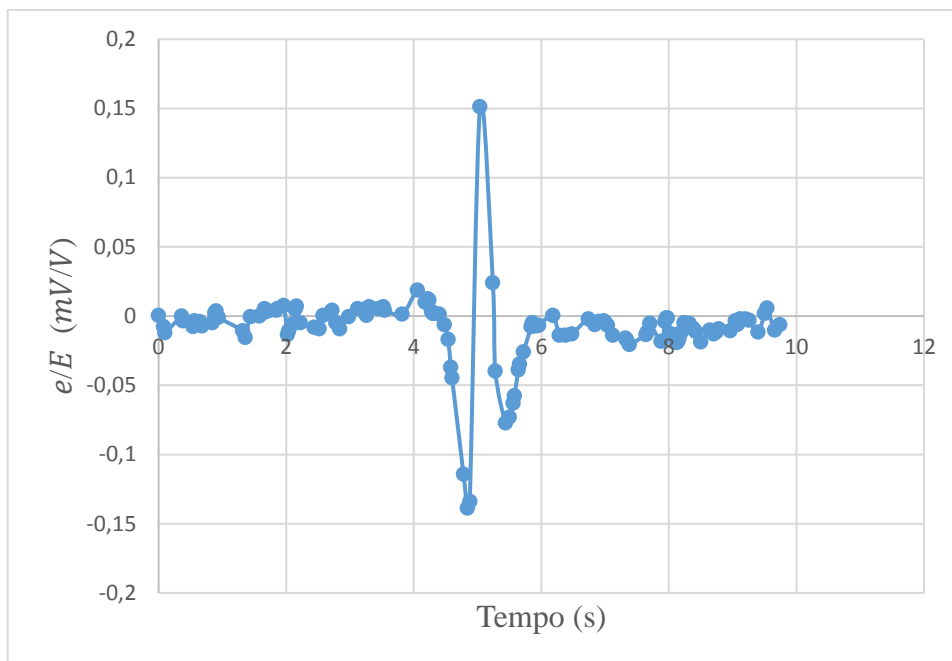


Figura 105 – Pulso de variação de tensão elétrica S04 T01 02 (8,27t).

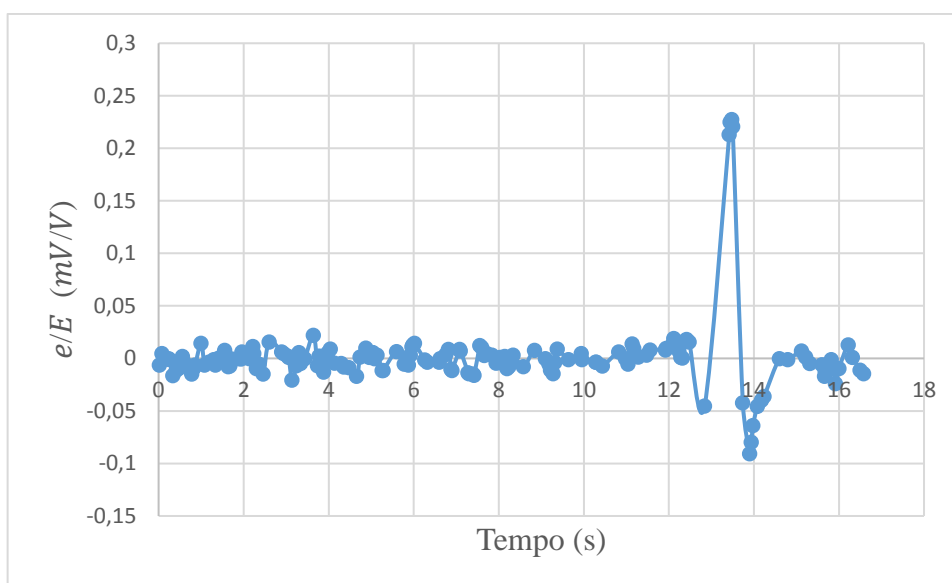


Figura 106 – Pulso de variação de tensão elétrica S04 T01 03 (8,27t).

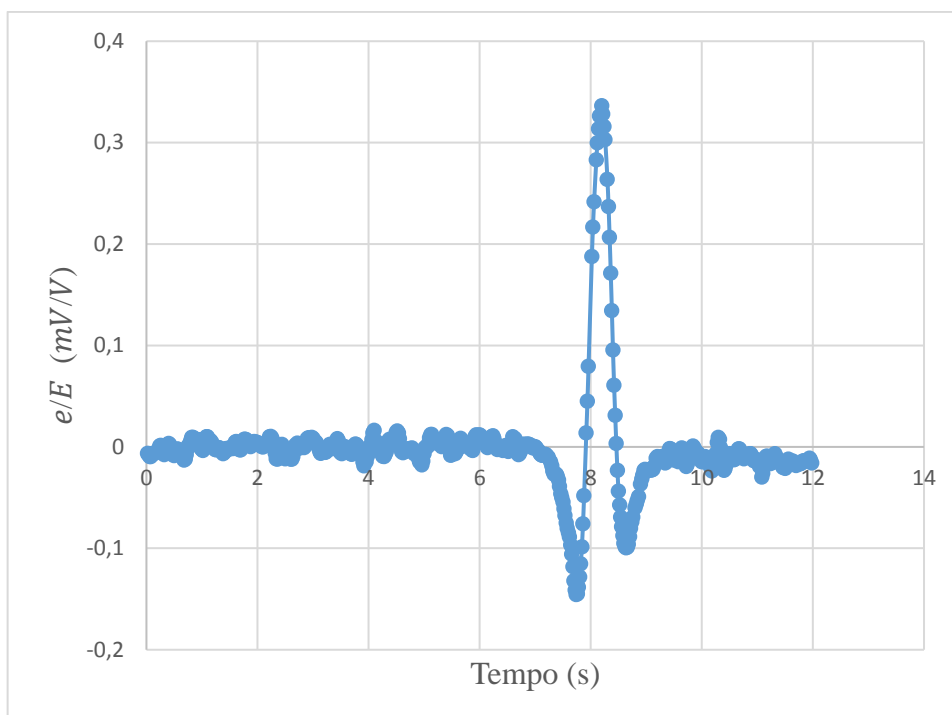


Figura 107 – Pulso de variação de tensão elétrica S04 T02 01 (8,27t).

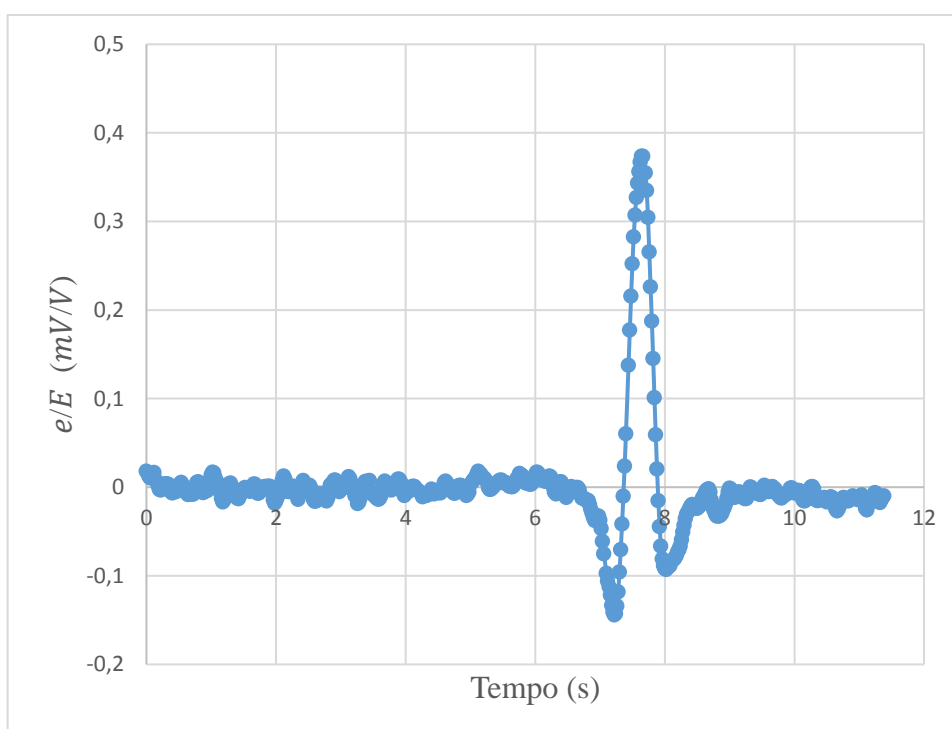


Figura 108 – Pulso de variação de tensão elétrica S04 T02 02 (8,27t)

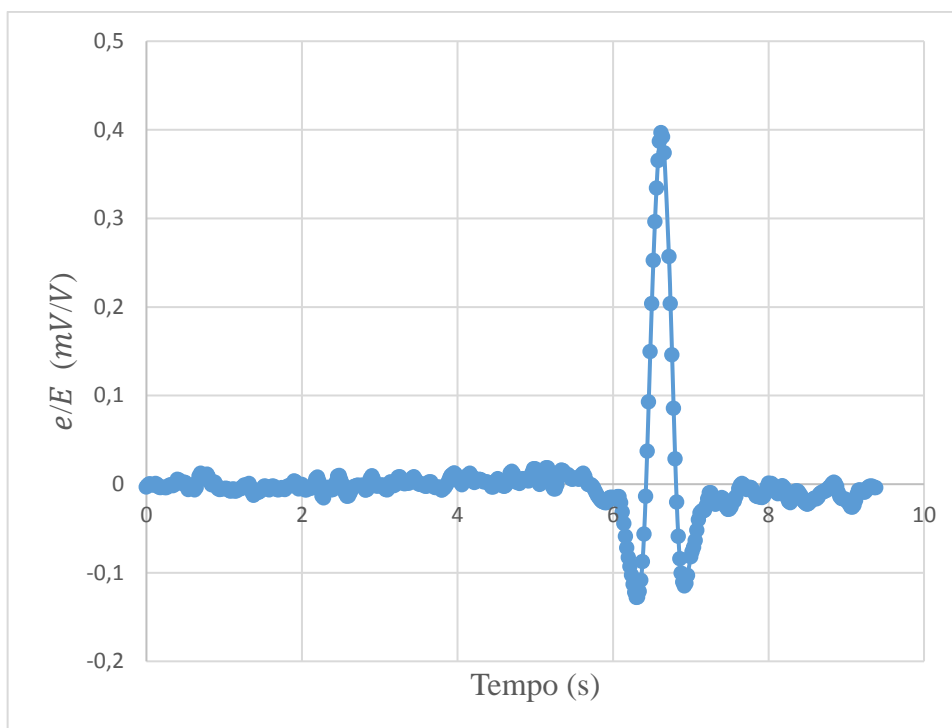


Figura 109 – Pulso de variação de tensão elétrica S04 T02 03 (8,27t)

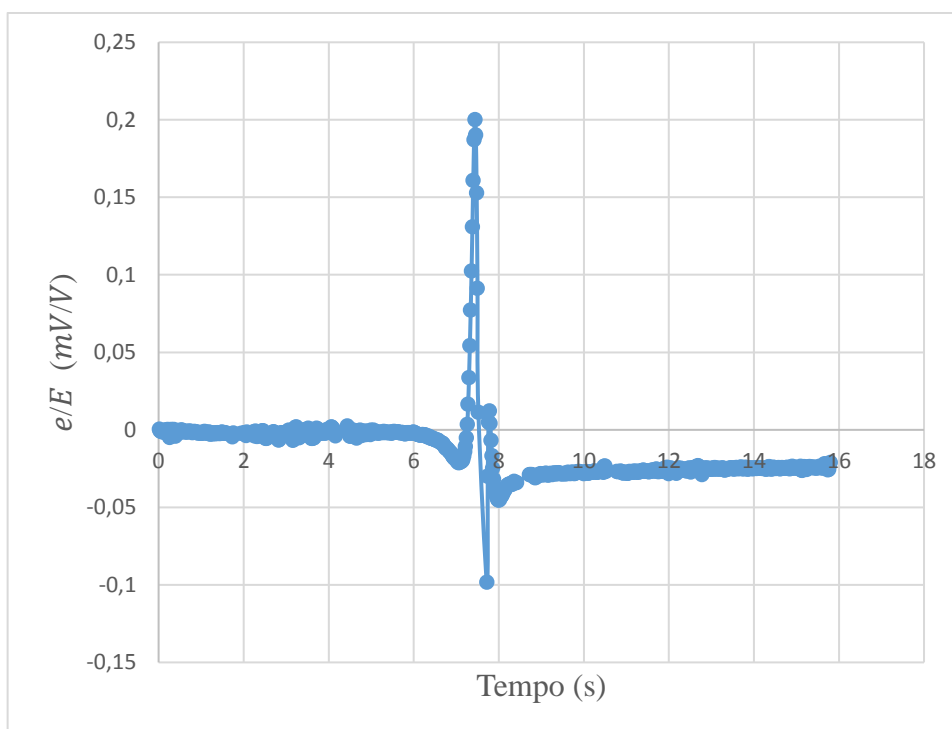


Figura 110 – Pulso de variação de tensão elétrica S01 T01 01 (10,47t).

