

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GÉRIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

DANIEL BARBOSA BIANCHI

**ANÁLISE DE DESCARRILAMENTO DE VAGÕES ATRAVÉS DO COEFICIENTE
DE NADAL**

BELO HORIZONTE

2018

DANIEL BARBOSA BIANCHI

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no Curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais

Orientador: Leonardo Neves

Belo Horizonte

2018

DANIEL BARBOSA BIANCHI

**ANÁLISE DE DESCARRILAMENTO DE VAGÕES ATRAVÉS DO COEFICIENTE
DE NADAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no Curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais

Aprovado em 25/06/2018

BANCA EXAMINADORA

Prof. Leonardo Neves

Prof. Wellington Lopes

Prof. André Guimarães Ferreira

Resumo

Ferrovias são um eficiente meio de transporte de grandes volumes de carga pelo país. Uma das principais cargas transportadas no Brasil é o minério de ferro proveniente principalmente de Minas Gerais e do estado do Pará. O descarrilamento de vagões é um dos principais problemas encontrados nas estradas de ferro pelo país, causando paradas e bloqueios longos além de perdas materiais e acidentes fatais. Para avaliar a possibilidade de descarrilamento de uma composição, este trabalho utilizou a relação entre carga lateral por carga vertical da reação entre roda e trilho para determinar pontos na ferrovia onde há uma maior chance de acidente. Através de análise teórico experimental, foi observado uma maior chance de descarrilamento nos pontos nomeados de 11, 12 e 13 e as velocidades da composição que apresentam maiores uniformidades de carga entre ambos os trilhos foi de 40km/h.

Abstract

Railways are an efficient ways of transporting large volumes of cargo across the country. One of the main cargoes transported in Brazil is the iron ore originated mainly from Minas Gerais and the state of Pará. Problems of derailment of wagons are the main problems encountered in the country's railways. They generate long stops and blockages in addition to material losses and fatal accidents. In order to evaluate the possibility of derailment of a composition, this work used the relation between lateral loading by vertical load of the wheel-rail reaction to determine points in the railway where there is a greater chance of an accident. By means of experimental theoretical analysis, a greater chance of derailment at the named points of 11, 12 and 13 was observed and the velocities of the composition that presented greater uniformities of load between both rails were 40km / h.

Lista de Figuras

Figura 1 :Trecho instrumentado.....	10
Figura 2: Elementos da via permanente.	13
Figura 3: Elementos de composição do trilho.	13
Figura 4: Dinâmica de descarrilamento.....	14
Figura 5: Pontos de contato entre roda/trilho.	15
Figura 6: Contatos entre roda e trilho.....	15
Figura 7: Esquema das forças atuantes num vagão	16
Figura 8: Medição da variação das forças atuantes nos truques.....	17
Figura 9: Movimento de <i>hunting</i>	18
Figura 10: Circuito de ponte de wheatstone.	19
Figura 11: Sistema de aquisição de dados NI cDAQ-9172.....	20
Figura 12: Módulos NI 9236	21
Figura 13: Caixa de proteção do sistema de aquisição.....	22
Figura 14: Fixação dos cabos nos trilhos	22
Figura 15: Extensômetro fixado à estrutura do trilho, com uma proteção à base de silicone. .	24
Figura 16: Pontos de colagem dos extensômetros.....	25
Figura 17: Diagrama dos esforços atuantes no trilho.	27
Figura 18: Representação do diagrama de deformação nos extensômetros.	27
Figura 19: Deformação de carga vertical aplicada ao centro do trilho.....	29
Figura 20: Resultado das deformações para carga vertical excêntrica ao trilho.	30
Figura 21: Resultado da deformação para carga vertical mais excêntrica ao trilho	31
Figura 22: Ampliação do gráfico típico de uma composição,	33
Figura 23: Resultados da extensometria da composição 1 - Ponto 11 (Cidade)	33
Figura 24: Resultados da extensometria da composição 1 - Ponto 12 (Cidade)	34
Figura 25: Resultados da extensometria da composição 1 - Ponto 13 (Cidade)	34
Figura 26: Resultados da extensometria da composição1 - Ponto 17 (Rio).....	35
Figura 27: Resultados da extensometria da composição 2 - Ponto 11 (Cidade)	36
Figura 28: Resultados da extensometria da composição 2 - Ponto 12 (Cidade)	36
Figura 29: Resultados da extensometria da composição 2 - Ponto 13 (Cidade)	37
Figura 30: Resultados da extensometria da composição 2 - Ponto 17 (Rio).....	37
Figura 31: Resultados da extensometria da composição 3 - Ponto 11 (Cidade)	38
Figura 32: Resultados da extensometria da composição 3 - Ponto 12 (Cidade)	38
Figura 33: Resultados da extensometria da composição 3 - Ponto 13 (Cidade)	39
Figura 34: Resultados da extensometria da composição 3 - Ponto 17 (Rio).....	39
Figura 35: Pontos críticos no trecho instrumentado.	40
Figura 36: Resultados da extensometria para a velocidade de 60km/h - Ponto 11 (Cidade) ...	41
Figura 37: Resultados da extensometria para a velocidade de 60km/h - Deformação Vertical no Ponto 11	42
Figura 38: Resultados da extensometria para a velocidade de 60km/h - Ponto 12 (Cidade) ...	42
Figura 39: Resultados da extensometria para a velocidade de 60km/h - Deformações verticais no Ponto 12.....	43
Figura 40: Resultados da extensometria para a velocidade de 60km/h - Ponto 13 (Cidade) ...	43
Figura 41: Resultados da extensometria para a velocidade de 60km/h - Ponto 13 (Rio).....	44
Figura 42: Resultados da extensometria para a velocidade de 60km/h - Deformações verticais no Ponto 13.....	44
Figura 43: Resultados da extensometria para a velocidade de 50km/h - Ponto 11 (Cidade) ...	45

Figura 44: Resultados da extensometria para a velocidade de 50km/h - Deformações Verticais no Ponto 11	46
Figura 45: Resultados da extensometria para a velocidade de 50km/h - Ponto 12 (Cidade) ...	46
Figura 46: Resultados da extensometria para a velocidade de 50km/h - Deformações Verticais no Ponto 12.....	47
Figura 47: Resultados da extensometria para a velocidade de 50km/h - Ponto 13 (Cidade) ...	47
Figura 48: Resultados da extensometria para a velocidade de 50km/h - Ponto 13 (Rio).....	48
Figura 49: Resultados da extensometria para a velocidade de 50km/h - Deformações verticais no Ponto 13.....	48
Figura 50: Resultados da extensometria para a velocidade de 40km/h - Ponto 11 (Cidade) ...	49
Figura 51: Resultados da extensometria para a velocidade de 40km/h Deformações verticais do Ponto 11	50
Figura 52: Resultados da extensometria para a velocidade de 40km/h Ponto 12 (Cidade).....	50
Figura 53: Resultados da extensometria para a velocidade de 40km/h Deformações Verticais do Ponto 12.....	51
Figura 54: Resultados da extensometria para a velocidade de 40km/h Ponto 13 (Cidade).....	51
Figura 55: Resultados da extensometria para a velocidade de 40km/h Ponto 13 (Rio).....	52
Figura 56: Resultados da extensometria para a velocidade de 40km/h Deformações Verticais do Ponto 13.....	52
Figura 57: Aumento de carga devido a força nos engates do vagão.....	53
Figura 58: Resultados da extensometria da composição 1 - Ponto 6 (Cidade)	56
Figura 59: Composição 1 - Ponto 7 (Cidade).....	56
Figura 60: Resultados da extensometria da composição 1 - Ponto 8 (Cidade)	57
Figura 61: Composição 1 - Ponto 9 (Cidade).....	57
Figura 62: Resultados da extensometria da composição 1 - Ponto 10 (Cidade)	58
Figura 63: Composição 1 - Ponto 14 (Cidade).....	58
Figura 64: Resultados da extensometria da composição 1 - Ponto 16 (Cidade)	59
Figura 65: Composição 1 - Ponto 17 (Cidade).....	59
Figura 66: Resultados da extensometria da composição 1 - Ponto 18 (Cidade)	60
Figura 67: Composição 1 - Ponto 19 (Cidade).....	60
Figura 68: Resultados da extensometria da composição 1 - Ponto 7 (Rio).....	61
Figura 69: Composição 1 - Ponto 8 (Rio)	61
Figura 70: Resultados da extensometria da composição 1 - Ponto 9 (Rio).....	62
Figura 71: Resultados da extensometria da composição 1 - Ponto 13 (Rio).....	62
Figura 72: Resultados da extensometria da composição 1 - Ponto 14 (Rio).....	63
Figura 73: Resultados da extensometria da composição 1 - Ponto 13 (Rio).....	63
Figura 74: Resultados da extensometria da composição 1 - Ponto 16 (Rio).....	64
Figura 75: Resultados da extensometria da composição 1 - Ponto 18 (Rio).....	64
Figura 76: Resultados da extensometria da composição 1 - Ponto 19 (Rio).....	65
Figura 77: Resultados da extensometria da composição 1 - Ponto 20 (Rio).....	65
Figura 78: Resultados da extensometria da composição 2 - Ponto 6 (Cidade)	66
Figura 79: Resultados da extensometria da composição 2 - Ponto 16 (Cidade)	66
Figura 80: Resultados da extensometria da composição 2 - Ponto 17 (Cidade)	67
Figura 81: Resultados da extensometria da composição 2 - Ponto 6 (Rio).....	67
Figura 82: Resultados da extensometria da composição 2 - Ponto 7 (Rio).....	68
Figura 83: Resultados da extensometria da composição 2 - Ponto 9 (Rio).....	68
Figura 84: Resultados da extensometria da composição 2 - Ponto 13 (Rio).....	69
Figura 85: Resultados da extensometria da composição 2 - Ponto 20 (Rio).....	69
Figura 86: Resultados da extensometria da composição 3- Ponto 6 (Cidade)	70
Figura 87: Resultados da extensometria da composição 3- Ponto 8 (Cidade)	70

Figura 88: Resultados da extensometria da composição 3- Ponto 9 (Cidade)	71
Figura 89: Resultados da extensometria da composição 3- Ponto 10 (Cidade)	71
Figura 90: Resultados da extensometria da composição 3- Ponto 16 (Cidade)	72
Figura 91: Resultados da extensometria da composição 3- Ponto 18 (Cidade)	72
Figura 92: Resultados da extensometria da composição 3- Ponto 19 (Cidade)	73
Figura 93: Resultados da extensometria da composição 3- Ponto 6 (Rio).....	73
Figura 94: Resultados da extensometria da composição 3- Ponto 8 (Rio).....	74
Figura 95: Resultados da extensometria da composição 3- Ponto 13 (Rio).....	74
Figura 96: Resultados da extensometria da composição 3- Ponto 15 (Rio).....	75
Figura 97: Resultados da extensometria da composição 3- Ponto 16 (Rio).....	75
Figura 98: Resultados da extensometria da composição 3- Ponto 20 (Rio).....	76

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	OBJETIVOS	12
	2.1 Objetivos gerais.....	12
	2.2 Objetivos específicos.....	12
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
	3.1 Conceitos ferroviários.....	13
	3.2 Extensometria.....	18
4	METODOLOGIA	20
	4.1 Plano de instrumentação.....	20
	4.1.1 Sistema de aquisição de dados.....	20
	4.1.2 Caixa de proteção do sistema.....	22
	4.1.3 Cabeamento e fixação.....	22
	4.1.4 Banco de baterias.....	23
	4.1.5 Especificação detalhada dos sensores.....	23
	4.1.6 Modelo Computacional.....	23
	4.2 INSTALAÇÃO DOS SENSORES	24
	4.2.1 Instalação dos sensores, estruturas e equipamentos.....	24
	4.3 Aquisição e tratamento dos dados.....	25
	4.3.1 Aquisição dos dados.....	25
	4.3.2 Processamento do sinal.....	26
	4.4 Análise das velocidades de operação.....	26
5	RESULTADOS	28
	5.1 Análise do modelo computacional.....	28
	5.2 Análise experimental da via.....	32
	5.2.1 Composição 1.....	32
	5.2.2 Composição 2.....	35
	5.2.3 Composição 3.....	38
	5.2.4 Velocidade de 60km/h.....	40
	5.2.5 Velocidade de 50km/h.....	45
	5.2.6 Velocidade de 40km/h.....	49
6	CONCLUSÃO	54
7	BIBLIOGRAFIA	55
8	APÊNDICE I – RESULTADOS DA ANÁLISE DA VIA FÉRREA	56
	8.1 Composição 1.....	56
	8.2 Composição 2.....	66
	8.3 Composição 3.....	70

1 INTRODUÇÃO

O presente projeto refere-se à instrumentação, via extensometria, de trecho da via férrea para avaliação de descarrilamentos de vagões carregados de minério de ferro.