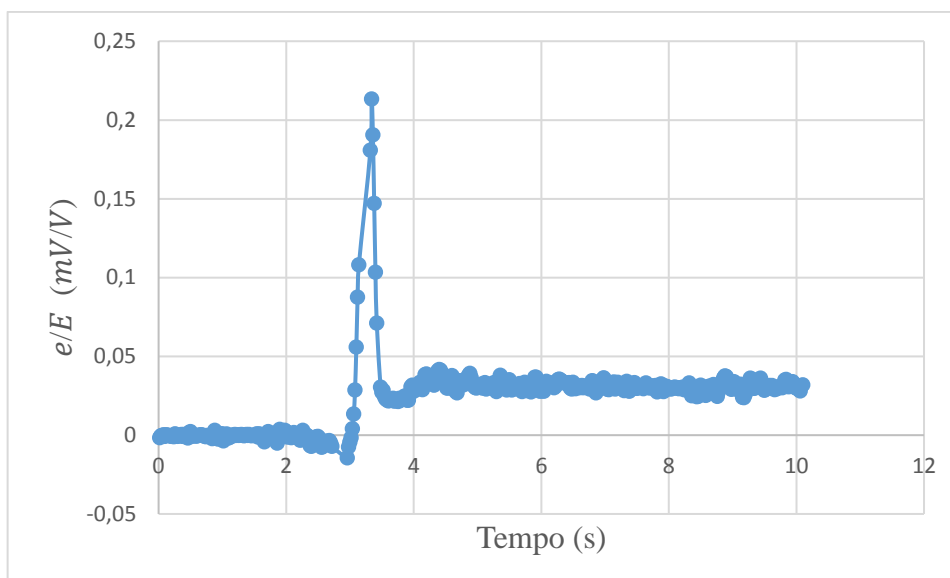


Figura 111 – Pulso de variação de tensão elétrica S01 T01 02 (10,47t).

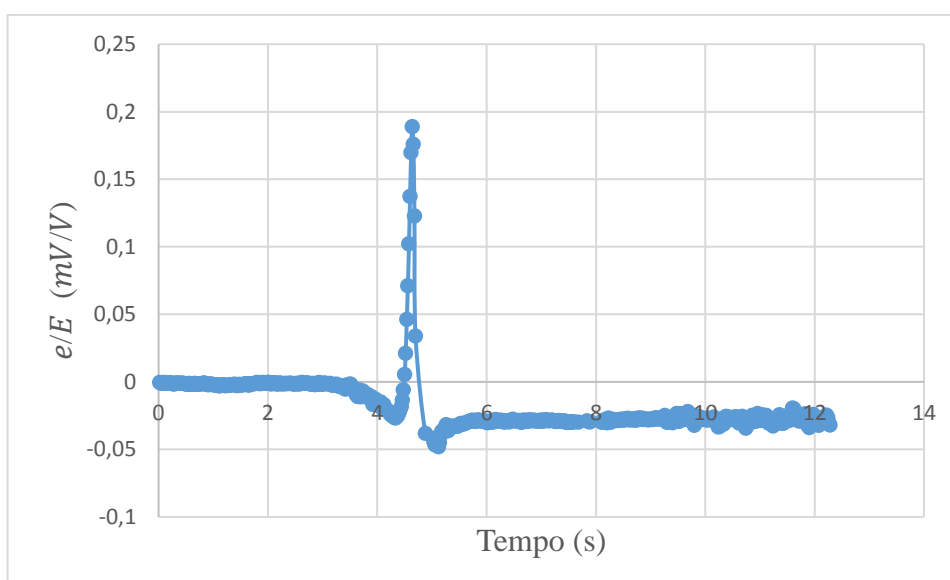


Figura 112 – Pulso de variação de tensão elétrica S01 T01 03 (10,47t).

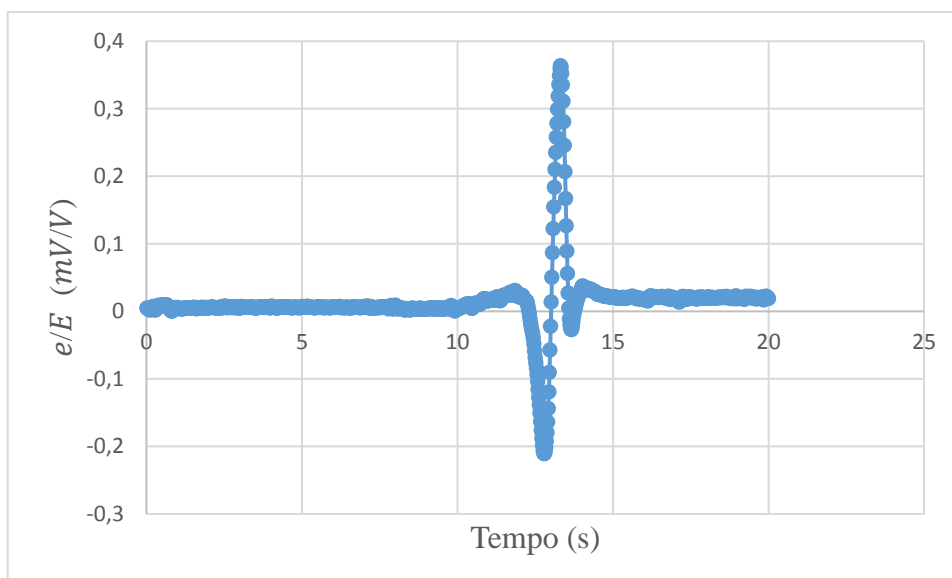


Figura 113 – Pulso de variação de tensão elétrica S01 T02 01 (10,47t).

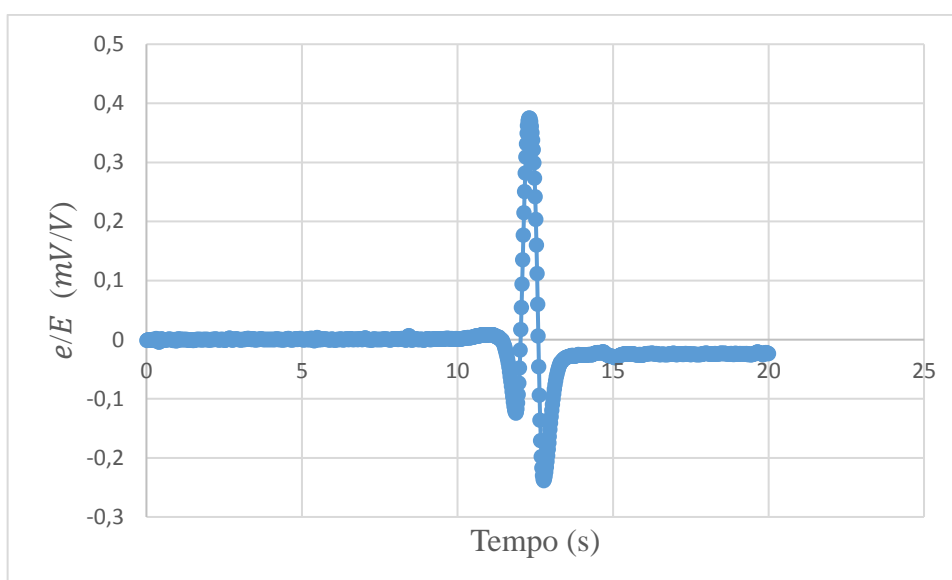


Figura 114 – Pulso de variação de tensão elétrica S01 T02 02 (10,47t).

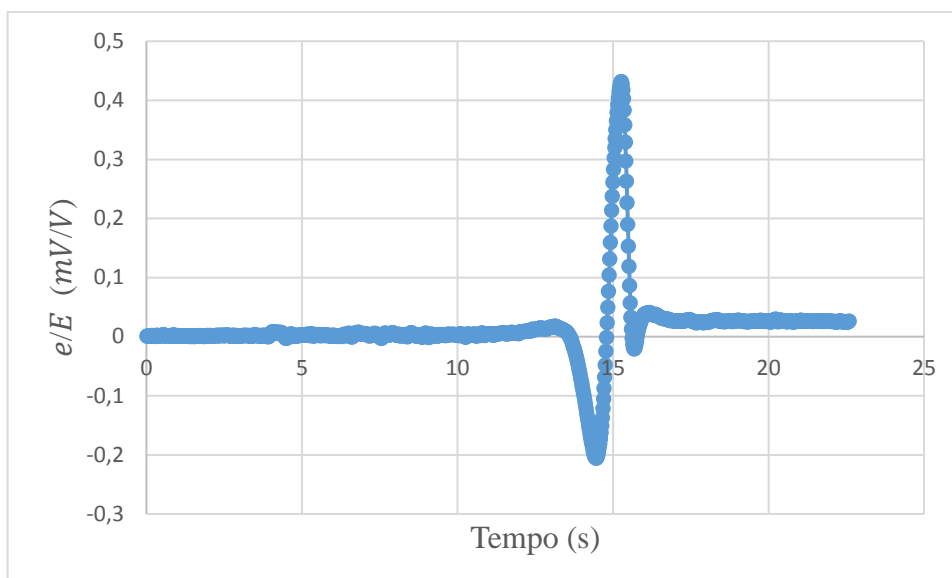


Figura 115 – Pulso de variação de tensão elétrica S01 T02 03 (10,47t).

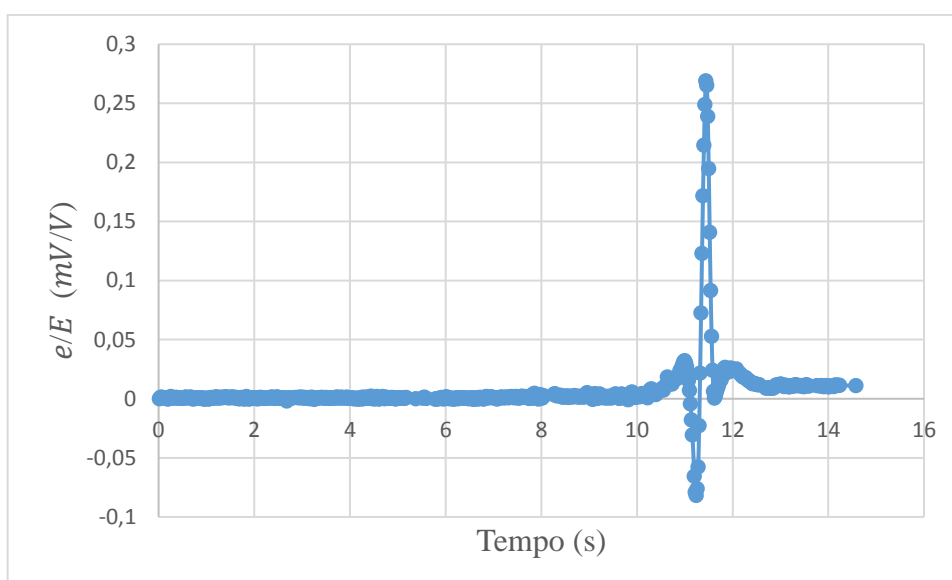


Figura 116 – Pulso de variação de tensão elétrica S02 T01 01 (10,47t).

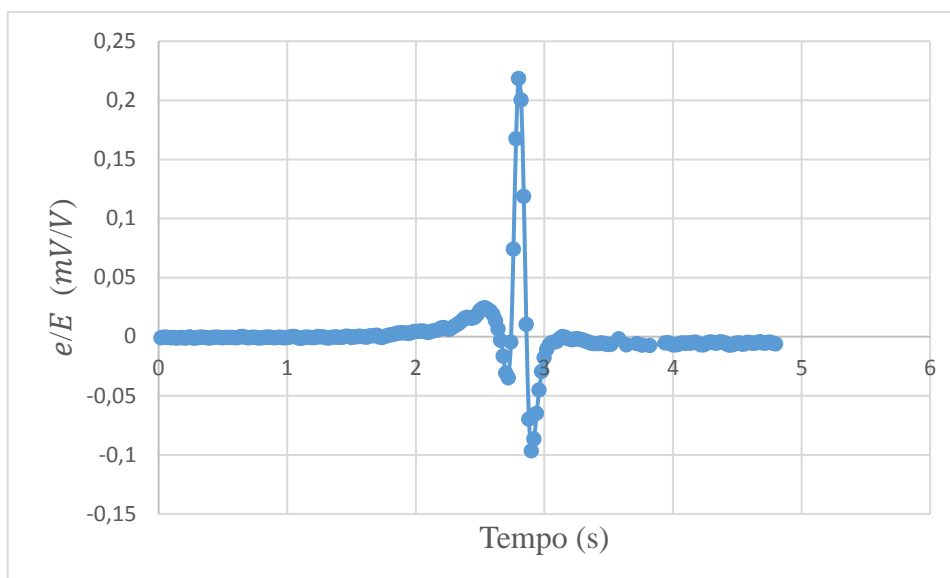


Figura 117 – Pulso de variação de tensão elétrica S02 T01 02 (10,47t).

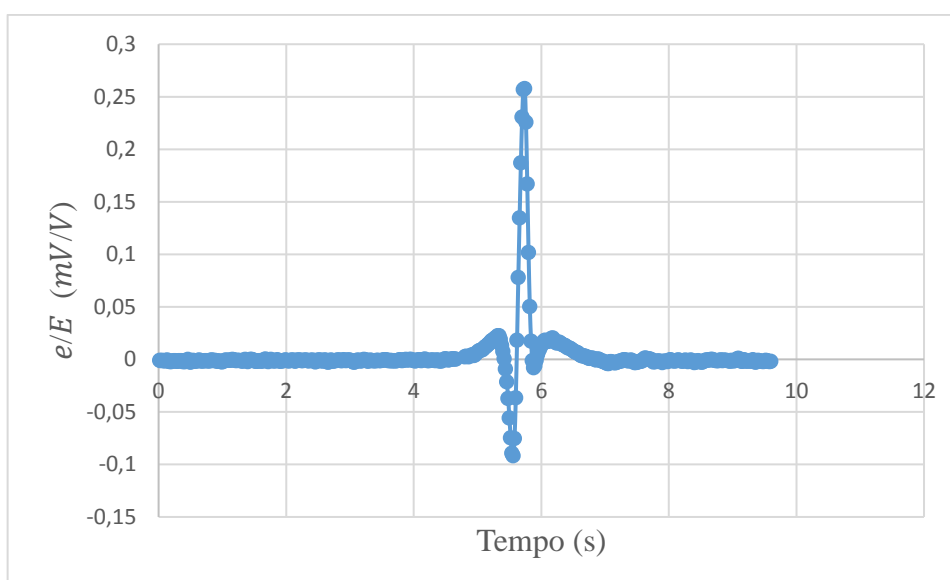


Figura 118 – Pulso de variação de tensão elétrica S02 T01 03 (10,47t).

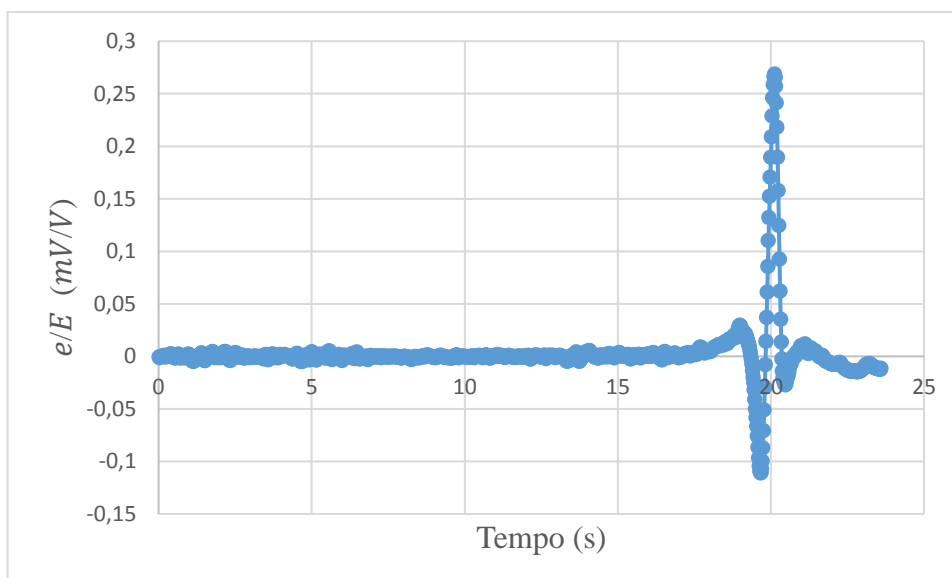


Figura 119 – Pulso de variação de tensão elétrica S02 T02 01 (10,47t).

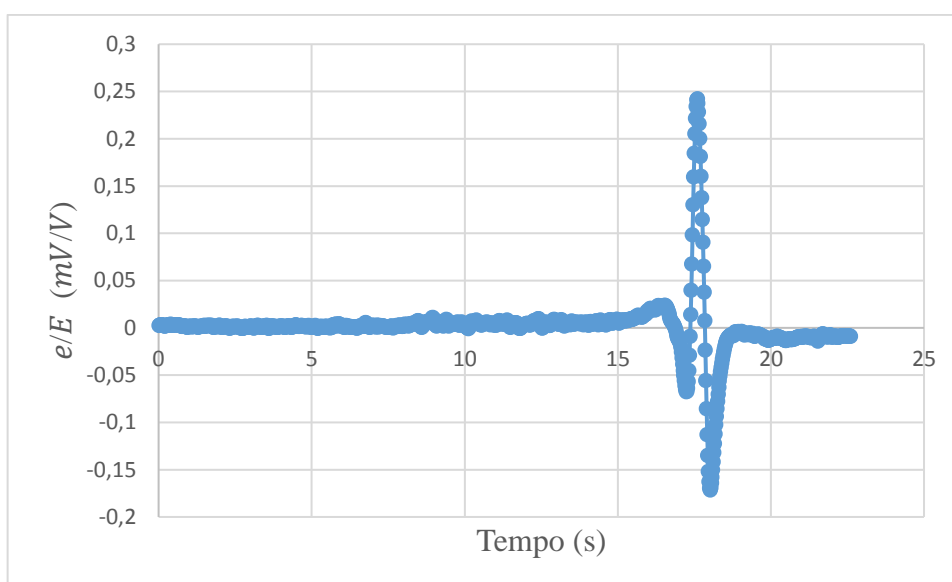


Figura 120 – Pulso de variação de tensão elétrica S02 T02 02 (10,47t).

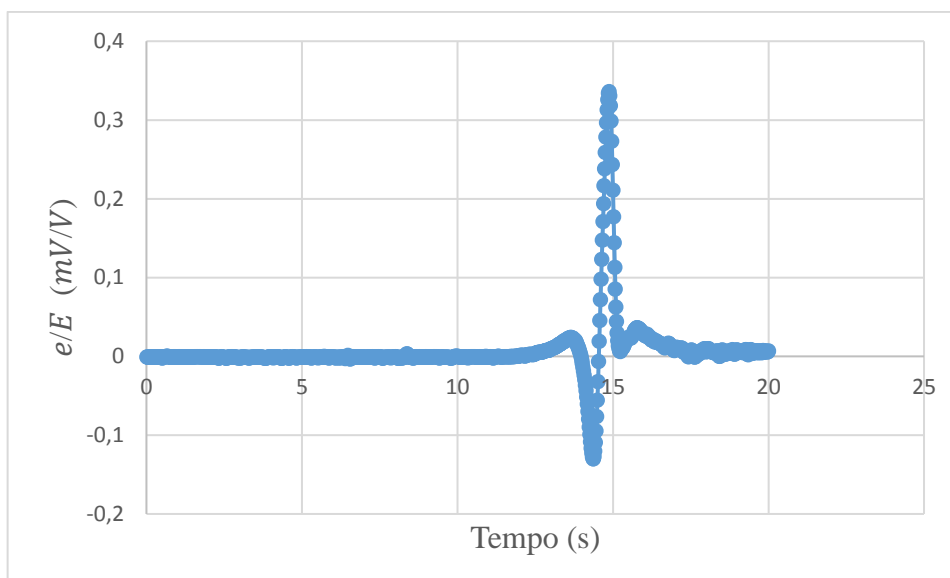


Figura 121 – Pulso de variação de tensão elétrica S02 T02 03 (10,47t).

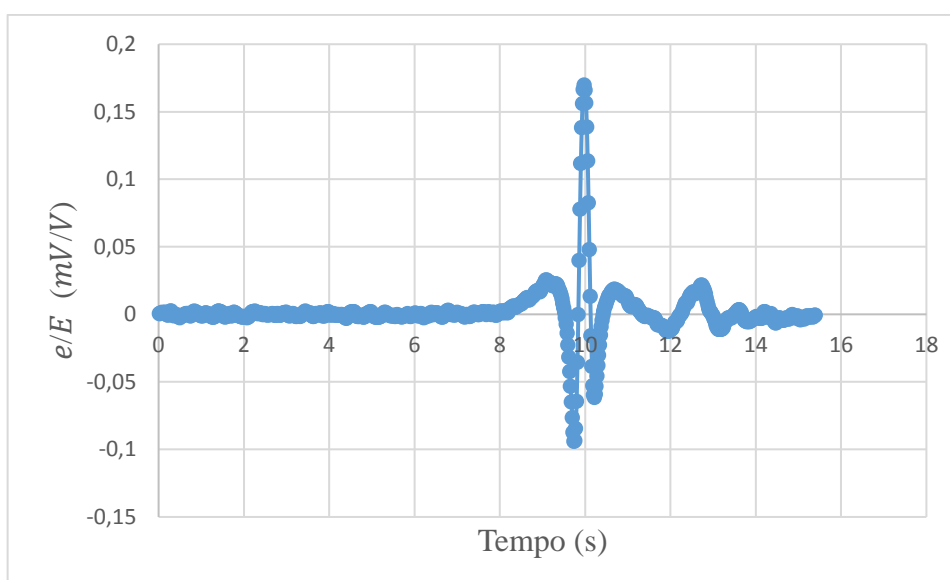


Figura 122 – Pulso de variação de tensão elétrica S03 T01 01 (10,47t).

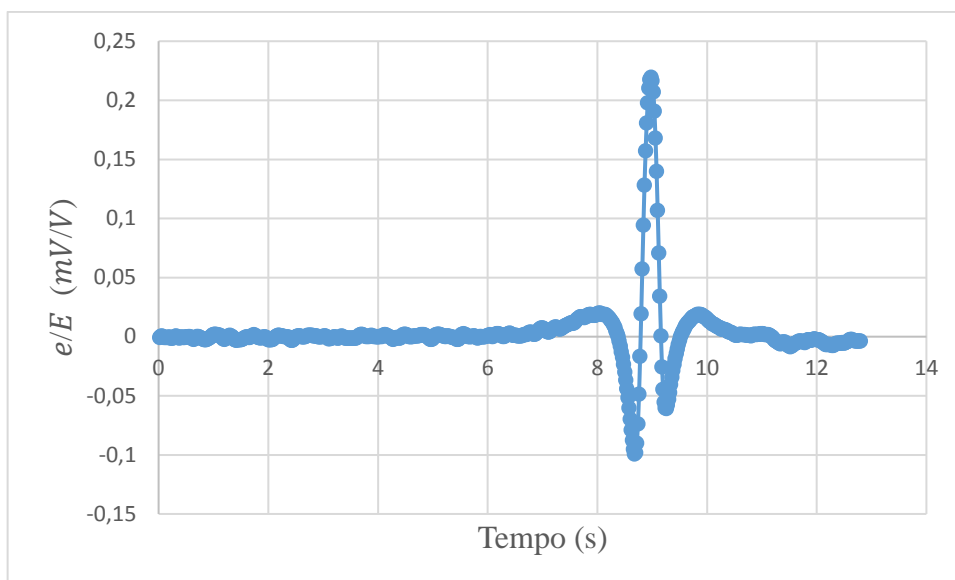


Figura 123 – Pulso de variação de tensão elétrica S03 T01 02 (10,47t).

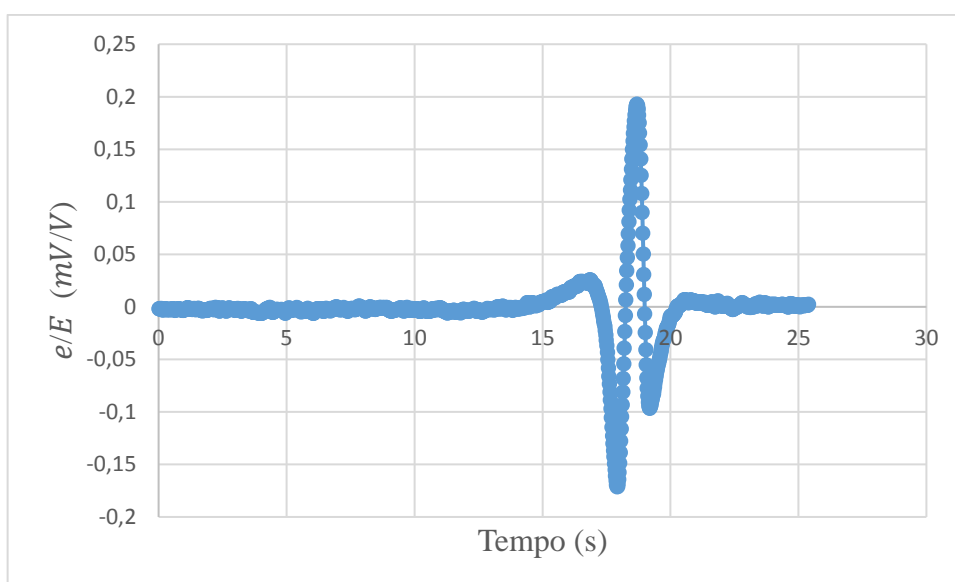


Figura 124 – Pulso de variação de tensão elétrica S03 T01 03 (10,47t).