O trecho da via avaliado é mostrado na Figura 1.

Figura 1 :Trecho instrumentado.



Fonte própria

O trecho instrumentado não possui diferença de topografia entre os trilhos, é reto e está compreendido entre duas curvas.

O intuito de se realizar o presente estudo é avaliar se ocorrem cargas excessivas nos trilhos na passagem da composição visto que no trecho há elevada ocorrência de descarrilamentos.

A avaliação destas cargas de reação devido ao contato entre roda e trilho determinam a possibilidade de descarrilamento de vagões. Em 1908, M. J. Nadal propôs uma fórmula chamada de coeficiente de Nadal que avalia a chance de uma roda superar a força de atrito com o trilho e iniciar um movimento de ascensão causando o descarrilamento. Essa fórmula é a razão entre carga lateral pela carga vertical.

A análise inicial é feita empiricamente calculando-se o coeficiente de Nadal através da geometria de contato entre a roda e o trilho e os coeficientes de atrito. Contudo, efeitos abrasivos, do desgaste devido ao contato entre os componentes, intempéries, desnível de

trilhos, mudanças na compactação do lastro e falhas mecânicas podem influenciar alterações na interface roda-trilho, podendo ocasionar no ambiente real, mudanças nos valores de Nadal.

Possíveis problemas que podem ocorrer para um aumento do coeficiente de Nadal são problemas de desgaste do trilho ou da roda do vagão, desnivelamentos do trilho, efeitos dinâmicos do vagão em torno de seu eixo, deformações laterais do trilho, aumento da velocidade de passagem da composição amplificando efeitos dinâmicos horizontais e verticais.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivos gerais

O objetivo deste trabalho é realizar uma análise estrutural teórica-experimental para avaliação das cargas verticais e laterais atuantes durante a passagem de composições carregadas na estrada de ferro para estabelecer parâmetros que influenciam no descarrilamento de vagões no trecho avaliado.

2.2 Objetivos específicos

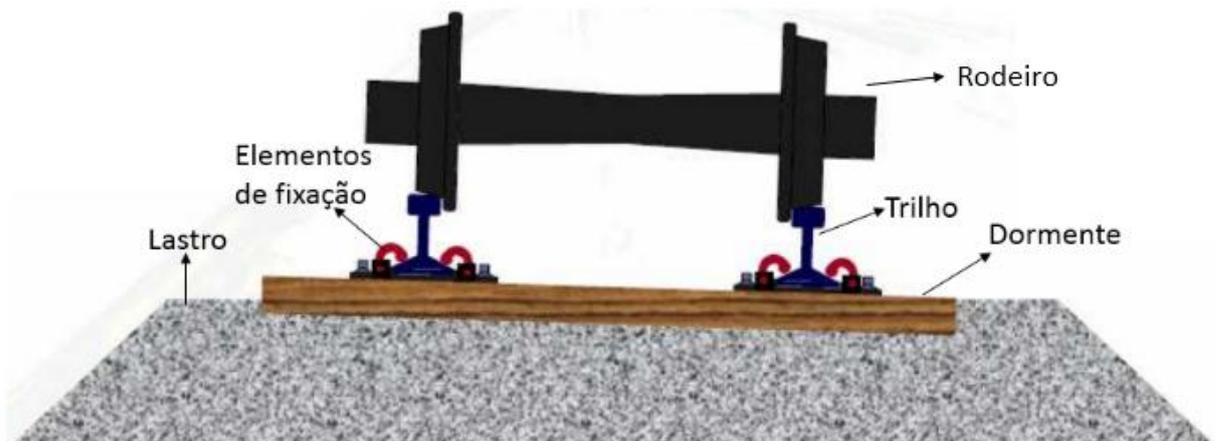
Os objetivos específicos deste trabalho visa avaliar os trechos da ferrovia que apresentam elevado valor de coeficiente de Nadal verificando a influencia das velocidades de operação da composição e os trechos da ferrovia que apresentam chances reais de descarrilamento através da razão entre cargas laterais e cargas verticais.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Conceitos ferroviários

As estradas de ferro, também chamadas de vias permanentes são compostas por duas vigas metálicas apoiadas sobre dormentes que transferem esta carga para o lastro, podendo ser rígido ou não. A Figura 2 ilustra os principais componentes da via (COIMBRA, 2008).

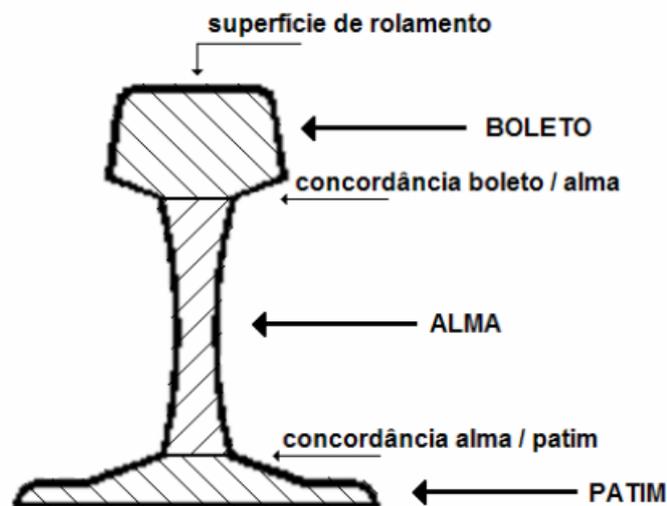
Figura 2: Elementos da via permanente.



Fonte: MACEDO (2009). Adaptado

O trilho é composto por 3 elementos sendo eles o bolete, a alma e o patim conforme Figura 3 (COIMBRA, 2008).

Figura 3: Elementos de composição do trilho.



Fonte: COIMBRA (2008)

O boleto é a região superior do trilho onde ocorre o contato com o equipamento rodante. A alma é a região de conexão entre o boleto e o patim. O patim é a região inferior do trilho onde este se apoia sobre o dormente, transferindo a carga para o solo.

Os trilhos são geralmente feitos em aço carbono, resistentes a abrasão e corrosão e seguem normas específicas em diferentes países entre as quais podem-se citar a American Railway Engineering and Maintenance (AREMA), American Society of Civil Engineers (ASCE), Deutsches Institut für Normung (DIN) e American Society of Testing and Materials (ASTM).

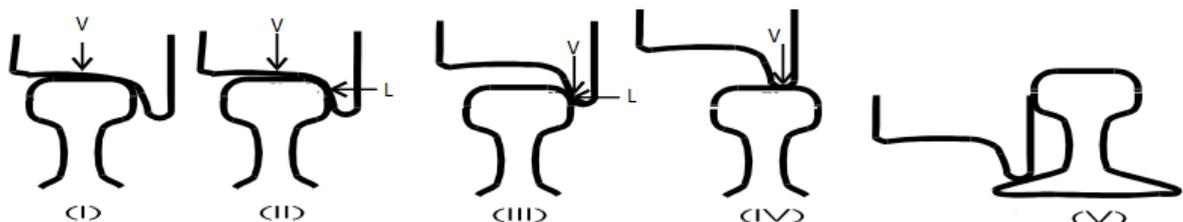
O dormente possui a função de transmitir os esforços ao lastro e suportar o trilho. O dormente pode ser produzido em madeira, concreto ou aço e deve possuir rigidez suficiente para transmitir e suportar os esforços sobre ele. O lastro é a região entre os dormentes e o solo e drenar a água da chuva. Este componente da via permanente pode ser elástico se for constituído de material particulado ou rígido se for de concreto (COIMBRA, 2008).

Descarrilamentos de composições em vias férreas ocasionam sérias ocorrências que devem ser investigadas, pois além de perdas materiais e interrupção da via, podem causar perdas humanas. Para a investigação de descarrilamentos, os principais pontos a serem observados são o aumento de carga no flange da roda, diminuição da carga vertical e aumento do ângulo de ataque das rodas (MAHARAJPUR, 2011).

Um dos métodos para se avaliar o descarrilamento foi proposto por Nadal que correlaciona os valores em kgf de carga lateral (L) e vertical (V) (L/V). Quando este coeficiente supera o limite de Nadal, ocorre um deslocamento de baixo para cima do flange da roda sobre o trilho, ocasionando o descarrilamento. (MARQUIS, 2011).

A Figura 4 apresenta o mecanismo de descarrilamento ao qual se aplica a condição de Nadal onde “V” é a carga vertical e “L” a carga lateral (MAHARAJPUR, 2011).

Figura 4: Dinâmica de descarrilamento.



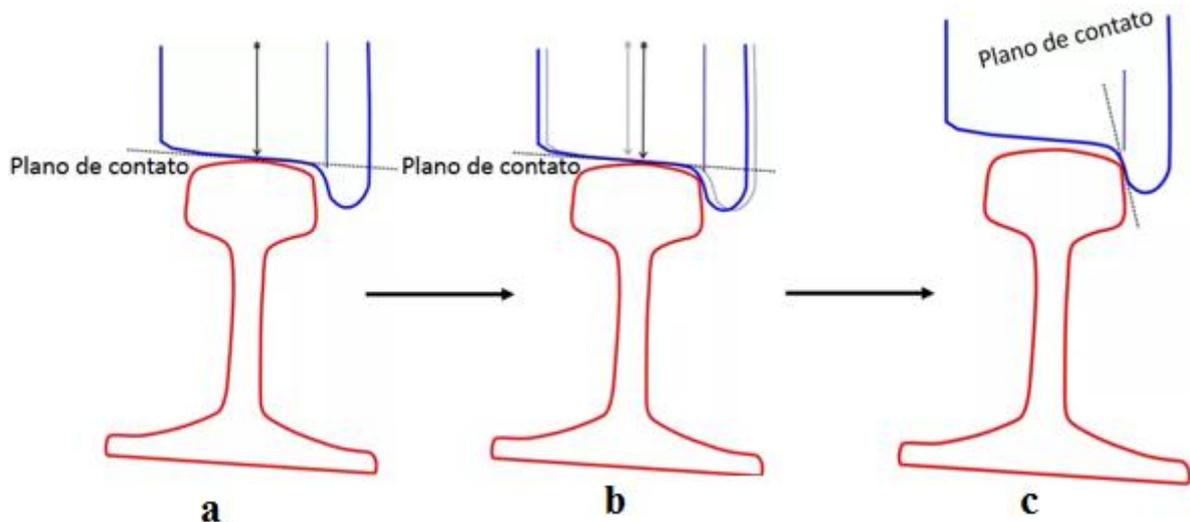
Fonte: MAHARAJPUR (2011)

A fórmula de Nadal foi baseada na simples analogia de um bloco com atrito subindo em um plano inclinado. Para ferrovias indianas e empresas brasileiras, para que não haja o descarrilamento, o coeficiente de Nadal não deve exceder o valor de 0,8.

Além dos valores aceitáveis para o coeficiente L/V , outro fator importante durante o descarrilamento, é o tempo em que ocorre a condição crítica de descarrilamento. Quanto maior o tempo em que ocorre um elevado valor do coeficiente L/V , maior é o movimento ascendente do flange da roda sobre o trilho como visto na Figura 4.

Outro fator de influência são os pontos de contato entre roda trilho e desgaste dos componentes. Os pontos de contato entre roda e trilho influenciam na deformação da via devido a excentricidade da carga lateral causando torção no trilho. A Figura 5 apresenta alguns dos pontos de contato da roda no trilho. A Figura 5-a apresenta cargas verticais atuantes no topo do trilho com ponto de contato centralizado. A Figura 5-b apresenta 2 pontos de contatos distintos; o primeiro relativo a carga vertical fora do eixo e o segundo do contato entre flange da roda e trilho. A Figura 5-c apresenta um ponto único de contato onde atuam as cargas verticais e laterais, com a composição tendendo ao descarrilamento (MACEDO, 2009).

Figura 5: Pontos de contato entre roda/trilho.