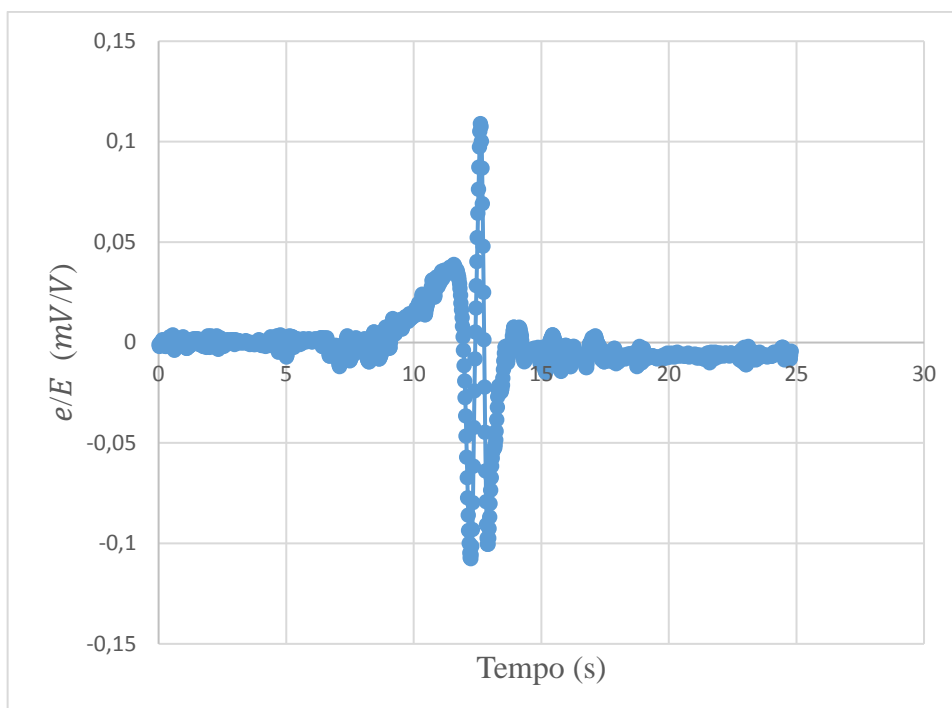


Figura 125 – Pulso de variação de tensão elétrica S03 T02 01 (10,47t).

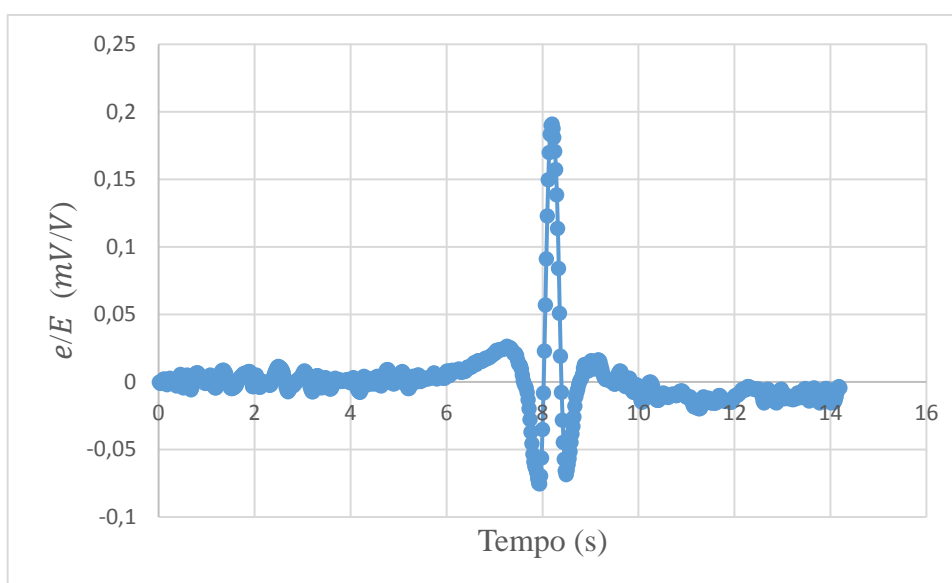


Figura 126 – Pulso de variação de tensão elétrica S03 T02 02 (10,47t).

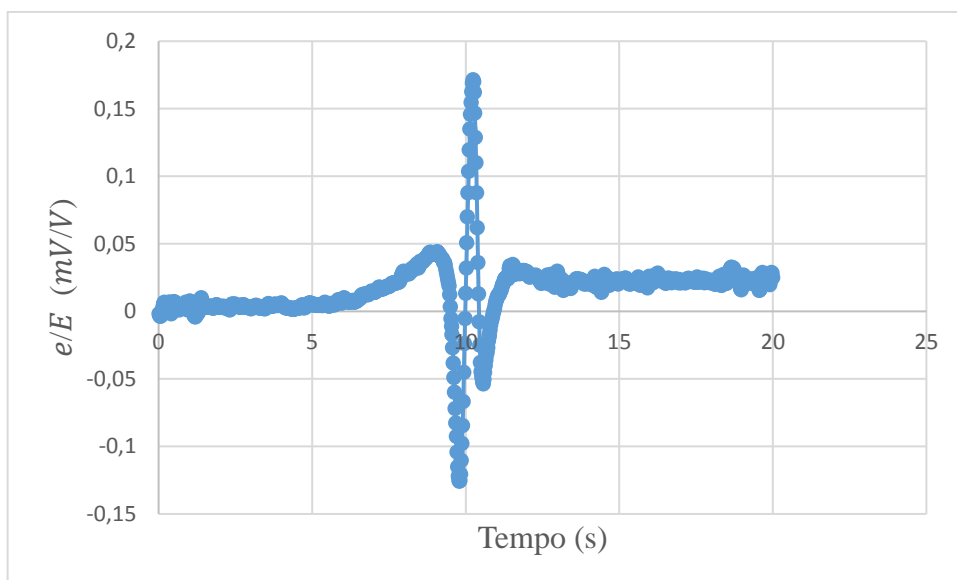


Figura 127 – Pulso de variação de tensão elétrica S03 T02 03 (10,47t).

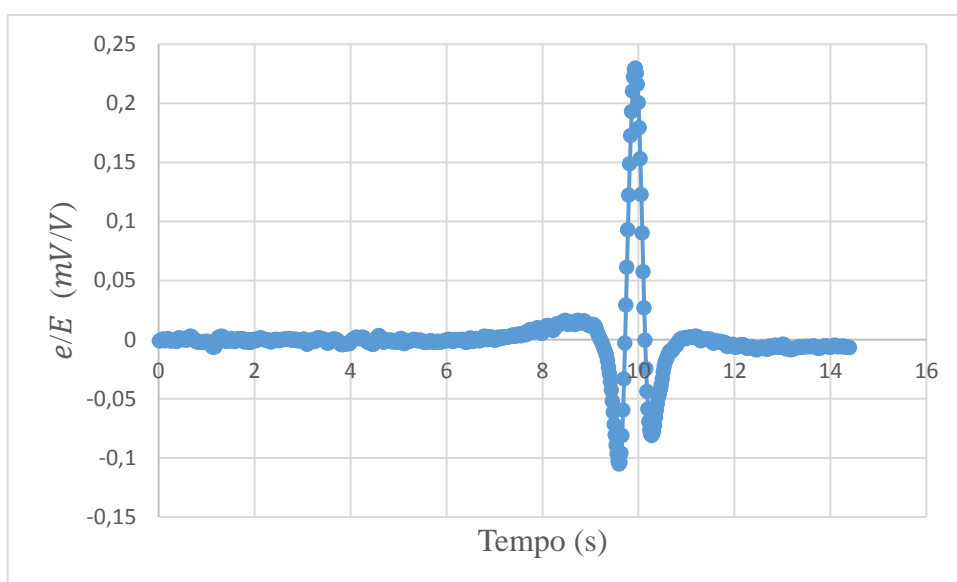


Figura 128 – Pulso de variação de tensão elétrica S04 T01 01 (10,47t).

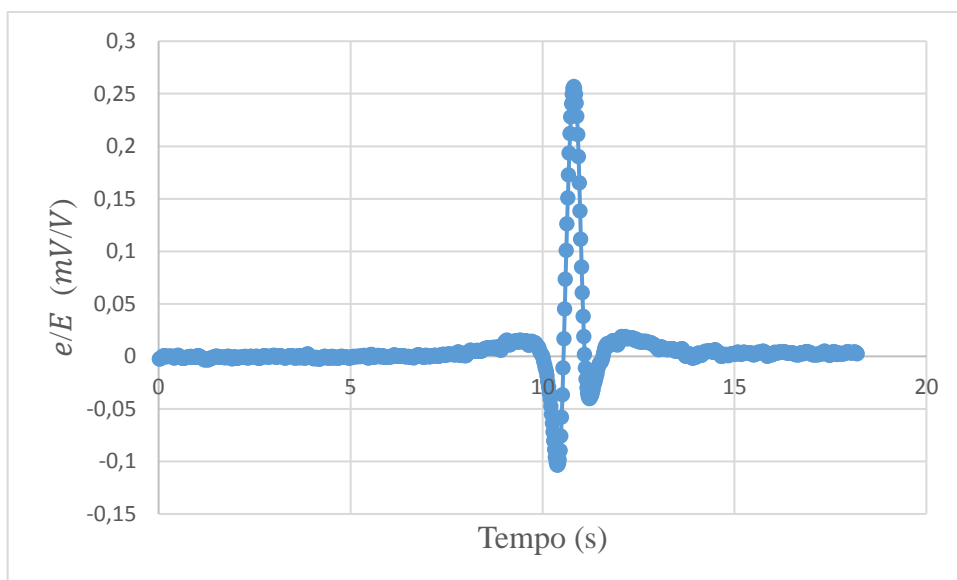


Figura 129 – Pulso de variação de tensão elétrica S04 T01 02 (10,47t).

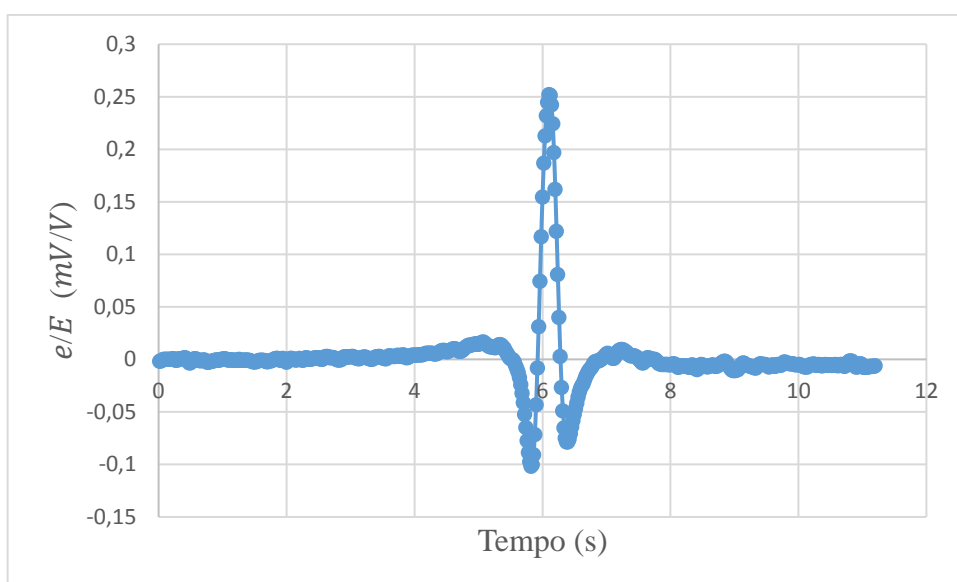


Figura 130 – Pulso de variação de tensão elétrica S04 T01 03 (10,47t).