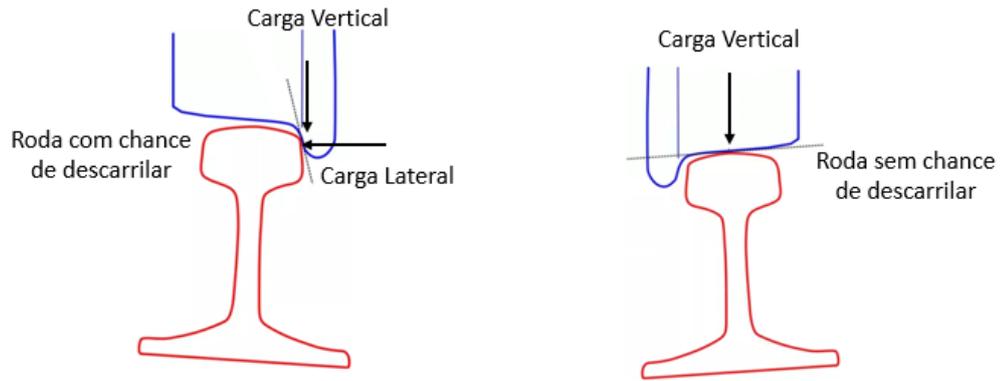


Fonte: MARQUIS (2011)

Cada roda da composição possui um desgaste diferente gerando pontos de contato distintos e diferentes esforços no trilho.

A Figura 6 apresenta dois tipos de contato entre roda trilho. O ponto de contato mais centralizado sem contato do flange da roda com o trilho e um ponto de contato na qual a chance de descarrilamento é maior, com o flange da roda em contato direto com a superfície do trilho aumentando a carga lateral (MAHARAJPUR, 2011).

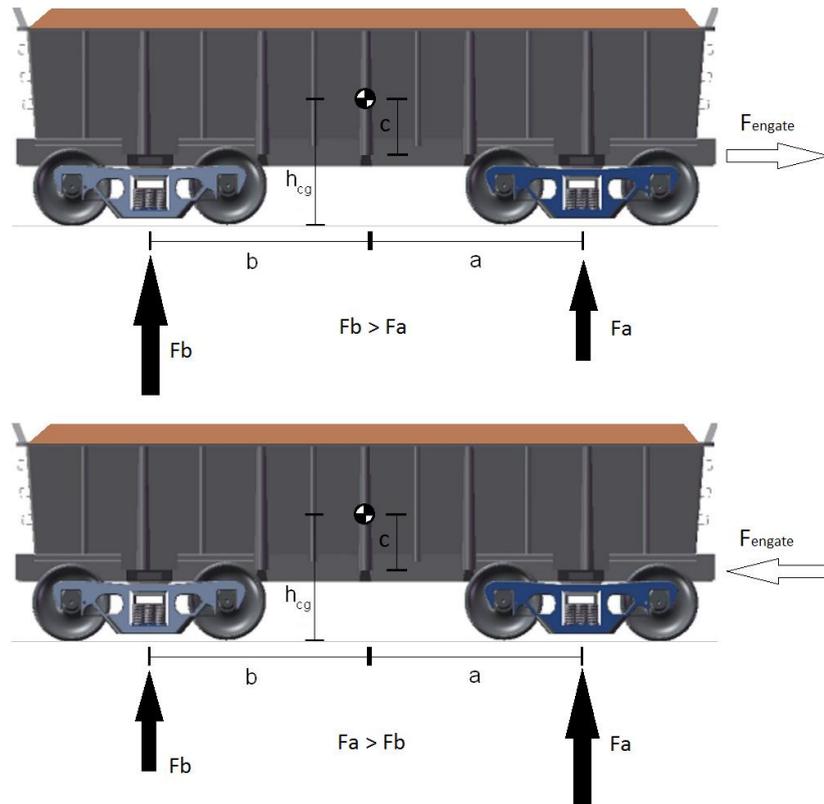
Figura 6: Contatos entre roda e trilho.



Fonte: MAHARAJPUR (2011) Adaptado

Os efeitos dos carregamentos dinâmicos na via devido à passagem da composição podem acarretar em um aumento ou diminuição de carga atuante nos eixos dianteiro e traseiro do vagão. Este efeito dinâmico que influencia diretamente na carga vertical é denominado movimento de *pitch*, e é induzido devido a imperfeições na via, carregamento assimétrico e devido a força nos engates dos vagões. A Figura 7 exemplifica esta diferença de carga nos truques devido às forças no engate.

Figura 7: Esquema das forças atuantes num vagão



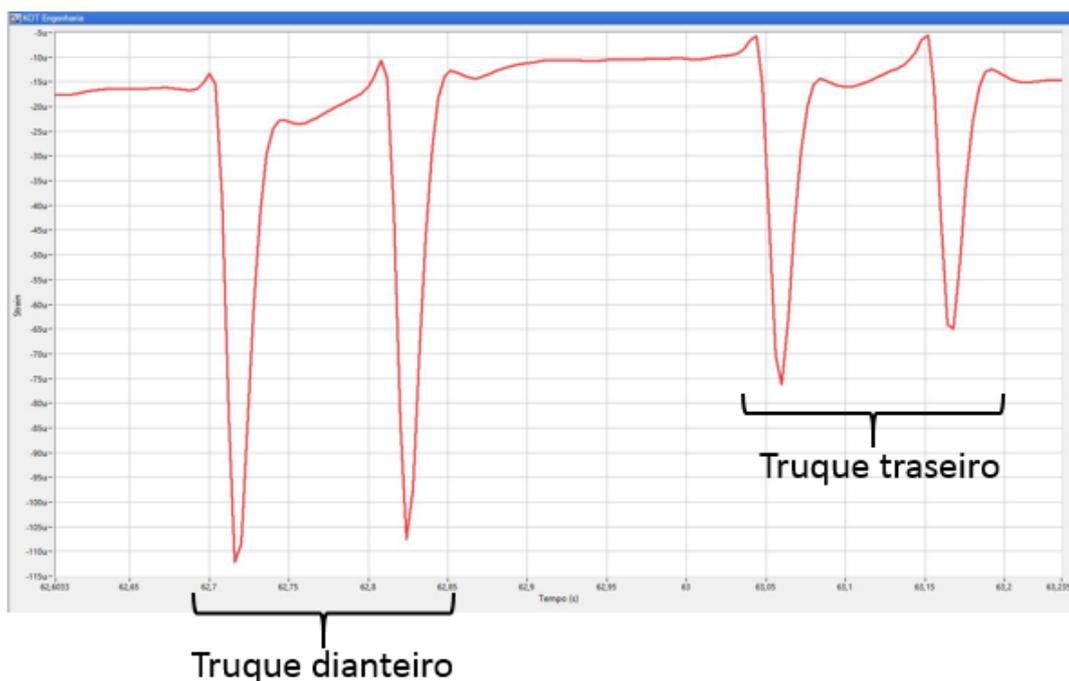
Fonte própria

Onde:

- “ h_{cg} ” é a altura do centro de gravidade;
- “ a ” e “ b ” são as distâncias do ponto de aplicação da carga resultante em cada rodeiro a metade do vagão;
- “ c ” é a altura do centro de massa do vagão;
- “ F_a ” e “ F_b ” são as forças resultantes no vagão.

Este carregamento pode ser visível nas deformações causadas tipicamente por cargas verticais medidas na via como mostra a Figura 8. É possível observar as deformações típicas geradas pelas 4 rodas de um vagão. Cada vale da imagem refere-se à deformação causada no trilho devido a passagem de uma roda. Como pode ser observado, os truques sofrem deformação diferentes devido aos efeitos dinâmicos do vagão (McCLANACHAN, 2002).

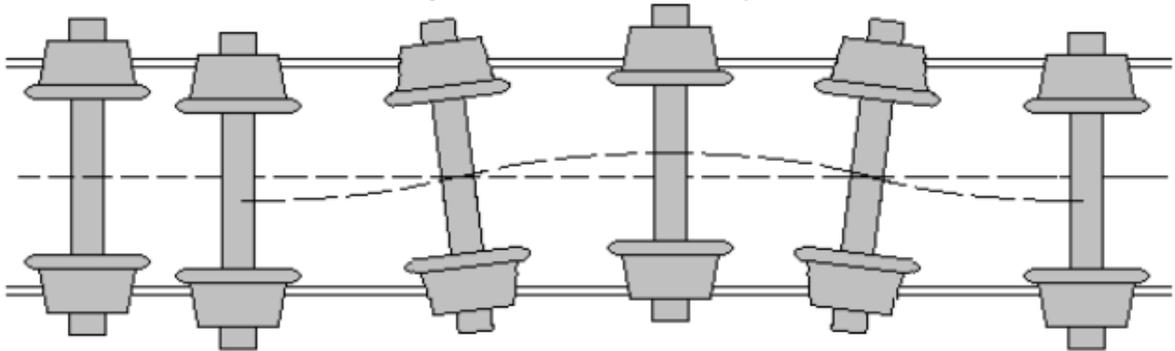
Figura 8: Medição da variação das forças atuantes nos truques.



Fonte própria

Pode-se observar que estes efeitos dinâmicos diminuem a carga vertical momentaneamente em algumas rodas, ou seja, aumentam o valor do coeficiente de L/V , ocasionando uma maior chance de descarrilamento.

Além do movimento de *pitch*, o movimento de *hunting* também tem significativa influência no aumento das cargas atuantes. Este movimento é representado na Figura 9 ilustrando o vagão serpenteando pela via permanente.

Figura 9: Movimento de *hunting*.

Fonte: MAZILU (2009)

3.2 Extensometria

A extensometria utiliza componentes eletrônicos chamados extensômetros elétricos ou *strain gages* que transformam a diferença de resistência em seu interior em um sinal analógico traduzido em forma de deformação.

A extensometria por se tratar de um ensaio não destrutivo é amplamente utilizada em campo e laboratórios para avaliação de carregamentos em estruturas metálicas, concretos entre outros. Existem diversos modelos de *strain gages* no mercado sendo os principais, extensômetros uniaxiais e rosetas.

Os extensômetros uniaxiais possuem um vetor preferencial de deformação, ou seja, medem as deformações ao longo de um único eixo. São amplamente utilizados para medições diretas de tração e compressão e quando utilizado em conjuntos de dois extensômetros, são capazes de medir também a flexão da estrutura.

Extensômetros ou *strain gages* são pequenos resistores elétricos que podem ser fixadas em uma estrutura e, ao se aplicar uma carga nesta estrutura deformando-a, o sensor também sofre deformação, podendo-se então, se estimar a carga aplicada no regime elástico através da lei de Hooke expressa pela equação abaixo.

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

onde:

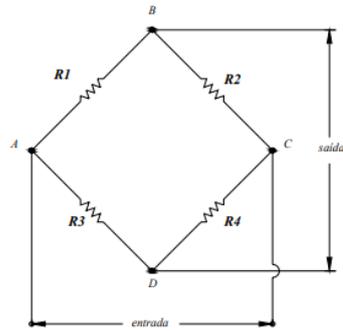
σ é a tensão;

E é o módulo de elasticidade do material;

ε é a deformação lida no extensômetro

O extensômetro é baseado no princípio em que um metal, ao deformar, altera sua resistência elétrica. Ao se ligarem 4 resistências em um circuito chamado ponte de wheatstone, pode-se definir que a variação da tensão elétrica na saída do circuito é proporcional a deformação que o sensor sofreu. A Figura 10 apresenta o circuito em questão.

Figura 10: Circuito de ponte de wheatstone.



Fonte: ANDOLFATO (2004)

4 METODOLOGIA

A metodologia adotada durante o desenvolvimento deste trabalho será apresentada em três partes: plano de instrumentação, instalação dos sensores e processamento dos dados.

A instrumentação foi realizada pela KOT Engenharia, empresa prestadora de serviços de consultoria e elaborada por um corpo técnico ao qual o autor deste trabalho se fez presente.

4.1 Plano de instrumentação

A seguir, serão apresentados os sistemas utilizados para a aquisição de dados assim como as fontes de energia e os sistemas de proteção.

4.1.1 Sistema de aquisição de dados

O sistema de aquisição selecionado é o sistema autônomo NI cDAQ-9172, da National Instruments, específico para medições em tempo real e embarcadas com registro de dados, mostrado na Figura 11.

Figura 11: Sistema de aquisição de dados NI cDAQ-9172.



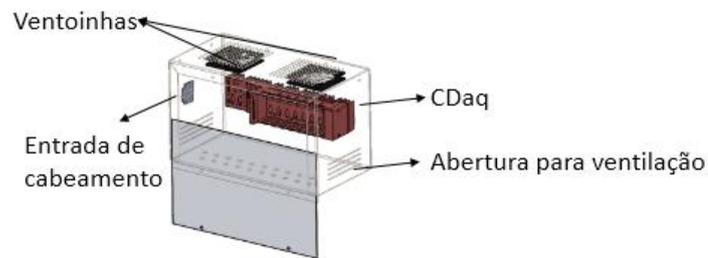
Fonte: National Instruments

Este sistema foi acoplado a um computador (NUC) e permitiu o registro dos dados em tempo real. Os módulos individuais para medição de deformação mostrado na Figura 12, são acoplados ao sistema de aquisição NI cDAQ-9172 para a obtenção dos sinais analógicos dos sensores instalados no trilho.

4.1.2 Caixa de proteção do sistema

O sistema de aquisição de dados foi montado no interior de uma caixa de proteção, fabricada em aço conforme ilustrado na Figura 13.

Figura 13: Caixa de proteção do sistema de aquisição.



Fonte própria

As aberturas para ventilação necessária estabelecem que a caixa de proteção mecânica deva permanecer isenta da incidência direta de água, a fim de evitar danos ao sistema. Para tal, a caixa foi posicionada próxima ao gabarito da via permanente sob uma lona impermeável.

4.1.3 Cabeamento e fixação

Para realizar a interligação dos extensômetros com o sistema de aquisição, foram utilizados cabos manga blindados com tranças de cobre e bitola 26 AWG.

Para a fixação dos cabos, são utilizadas abraçadeiras plásticas de Nylon envolvendo os cabos e o grampo do trilho (Figura 14).

Figura 14: Fixação dos cabos nos trilhos



Fonte própria

4.1.4 Banco de baterias

Para atender a demanda energética, pode-se utilizar baterias comerciais empregadas em frotas de caminhões. Com estas baterias de tensão nominal igual a 12 V, foram realizadas ligações em paralelo para alimentação do sistema.

As baterias são então montadas em visando a obter a autonomia desejada. Utilizando seis baterias com capacidade de 100 Ah em cada, e considerando uma profundidade de carga de 80% das baterias, tem-se uma reserva de energia de $6 \times 0,8 \times 100 \text{ Ah} = 480 \text{ Ah}$, que atende às necessidades desta instrumentação com uma margem de segurança.

4.1.5 Especificação detalhada dos sensores

A medição da deformação deve ser realizada por extensômetros elétricos resistivos encapsulados, fornecidos com fios revestidos soldados nos terminais, fabricados pela Excel Sensores, detalhados na Tabela 3.

Tabela 3: Modelos dos sensores de deformação.

Tipo de sensor de deformação	Modelo selecionado	Resistência elétrica
Extensômetro uniaxial	PA-06-500BA-350-LEN	350 Ω

4.1.6 Modelo Computacional

O modelo computacional em elementos finitos utilizados foi desenvolvido pela KOT Engenharia. Ele foi cedido para a presente análise sem especificações técnicas sobre o seu desenvolvimento.

4.2 Instalação dos sensores

A seguir serão apresentados as técnicas utilizadas para a instalação dos sensores de deformação.

4.2.1 Instalação dos sensores, estruturas e equipamentos

O procedimento adotado para a instalação dos extensômetros seguiu as recomendações da bibliografia técnica aplicável, compreendendo as etapas:

- Remoção da camada superficial de tinta e oxidação;
- Regularização da superfície e adequação da rugosidade;
- Marcação das linhas de posicionamento;
- Limpeza para remoção de óleos, poeiras e demais contaminantes;
- Colagem do sensor utilizando adesivo à base de cianoacrilato;
- Proteção do sensor contra choques mecânicos leves e infiltração de água;
- Interligação com o sistema de aquisição de dados.

É possível observar o extensômetro instalado na Figura 15.

Figura 15: Extensômetro fixado à estrutura do trilho, com uma proteção à base de silicone.



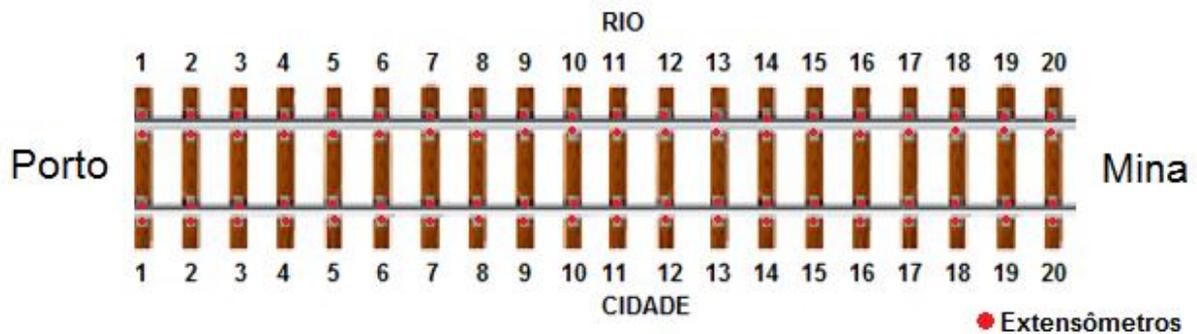
Fonte própria

Foram instalados sensores em ambos os lados dos trilhos em 20 dormentes consecutivos e a nomenclatura dada foi ao trilho próximo a margem do rio chamado de trilho

rio e o trilho oposto a margem como trilho cidade sendo 80 extensômetros uniaxiais, 20 em cada um dos lados dos dois trilhos em 20 dormentes consecutivos. A Figura 16 mostra o esquema de instrumentação com as nomenclaturas utilizadas para a análise.

A incerteza da medição dos sensores é variável para o conjunto, dependendo de fatores como comprimento dos cabos, rugosidade superficial do trilho, equipamentos geradores de ondas eletromagnéticas entre outros.

Figura 16: Pontos de colagem dos extensômetros



Fonte própria

4.3 Aquisição e tratamento dos dados

A seguir será apresentada a metodologia para o tratamento dos sinais e pós processamento dos mesmos.

4.3.1 Aquisição dos dados

Os valores de deformação, foram gravados em mídia digital pelo sistema de aquisição NI cDAQ-9172 com uma taxa de aquisição igual a 250 Hz sendo o sistema controlado por um software elaborado especificamente para este projeto em linguagem java com frequência de aquisição de 250 Hz foi definida através do cálculo entre a distância entre rodas do vagão com velocidade máxima de 100 km/h.

Para conferir maior segurança à integridade dos dados gravados, os arquivos têm duração máxima de 15 minutos de forma a minimizar o volume de dados perdidos na possível ocorrência de um erro.

O programa responsável pela monitoração e registro dos dados foi desenvolvido utilizando a plataforma LabView, e é executado continuamente pelo sistema operacional Real Time (RTOS).

4.3.2 Processamento do sinal

Os sinais armazenados em arquivos de texto foram primeiramente processados através do software LabView Signal Express[®]. Os passos do tratamento de dados foram:

- Identificação dos trechos com passagem de composição;
- Identificação das composições carregados;
- Tratamento das histereses dos dados obtidos;
- Aplicação de um filtro do tipo *butterworth lowpass* de 25Hz;
- Identificação e separação das composições por velocidade.

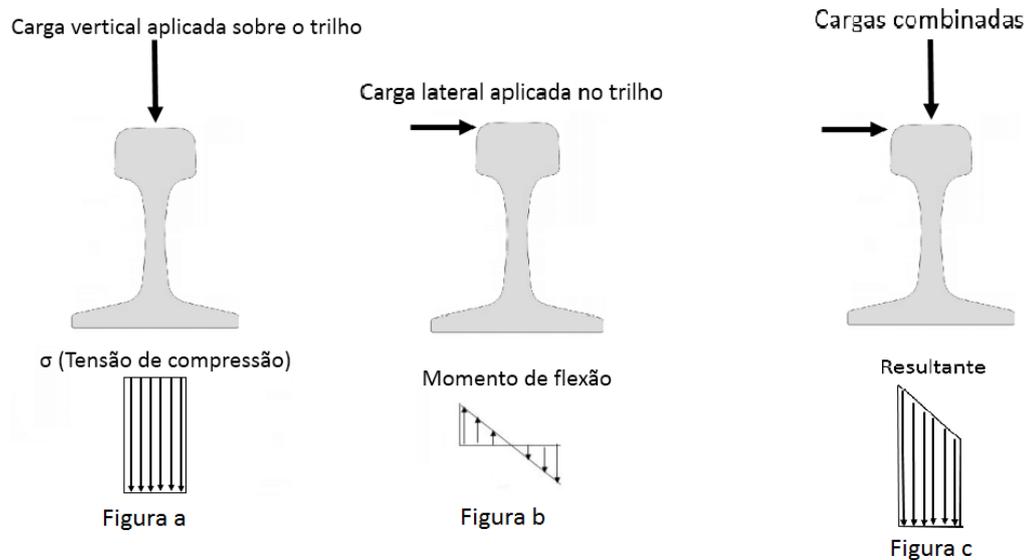
Os sinais tratados foram pós-processados utilizando o software LabView Signal Express[®] para visualização em forma gráfica e para obtenção dos valores de deformação de pico.

4.4 Análise das velocidades de operação

A análise a partir das velocidades de operação foi realizada com base nas deformações verticais obtidas através da extensometria. Durante a medição, os extensômetros instalados nas laterais do trilho conseguiram medir os esforços devido a compressão pura e esforços de flexão causados pela excentricidade da carga vertical e pela aplicação da carga lateral.

As diferentes cargas que atuam no trilho são mostradas na Figura 17. A Figura 17a é a tensão devido ao esforço vertical, a Figura 17b é o momento devido a carga lateral e a Figura 17c é a resultante destas duas forças.

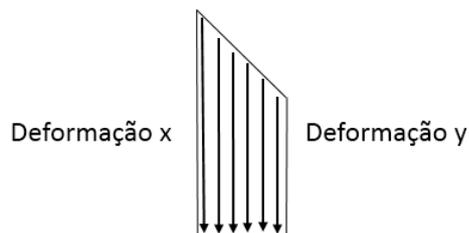
Figura 17: Diagrama dos esforços atuantes no trilho.



Devido a este efeito combinado, os extensômetros instalados em cada face do trilho apresentam comportamentos distintos. Ao se isolar os efeitos da carga lateral e da excentricidade da carga vertical podem ser obtidos os esforços de compressão pura sobre o dormente, causados unicamente pela carga vertical no trilho.

Para se isolar a componente de flexão, utilizou-se análise geométrica tomando-se a média simples das deformações dos extensômetros como mostrada na Figura 18.

Figura 18: Representação do diagrama de deformação nos extensômetros.



A equação para a deformação causada pela carga vertical é:

$$\frac{(x+y)}{2}$$

Onde:

x é a deformação obtida pelo extensômetro interno;

y é a deformação obtida pelo extensômetro externo.