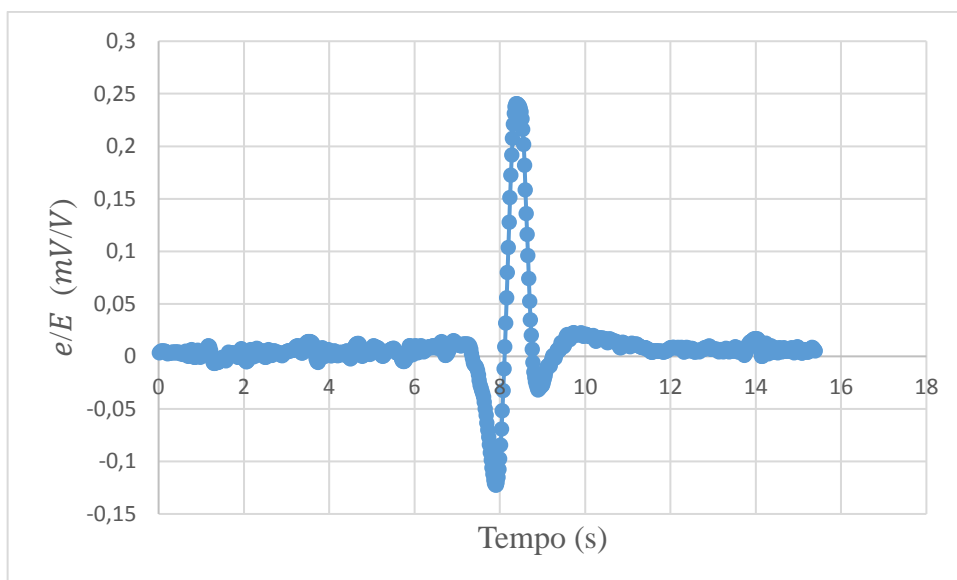


Figura 131 – Pulso de variação de tensão elétrica S04 T02 01 (10,47t).

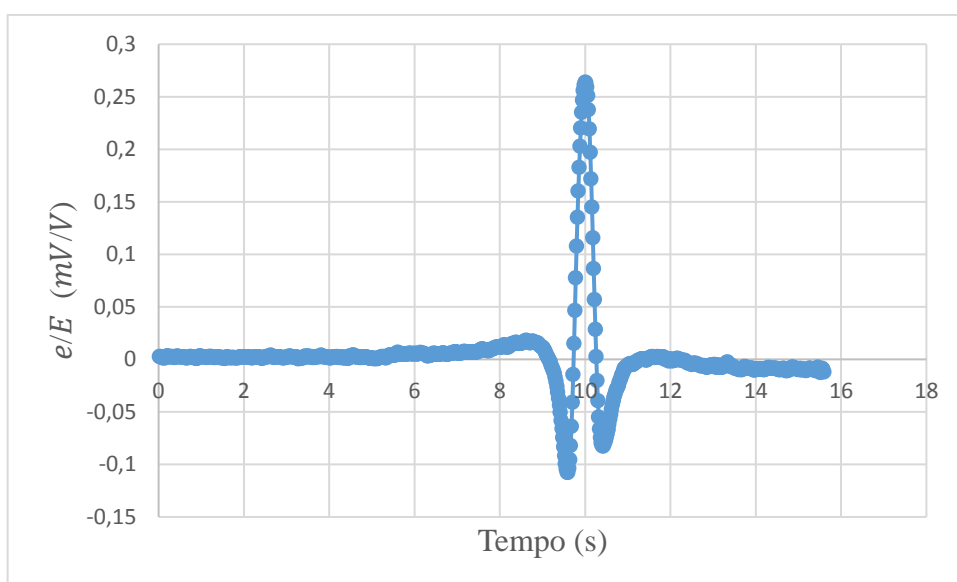


Figura 132 – Pulso de variação de tensão elétrica S04 T02 02 (10,47t).

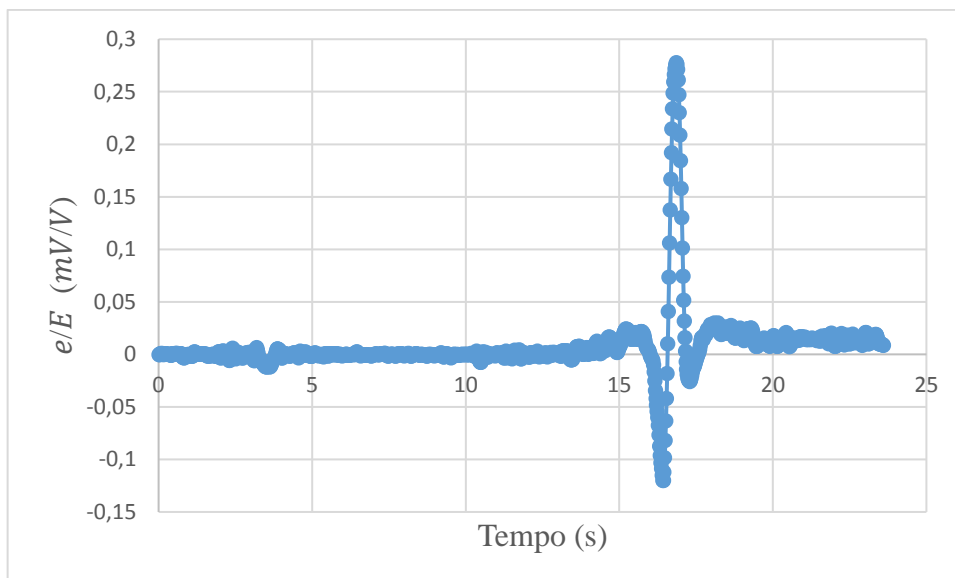


Figura 133 – Pulso de variação de tensão elétrica S04 T02 03 (10,47t).

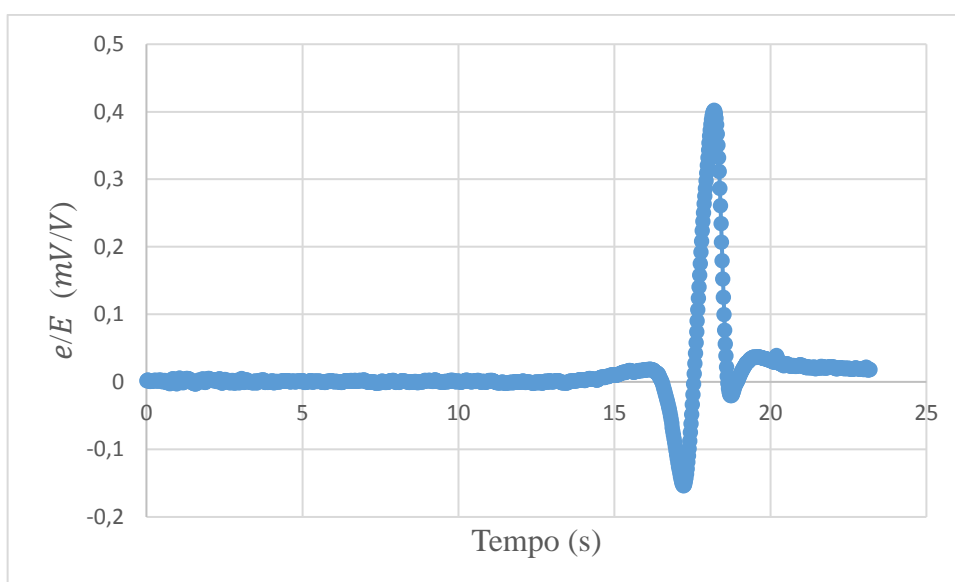


Figura 134 – Pulso de variação de tensão elétrica S01 T01 01 (11,54t).

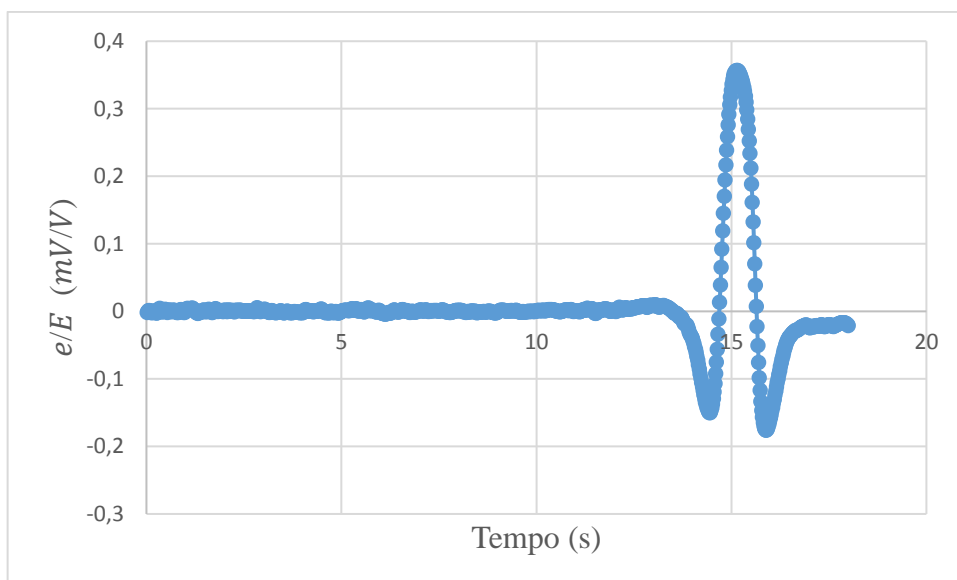


Figura 135 – Pulso de variação de tensão elétrica S01 T01 02 (11,54t).

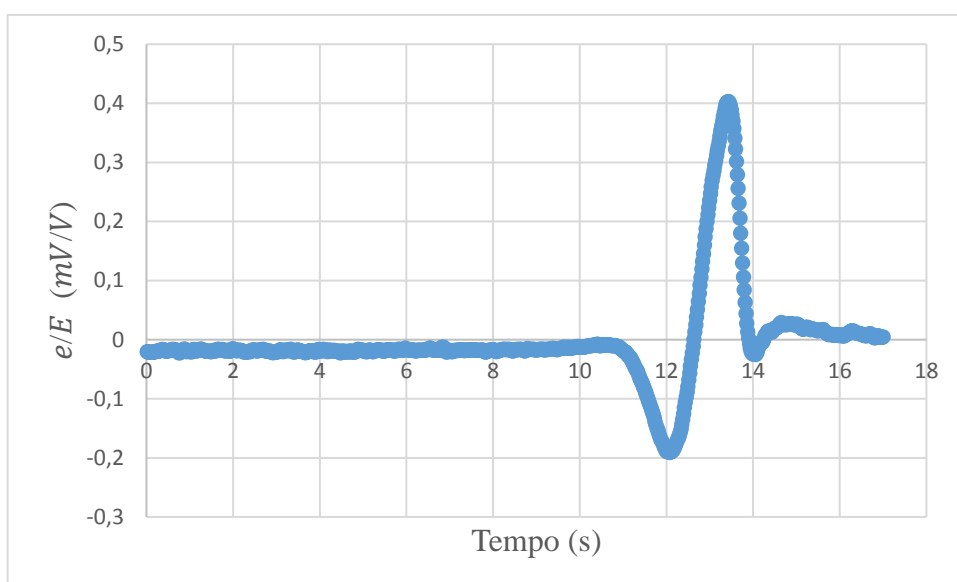


Figura 136 – Pulso de variação de tensão elétrica S01 T01 03 (11,54t).

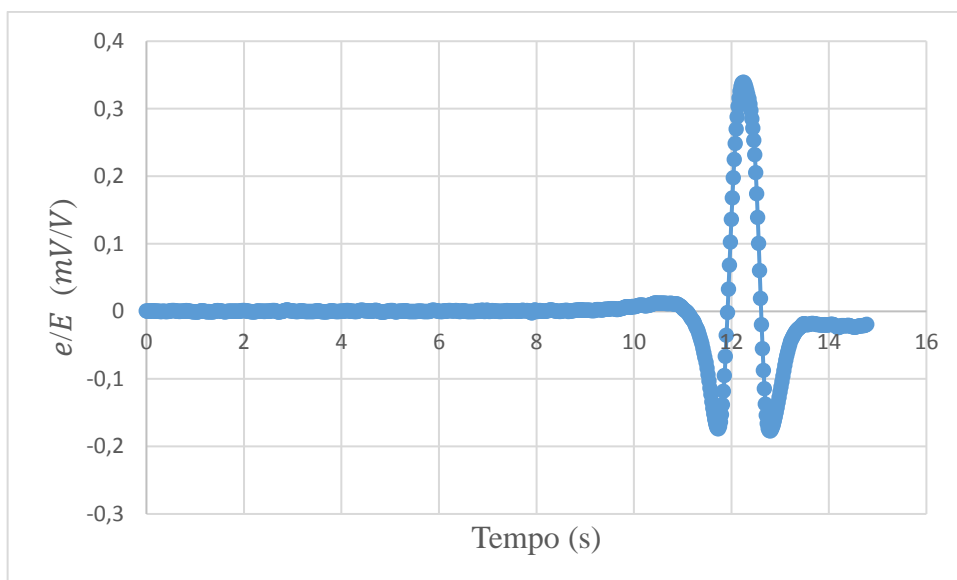


Figura 137 – Pulso de variação de tensão elétrica S01 T02 01 (11,54t).

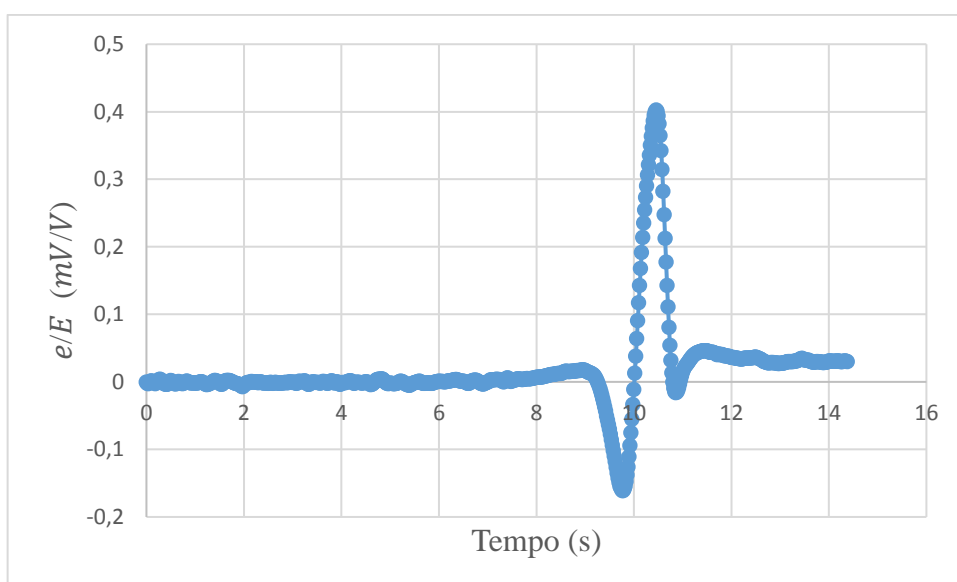


Figura 138 – Pulso de variação de tensão elétrica S01 T02 02 (11,54t).

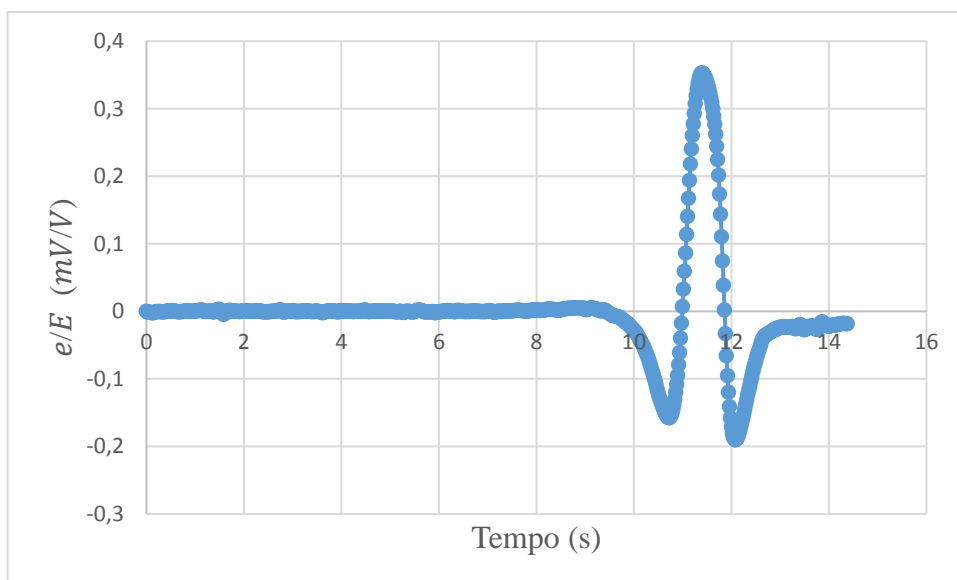


Figura 139 – Pulso de variação de tensão elétrica S01 T02 03 (11,54t).

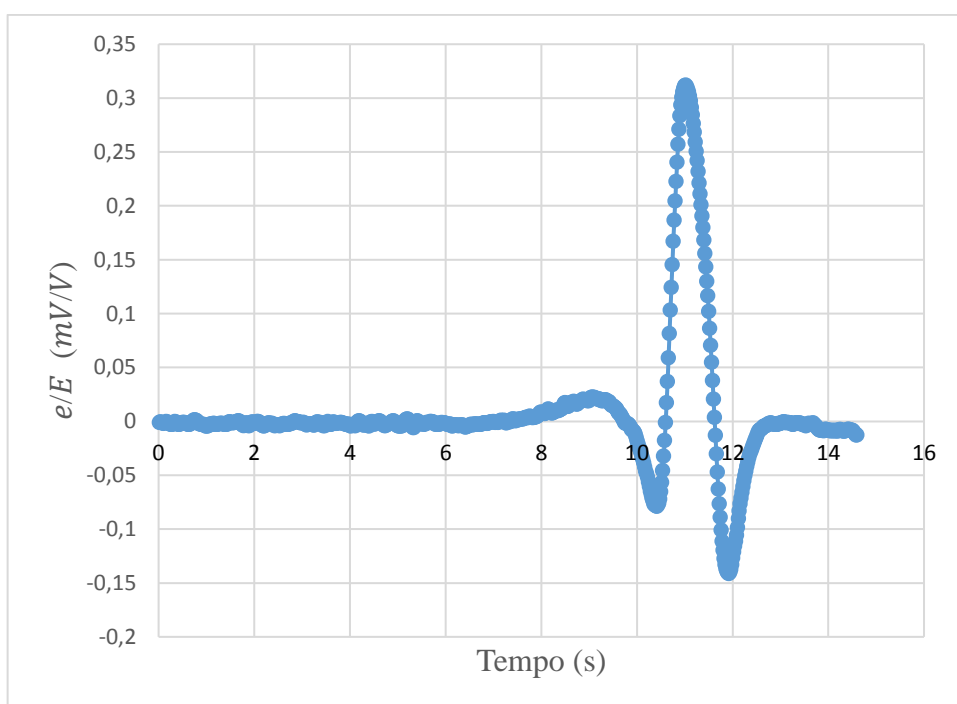


Figura 140 – Pulso de variação de tensão elétrica S02 T01 01 (11,54t).

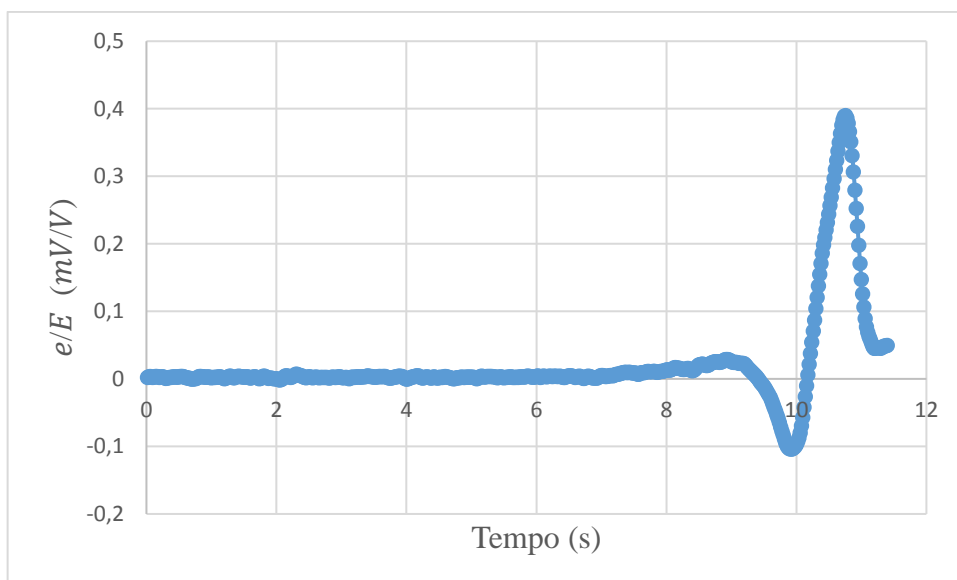


Figura 141 – Pulso de variação de tensão elétrica S02 T01 02 (11,54t).

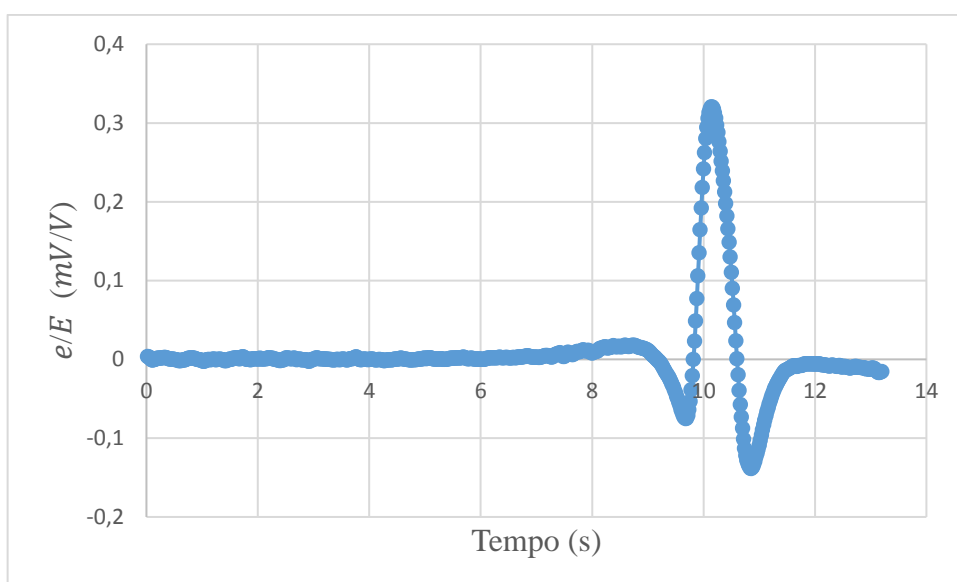


Figura 142 – Pulso de variação de tensão elétrica S02 T01 03 (11,54t).

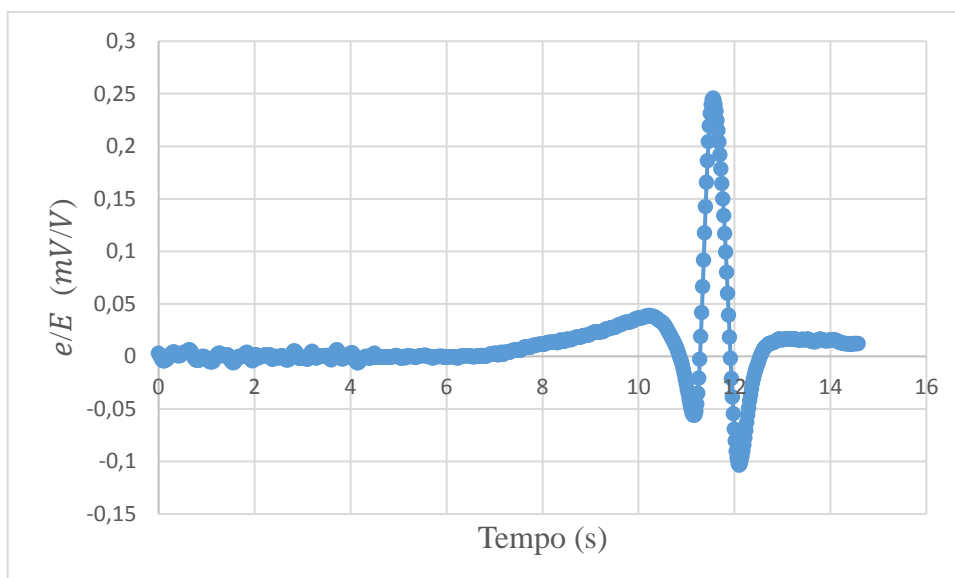


Figura 143 – Pulso de variação de tensão elétrica S02 T02 01 (11,54t).