5 RESULTADOS

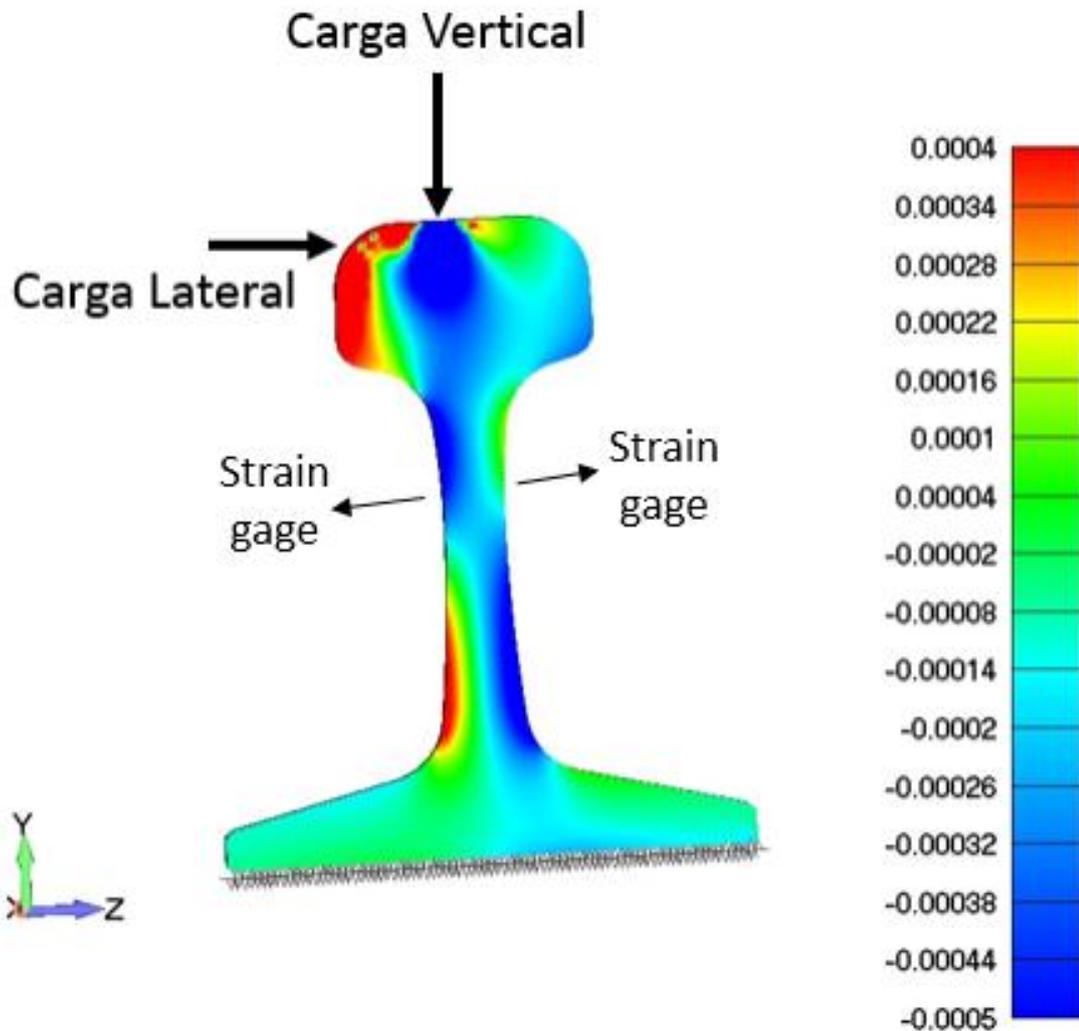
A seguir são apresentados os resultados obtidos na análise do modelo computacional, análises do trilho com a passagem de 3 composições e a análise das velocidades de operação da ferrovia.

5.1 Análise do modelo computacional

A análise do modelo computacional foi realizada aplicando-se uma carga de 148N no sentido vertical e cargas laterais equivalentes a 80% da carga vertical em 3 modos de contato roda-trilho. A carga vertical foi determinada através do peso bruto do vagão carregado (109kg) obtido através de balanças durante o carregamento do vagão. Este valor foi multiplicado pelo fator 1,1 representando o fator de amplificação dinâmico encontrando-se uma carga de 121kg. Distribuindo-se esta carga nas 8 rodas do vagão, obtém-se o valor de 148N.

A Figura 19 apresenta o resultado para a carga vertical aplicada próximo a linha central do trilho.

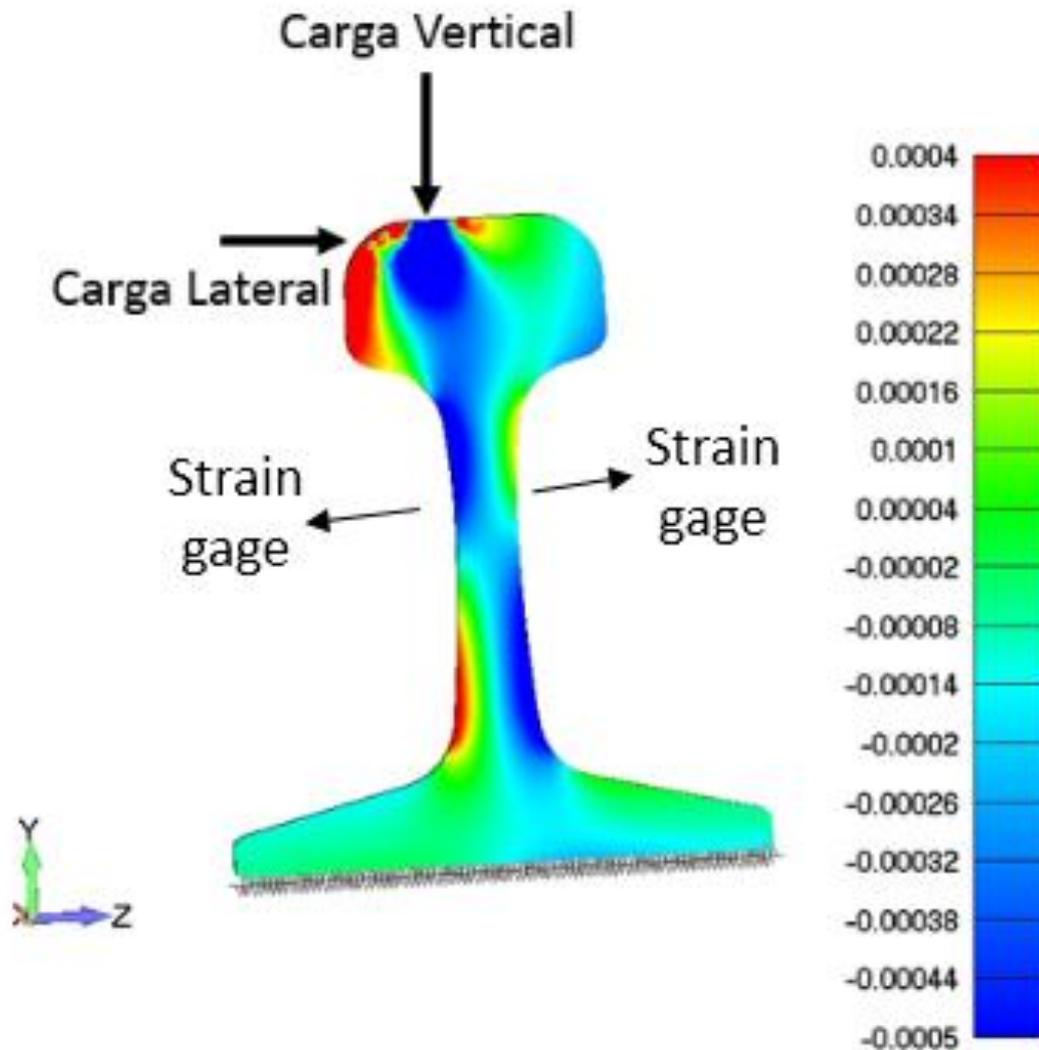
Figura 19: Deformação de carga vertical aplicada ao centro do trilho.



A região instrumentada de deformação positiva (tração) foi o lado externo do trilho atingindo valores de aproximadamente $100\mu\text{strain}$ e a região instrumentada interna do trilho obteve deformação negativa (compressão) atingindo valores de aproximadamente $-320\mu\text{strain}$.

A Figura 20 apresenta o resultado das deformações obtidas aumentando-se a excentricidade de aplicação da carga vertical.

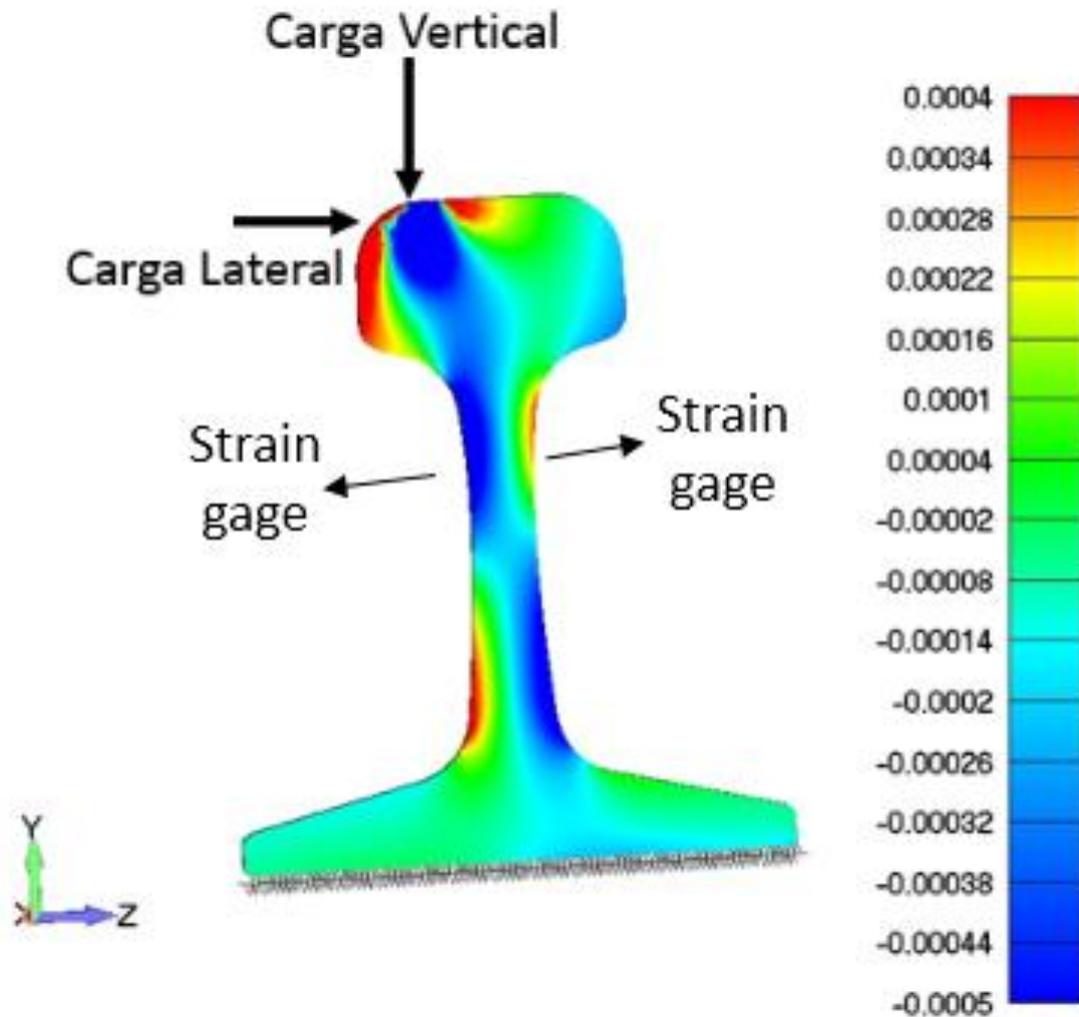
Figura 20: Resultado das deformações para carga vertical excêntrica ao trilho.



A região instrumentada de deformação positiva (tração) foi o lado externo do trilho atingindo valores de aproximadamente $200\mu\text{strain}$ e a região instrumentada interna do trilho obteve deformação negativa (compressão) atingindo valores de aproximadamente $-400\mu\text{strain}$.

A Figura 21 apresenta os resultados de deformação para a carga vertical mais excêntrica possível com contato real entre flange e trilho, considerando um fator L/V de 0,8. Esta foi a condição definida para a análise realizada.

Figura 21: Resultado da deformação para carga vertical mais excêntrica ao trilho



A região instrumentada de deformação positiva (tração) foi o lado externo do trilho atingindo valores de aproximadamente $250\mu\text{strain}$ e a região instrumentada interna do trilho obteve deformação negativa (compressão) atingindo valores de aproximadamente $-480\mu\text{strain}$.

É possível observar que a aplicação de cargas excêntricas no trilho gera efeitos locais de torção próximo ao boleto. As maiores deformações resultantes no modelo, na região de tração onde foram instalados os strain gages, quando aplicadas cargas referentes a $0,8 L/V$ foram de $250\mu\text{strain}$ no modo de contato de maior excentricidade de contato entre roda e trilho.

Para a presente análise, serão discutidos somente os pontos em que ocorre maior excentricidade da carga vertical, pois são os pontos onde ocorrem contato entre o flange da roda e o trilho, indicando um possível movimento ascendente do vagão, ou seja, um indicativo de condição de descarrilamento. O valor de deformação de $250\mu\text{strain}$ foi definido

como o limite aceitável para o coeficiente de Nadal com valor de 0,8 na medição para que não ocorra um possível início de movimento de subida do flange da roda no trilho.