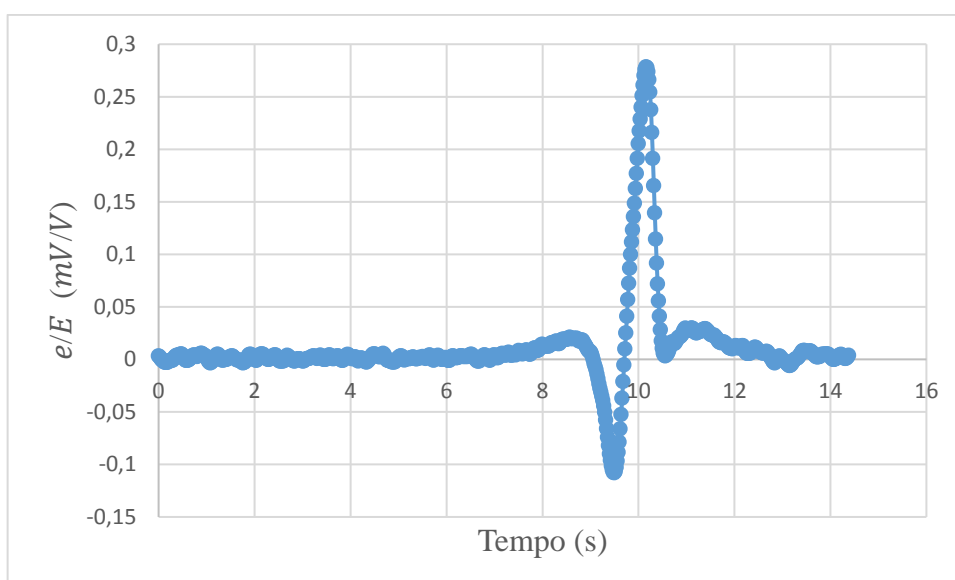


Figura 144 – Pulso de variação de tensão elétrica S02 T02 02 (11,54t).

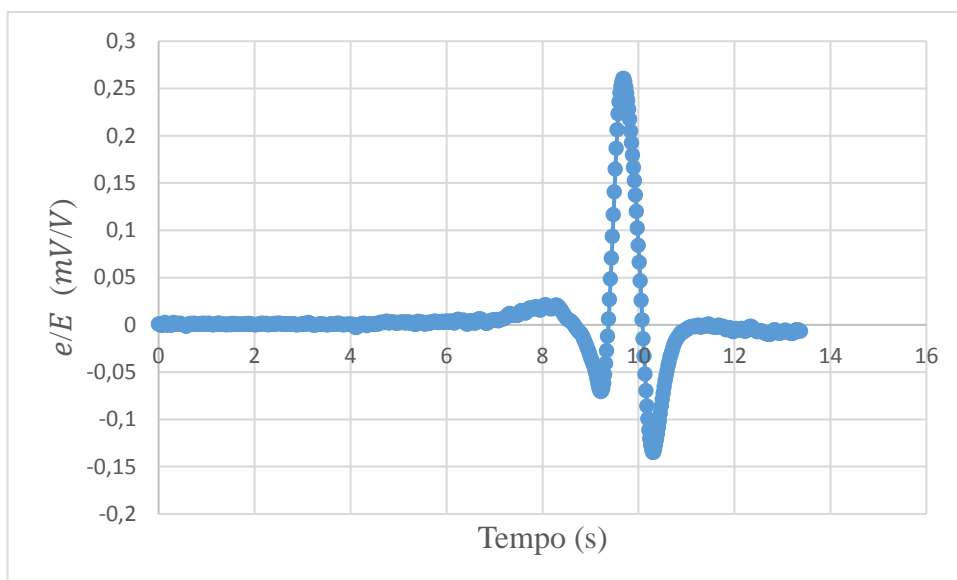


Figura 145 – Pulso de variação de tensão elétrica S02 T02 03 (11,54t).

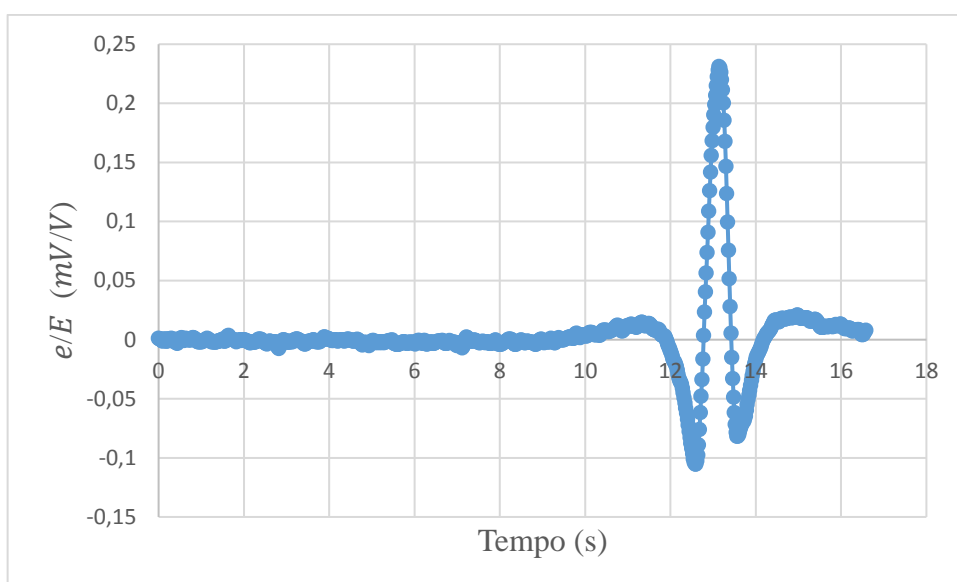


Figura 146 – Pulso de variação de tensão elétrica S03 T01 01 (11,54t).

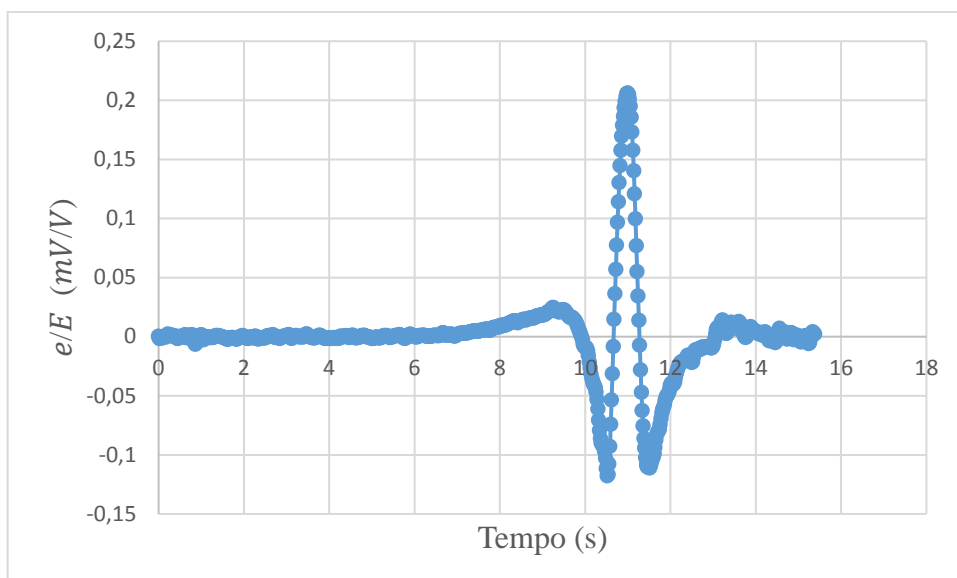


Figura 147 – Pulso de variação de tensão elétrica S03 T01 02 (11,54t).

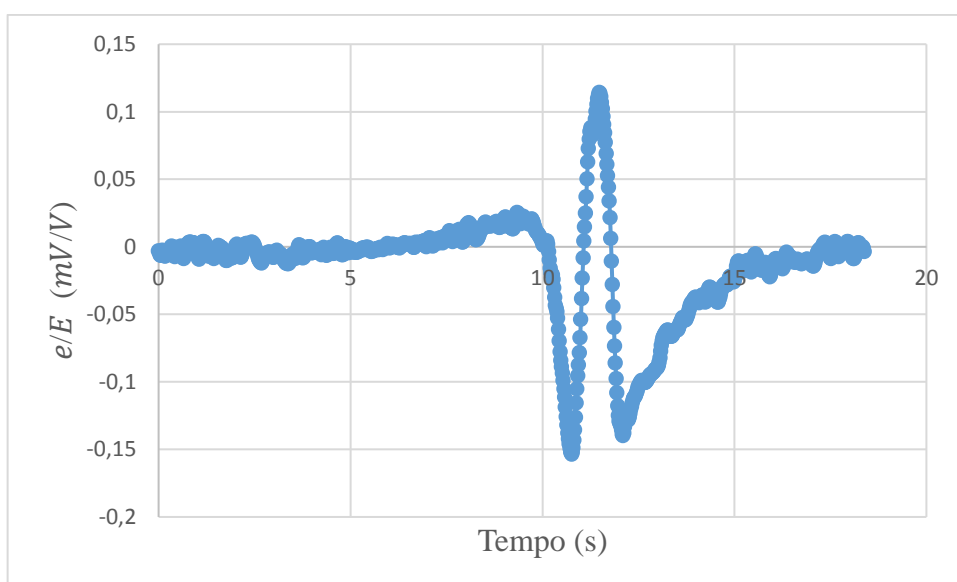


Figura 148 – Pulso de variação de tensão elétrica S03 T01 03 (11,54t).

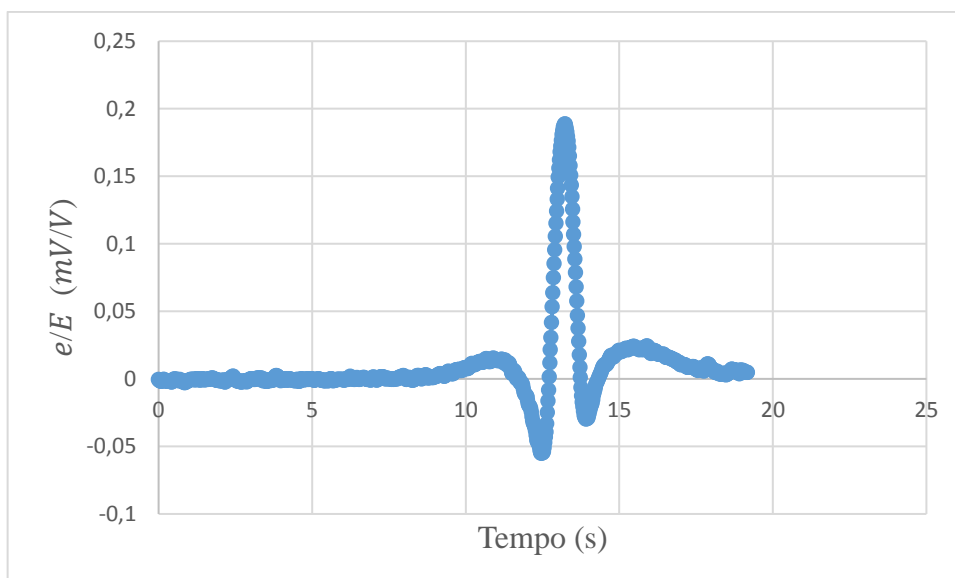


Figura 149 – Pulso de variação de tensão elétrica S03 T02 01 (11,54t).

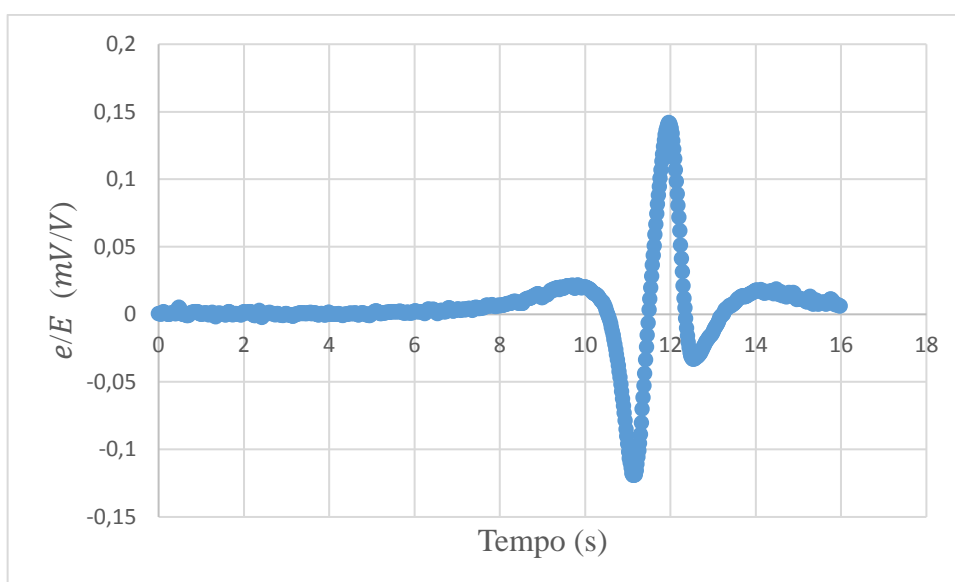


Figura 150 – Pulso de variação de tensão elétrica S03 T02 02 (11,54t).

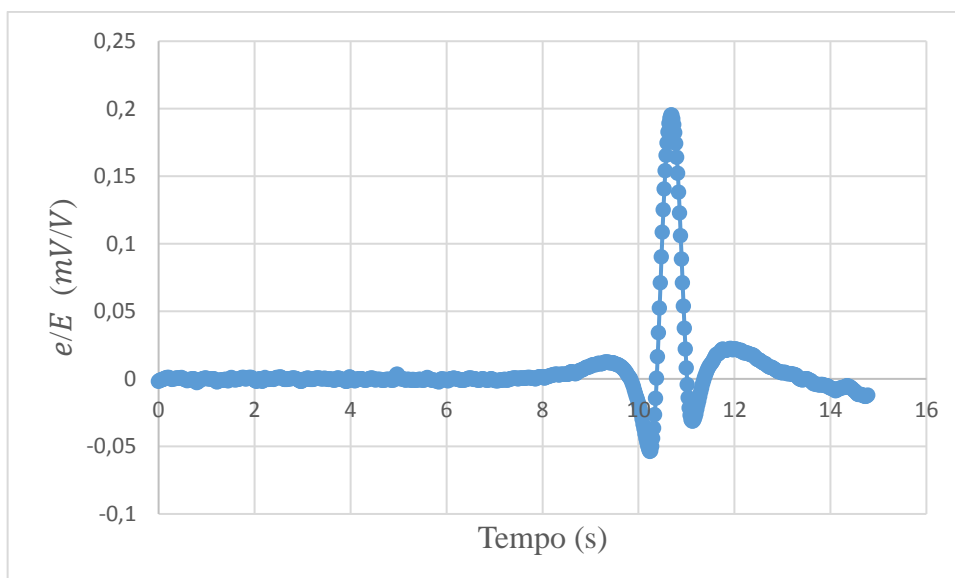


Figura 151 – Pulso de variação de tensão elétrica S03 T02 03 (11,54t).

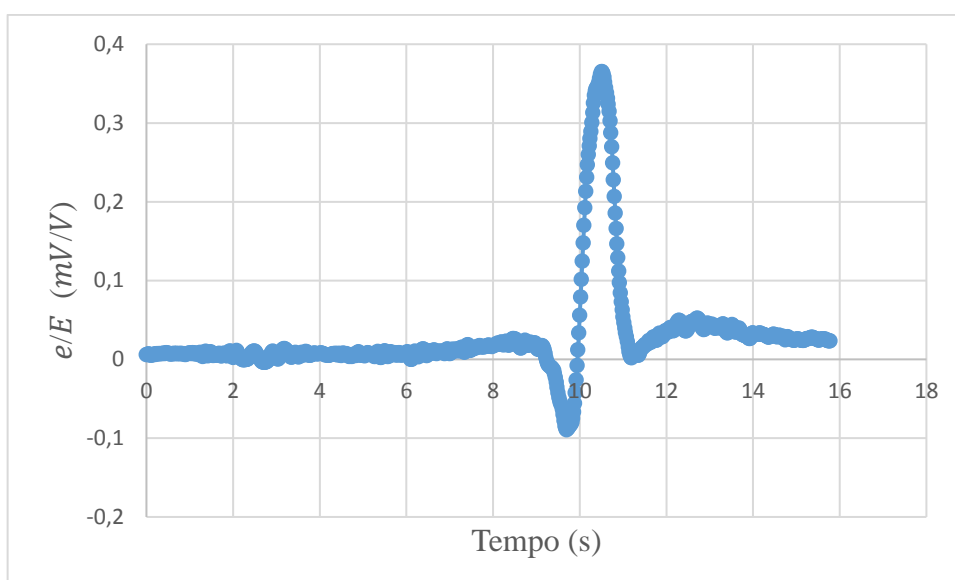


Figura 152 – Pulso de variação de tensão elétrica S04 T01 01 (11,54t).

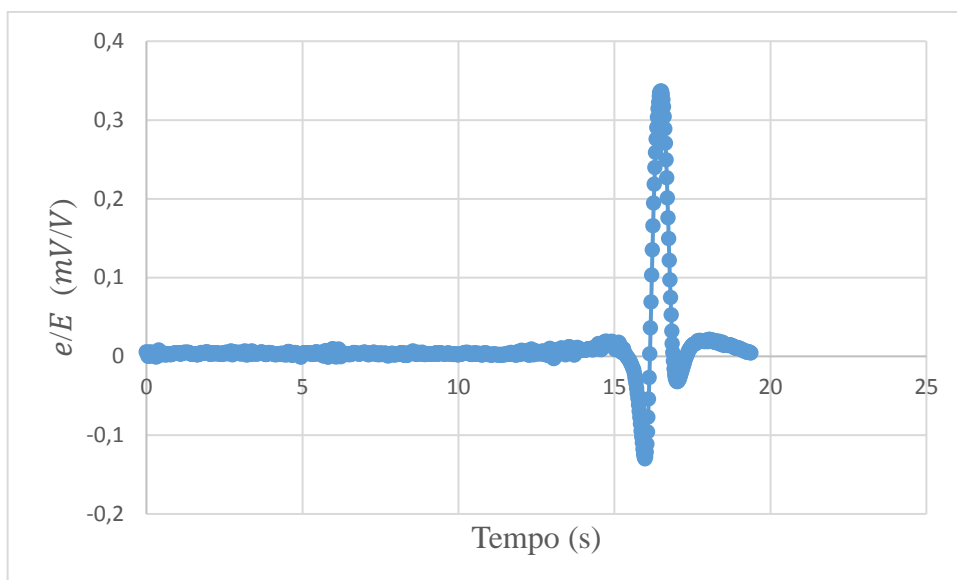


Figura 153 – Pulso de variação de tensão elétrica S04 T01 02 (11,54t).

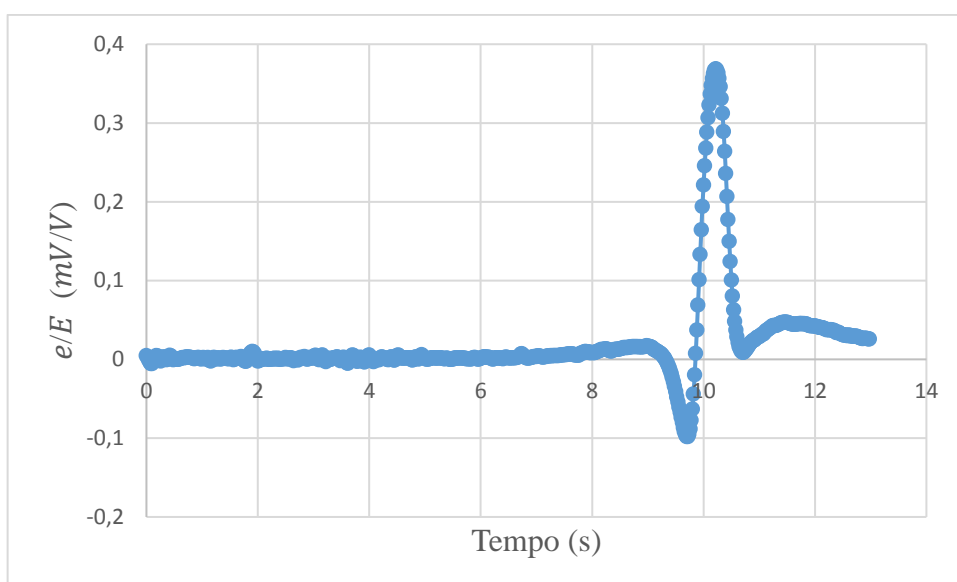


Figura 154 – Pulso de variação de tensão elétrica S04 T01 03 (11,54t).

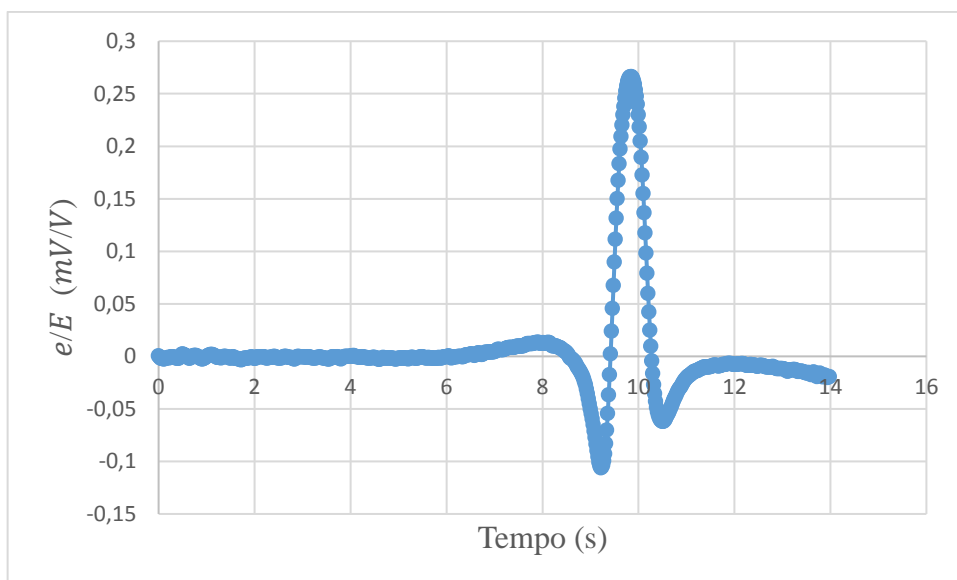


Figura 155 – Pulso de variação de tensão elétrica S04 T02 01 (11,54t).

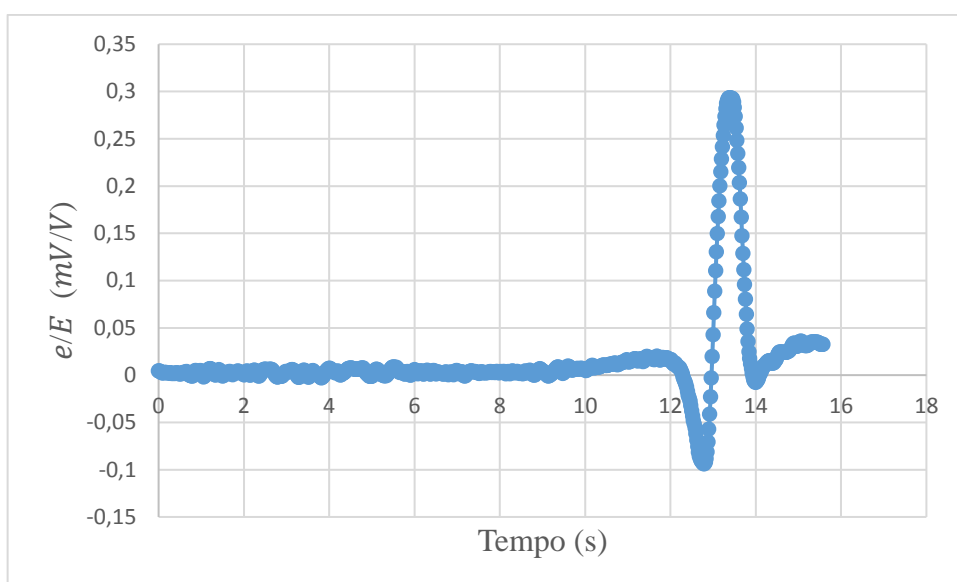


Figura 156 – Pulso de variação de tensão elétrica S04 T02 02 (11,54t).

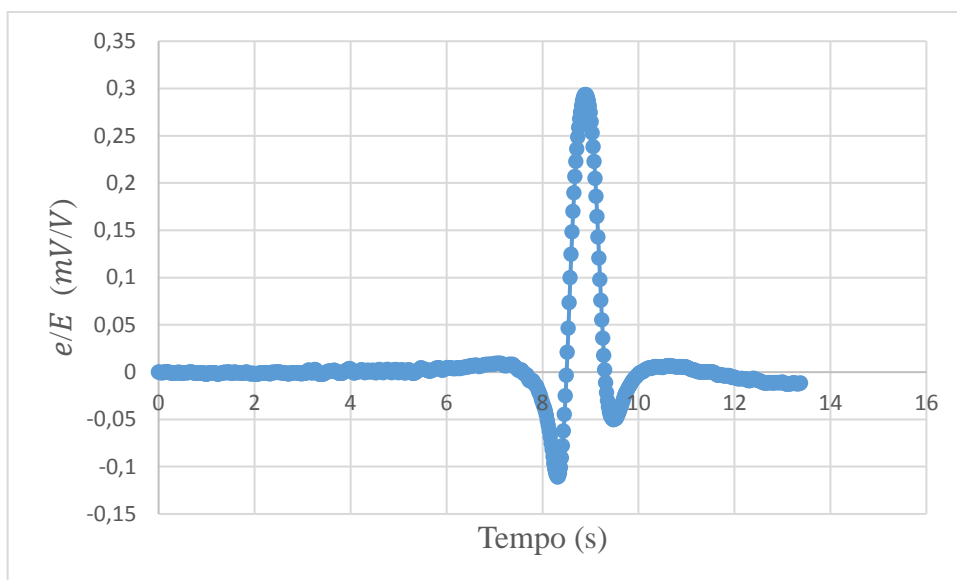


Figura 157 – Pulso de variação de tensão elétrica S04 T02 03 (11,54t).