Demais pontos são impossíveis de prever devido a alguns fatores que afetam os valores de deformação medidos devido aos efeitos combinados das cargas laterais e verticais, causando efeitos de torção, momentos fletores locais e globais das cargas como o contato entre roda e trilho e o desgaste de cada roda das composições medidas durante a aquisição dos dados.

5.2 Análise experimental da via

A presente análise será baseada nos resultados de deformação obtidos na medição realizada, comparando-os com as deformações obtidas no modelo computacional para se assumir os valores do coeficiente de L/V para o modo de contato de maior excentricidade de carga vertical com contato entre flange e trilho.

5.2.1 Composição 1

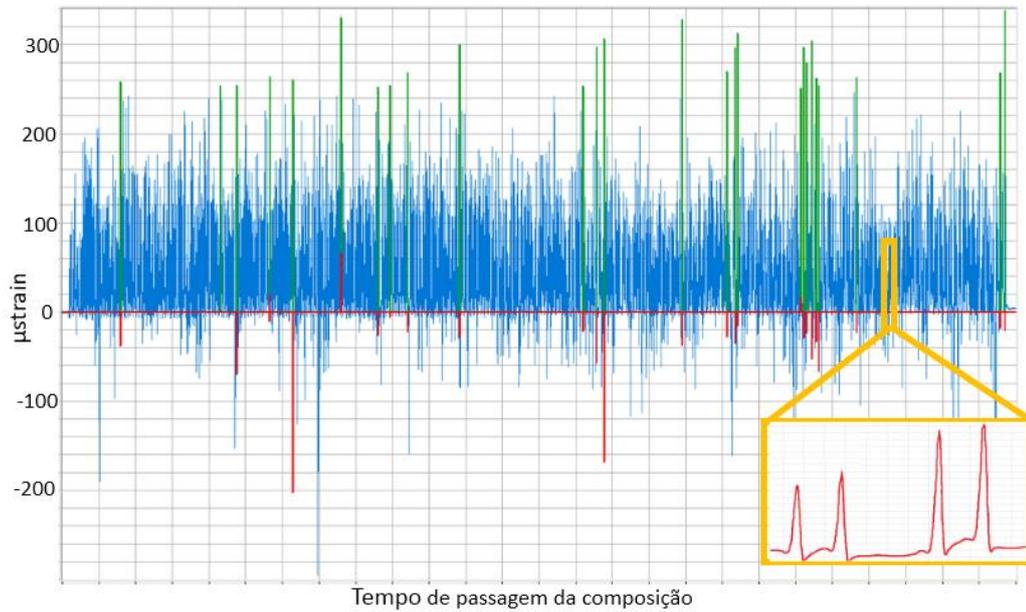
A Figura 22 é possível observar o ponto com maior quantidade de picos que excederam o valor de $250\mu\text{strain}$ de deformação de uma composição que transitou na região de medição no dia 08 de novembro de 2017. Os demais pontos são apresentados graficamente no Apêndice I – Resultados da análise da via férrea. Pontos que não estão mostrados em imagens, foram pontos que não apresentaram nenhum pico que demonstrasse uma deformação correspondente a uma carga lateral aplicada com o valor de 80% da carga vertical resultante.

O eixo das abscissas representa o tempo de passagem completo da composição pelo ponto instrumentado e o eixo das ordenadas o valor da deformação em $\mu\text{strain}(m/m)$ no trilho no ponto instrumentado.

O gráfico representa as deformações obtidas pela passagem de 4 rodas (de um lado do vagão) do conjunto completo da composição com de cerca de 297 vagões, totalizando 1188 picos de deformação.

É mostrado na Figura 22 uma ampliação do gráfico geral da passagem de uma composição.

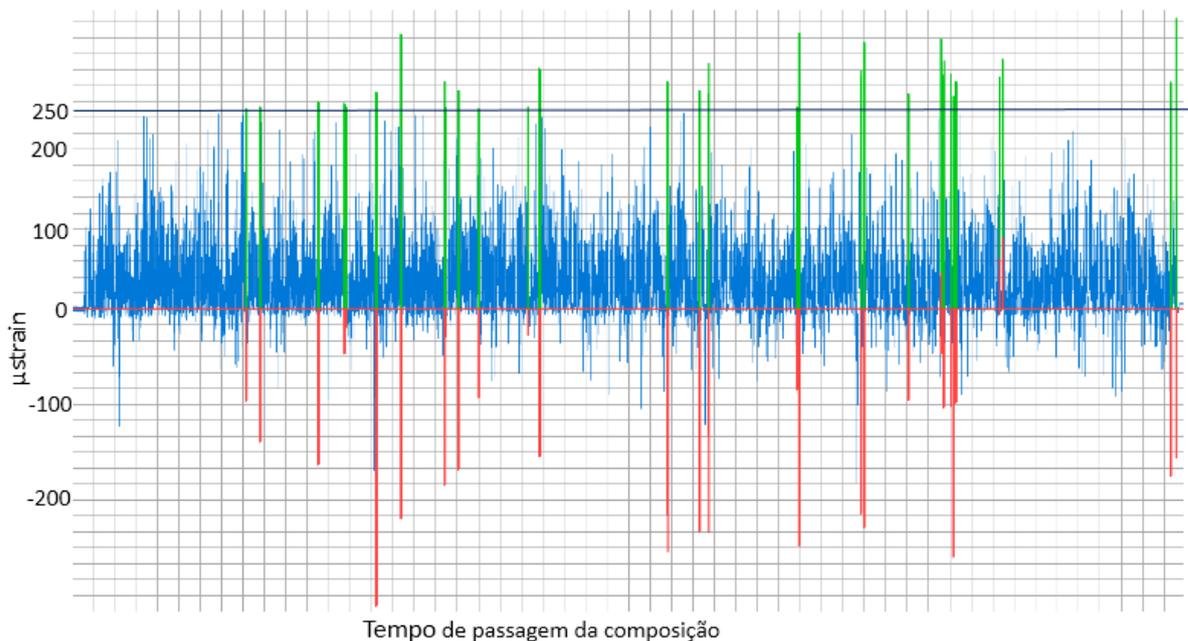
Figura 22: Ampliação do gráfico típico de uma composição,



Os dados serão apresentados como a medição completa da composição na cor azul, dados que apresentaram um coeficiente L/V maior que 0,8 são plotados na cor verde e os valores de deformação medidos no trilho oposto, são plotados na cor vermelha e uma linha com o máximo de deformação admissível no valor de $250\mu\text{strain}$.

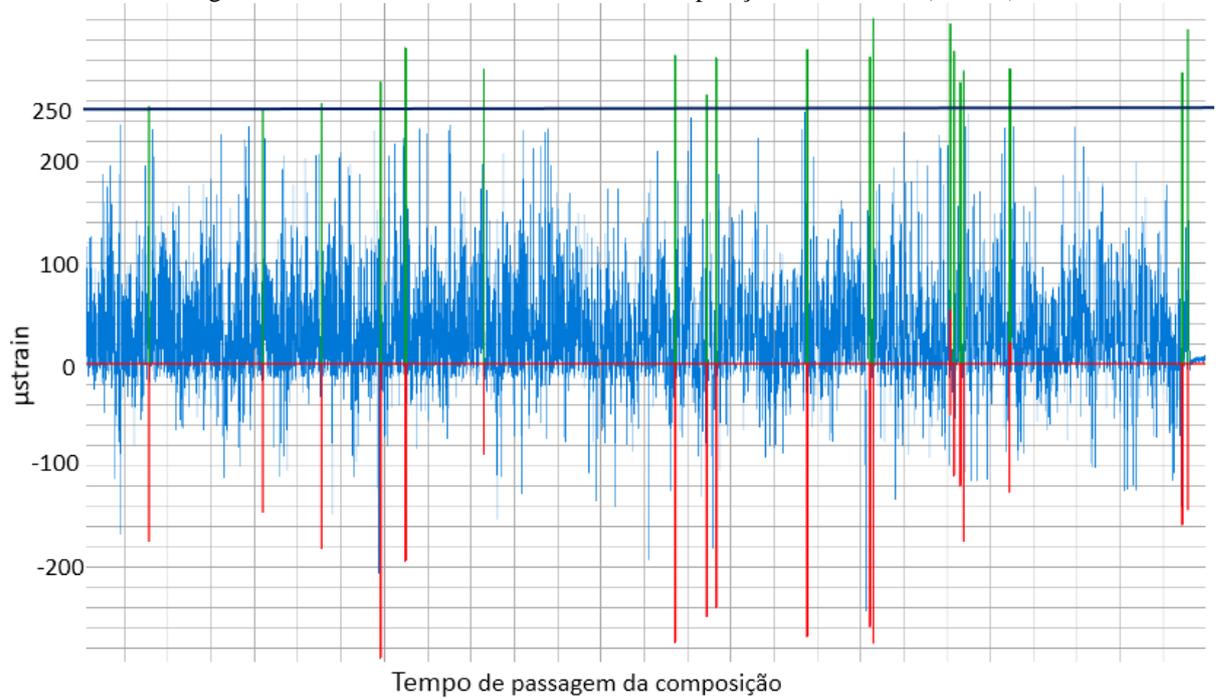
Na Figura 23, o ponto 11 do trilho cidade apresentou 27 picos com valores acima da deformação máxima de $L/V=0,8$.

Figura 23: Resultados da extensometria da composição 1 - Ponto 11 (Cidade)



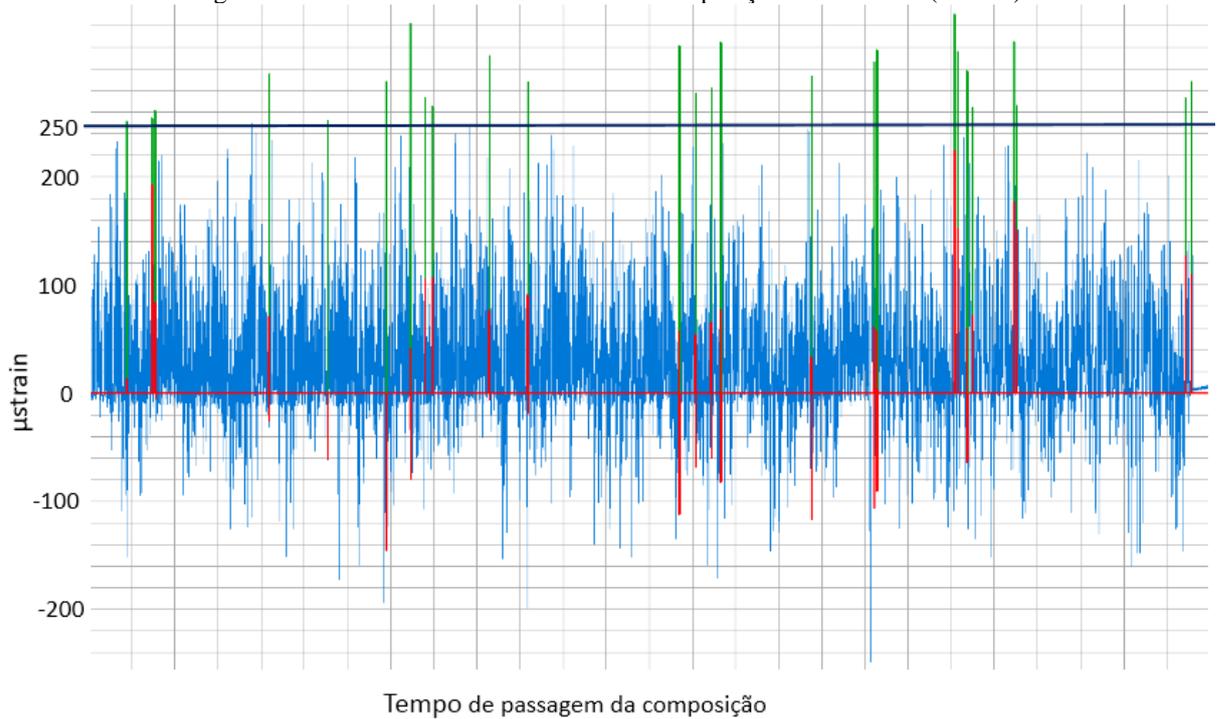
Na Figura 24 o ponto 12 do trilho cidade apresentou 19 picos com valores acima da deformação máxima de $L/V=0,8$.

Figura 24: Resultados da extensometria da composição 1 - Ponto 12 (Cidade)

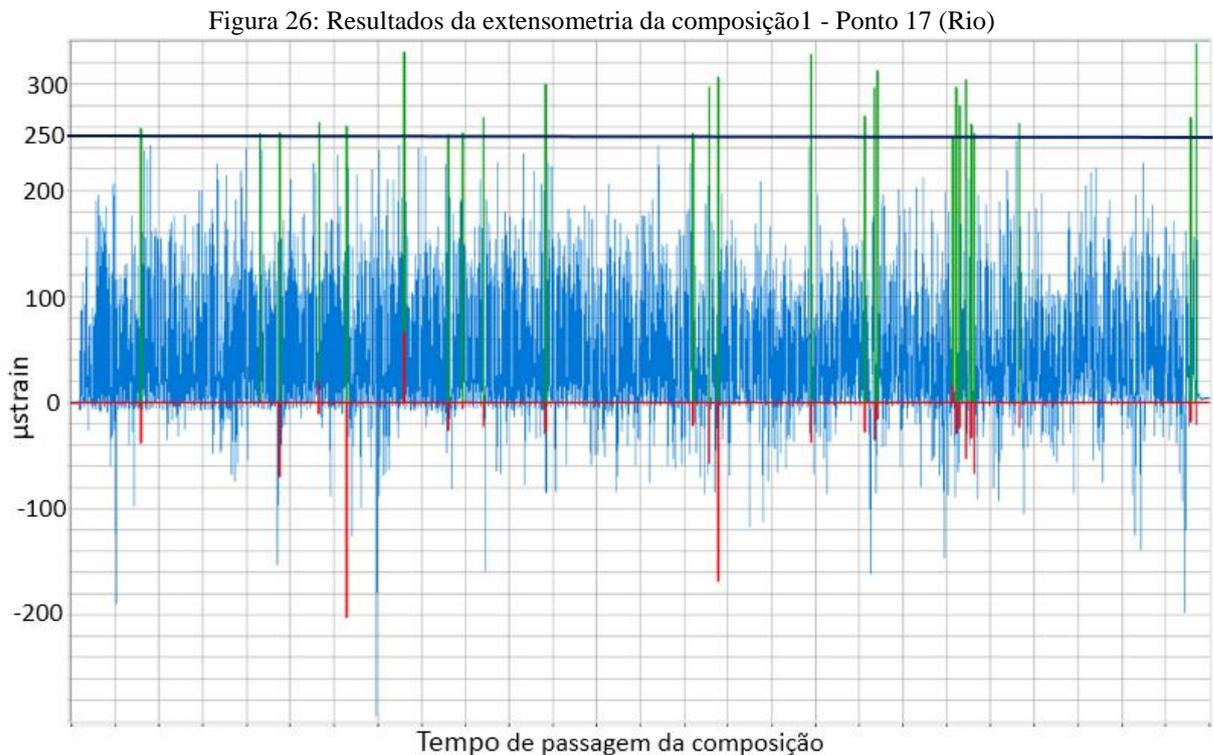


Na Figura 25 o ponto 13 do trilho cidade apresentou 26 picos com valores acima da deformação máxima de $L/V=0,8$.

Figura 25: Resultados da extensometria da composição 1 - Ponto 13 (Cidade)



Na Figura 26, o ponto 17 do rio apresentou 50 picos com valores acima da deformação máxima de $L/V=0,8$.



Apesar do ponto 17 ter apresentado o maior número de picos, as medições mais críticas, são aquelas que apresentam valores de L/V maior que 0,8 durante um tempo maior. Quanto maior for o tempo em que ocorre um elevado valor de coeficiente L/V , maior o movimento relativo em que ocorre a ascensão do flange da roda sobre o trilho ou seja, quanto maior o tempo, maior o deslocamento para cima da roda. Portanto, se o valor do coeficiente de Nadal for elevado em apenas um ponto, o movimento de subida da roda no trilho é menor.

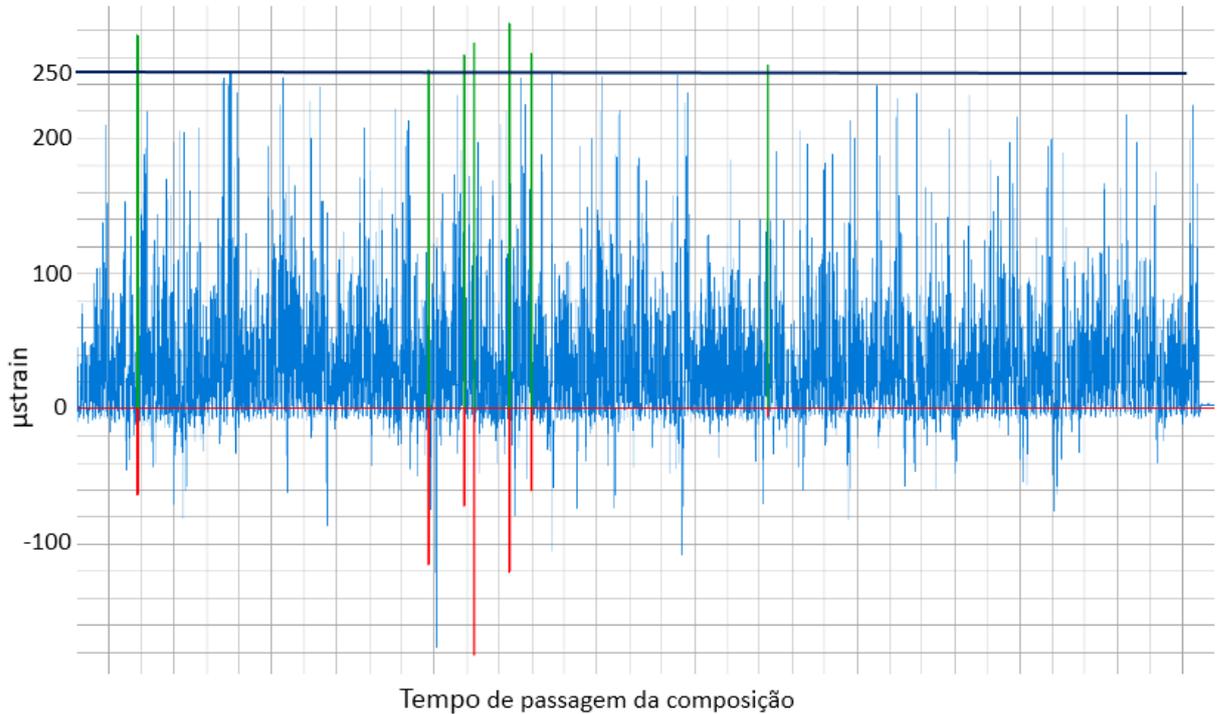
A maioria dos picos se repetem principalmente nos pontos 11, 12 e 13, ou seja, o tempo de ocorrência de valores de coeficiente de Nadal possui valores elevados pela extensão do trilho limitada por estes pontos tendo duração de 66 milissegundos. Essa quantidade de picos pode evidenciar um possível defeito no trilho do lado mais próximo ao rio.

5.2.2 Composição 2

Os gráficos a seguir apresentam os resultados críticos referentes a uma composição que trafegou na região dos sensores no dia 02/11/17.

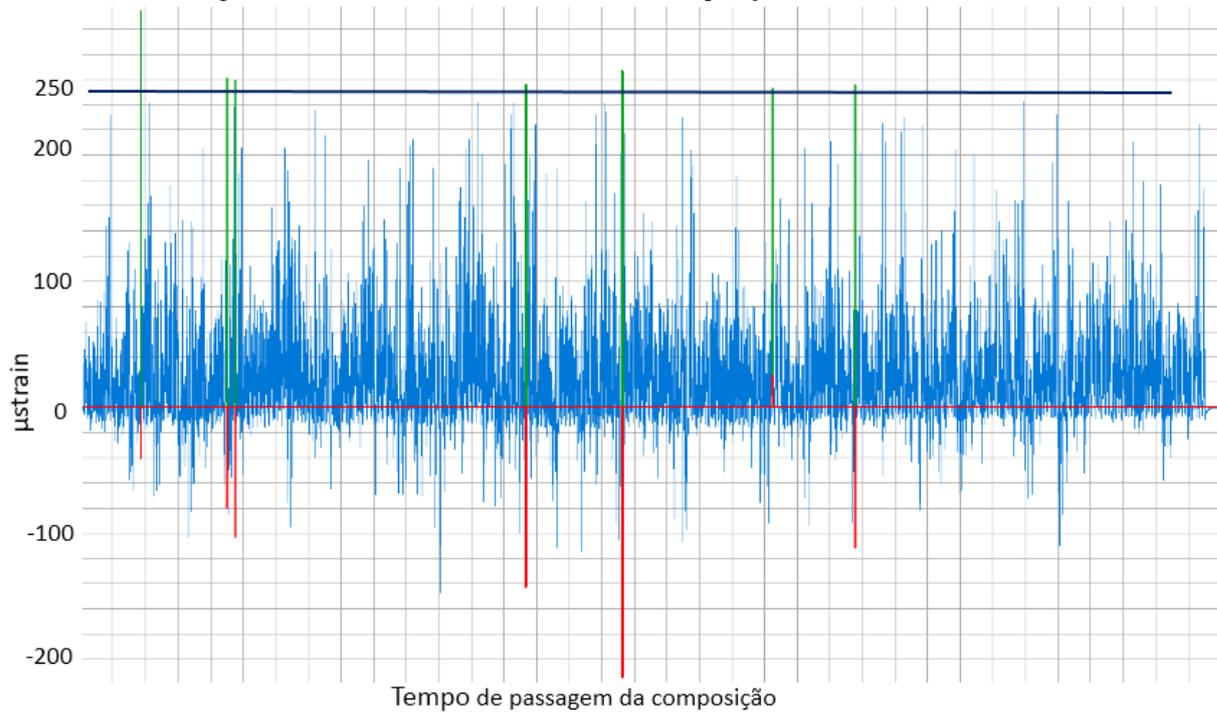
Na Figura 27, o ponto 11 do trilho cidade apresentou 7 picos com deformações acima do limite de Nadal de 0,8.

Figura 27: Resultados da extensometria da composição 2 - Ponto 11 (Cidade)



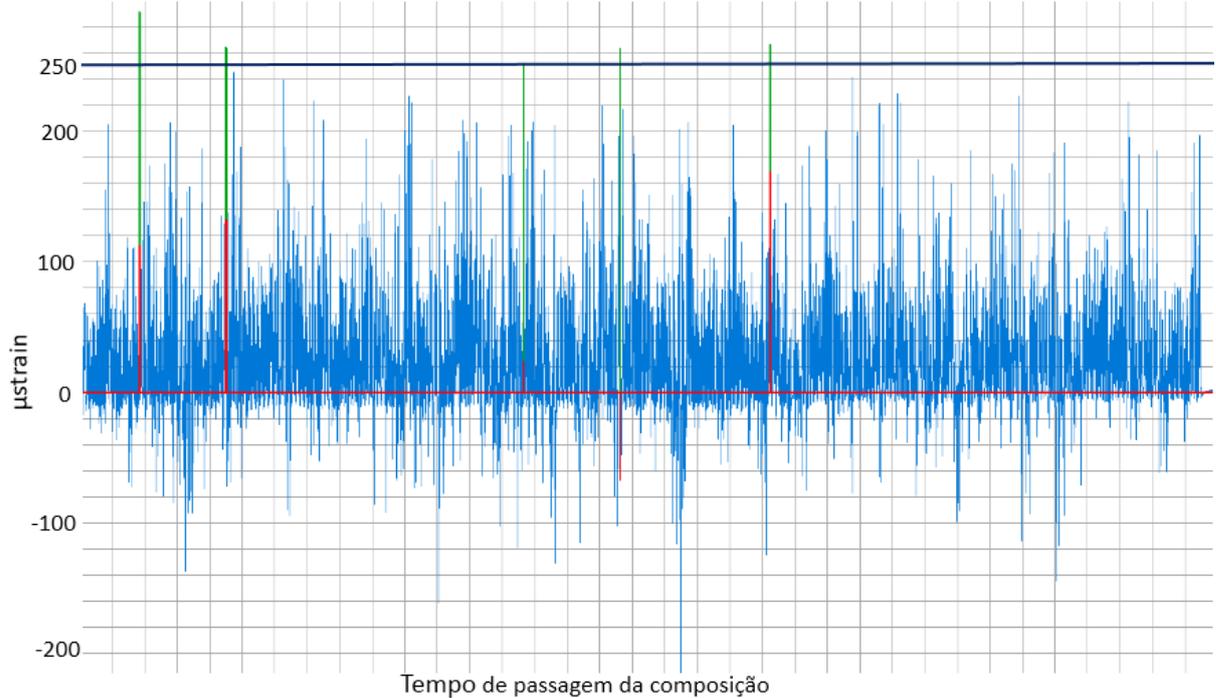
Na Figura 28, o ponto 12 do trilho cidade apresentou 7 picos com deformações acima do limite de Nadal de 0,8.

Figura 28: Resultados da extensometria da composição 2 - Ponto 12 (Cidade)



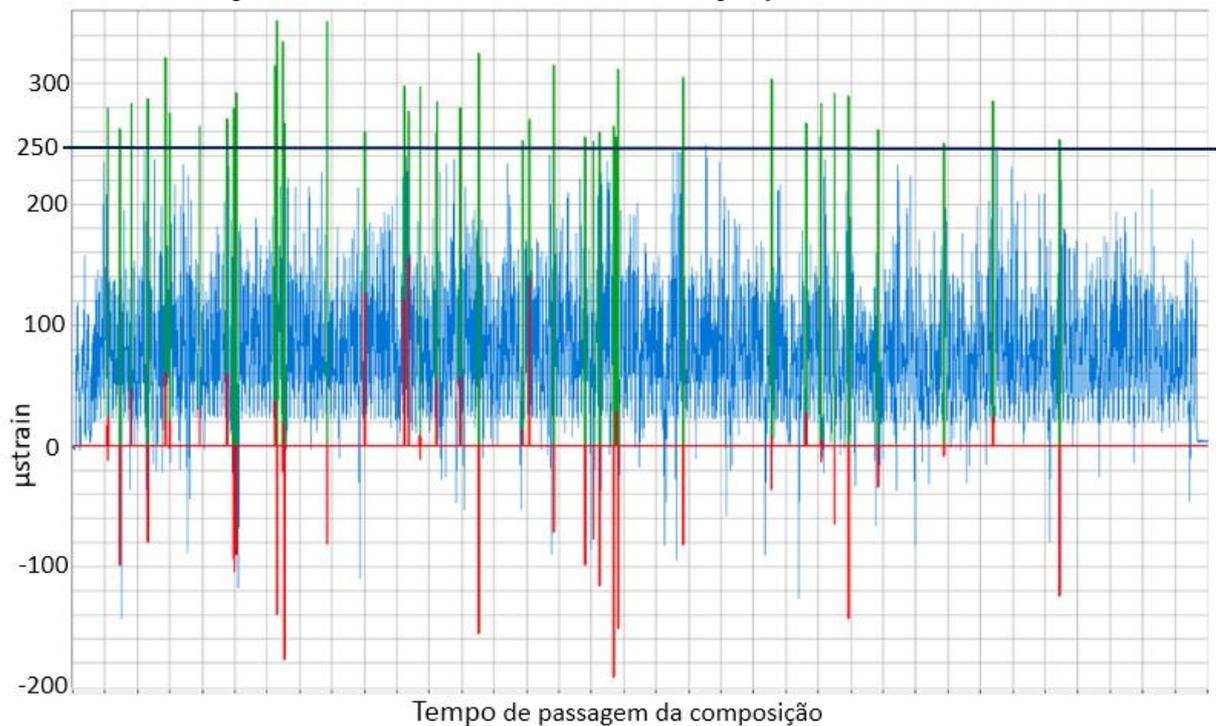
Na Figura 29, o ponto 13 do trilho cidade apresentou 5 picos com deformações acima do limite de Nadal de 0,8.

Figura 29: Resultados da extensometria da composição 2 - Ponto 13 (Cidade)



Na Figura 30 o ponto 17 do trilho rio apresentou 40 picos com deformações acima do limite de Nadal de 0,8.

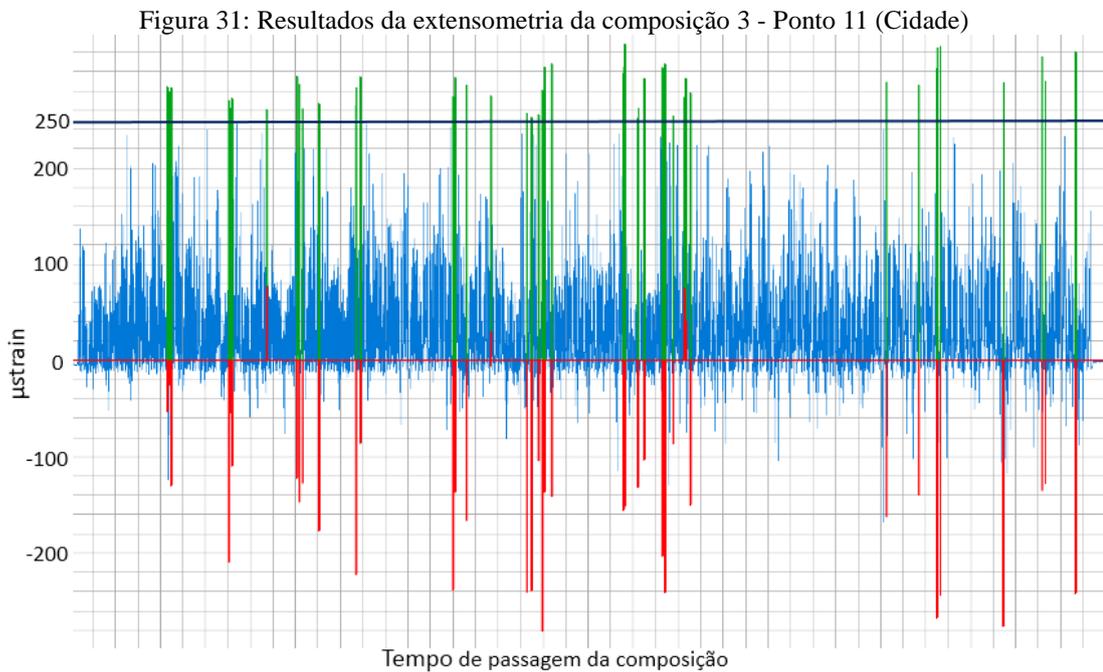
Figura 30: Resultados da extensometria da composição 2 - Ponto 17 (Rio)



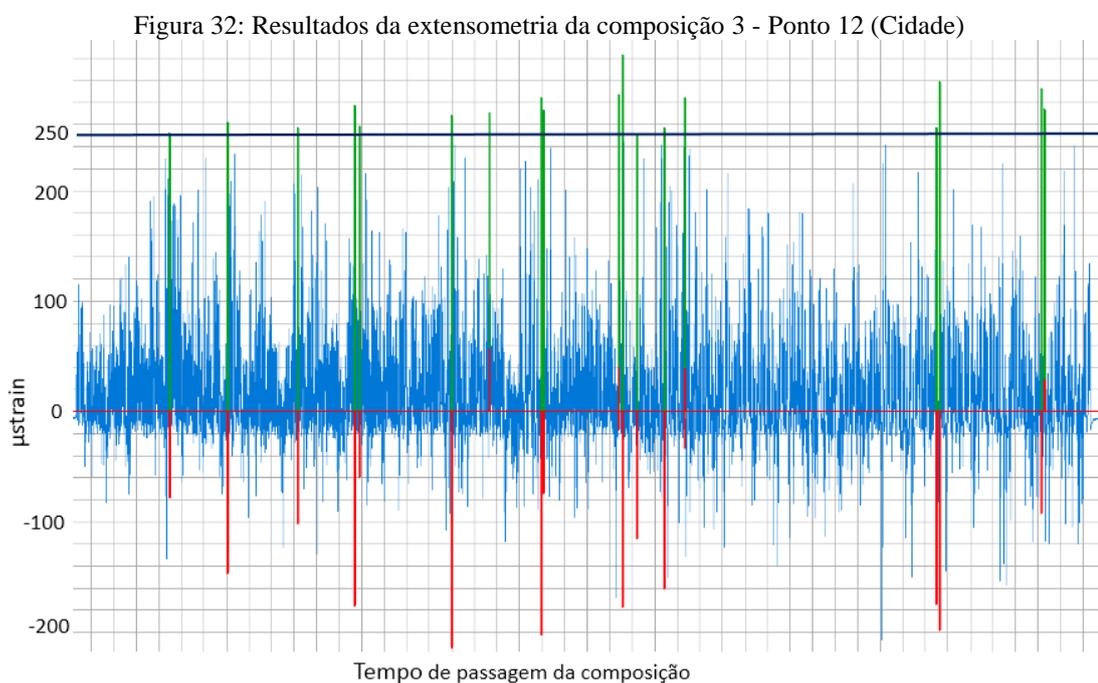
5.2.3 Composição 3

Os gráficos a seguir apresentam os resultados críticos referentes a uma composição que trafegou na região dos sensores no dia 03/11/17

Na Figura 31, o ponto 11 do trilho cidade apresentou 27 picos com deformações acima do limite de Nadal de 0,8.

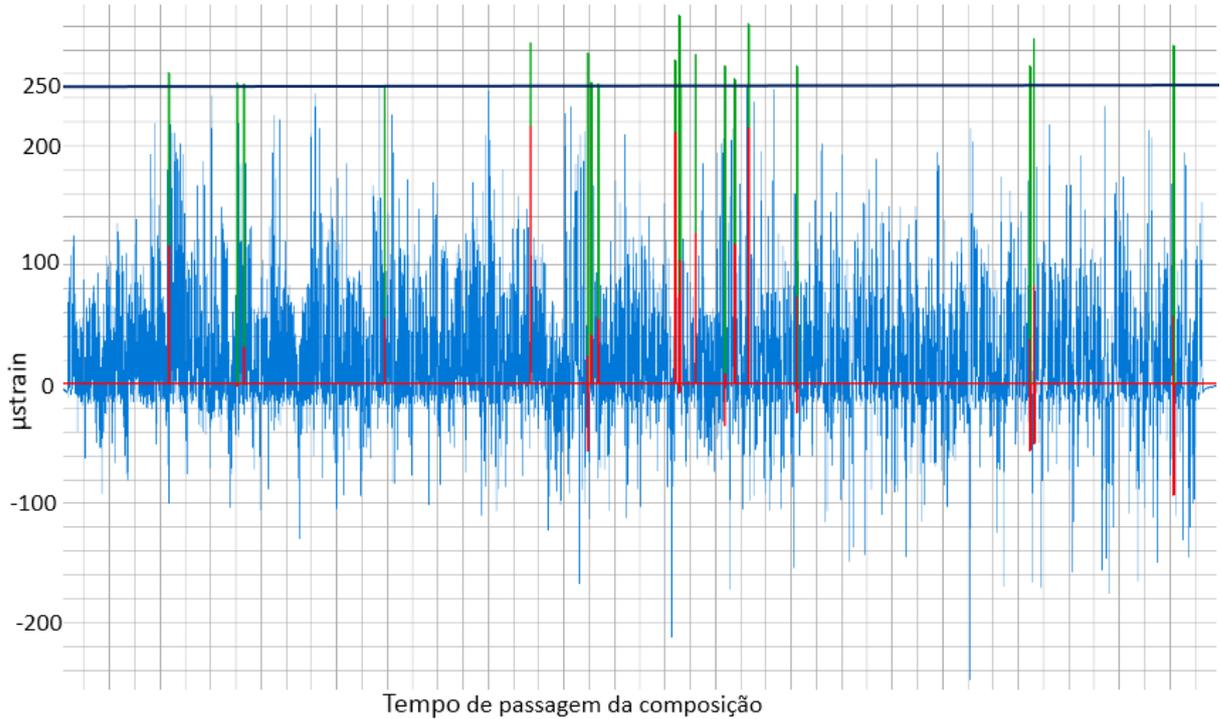


Na Figura 32, o ponto 12 do trilho cidade apresentou 19 picos com deformações acima do limite de Nadal de 0,8.



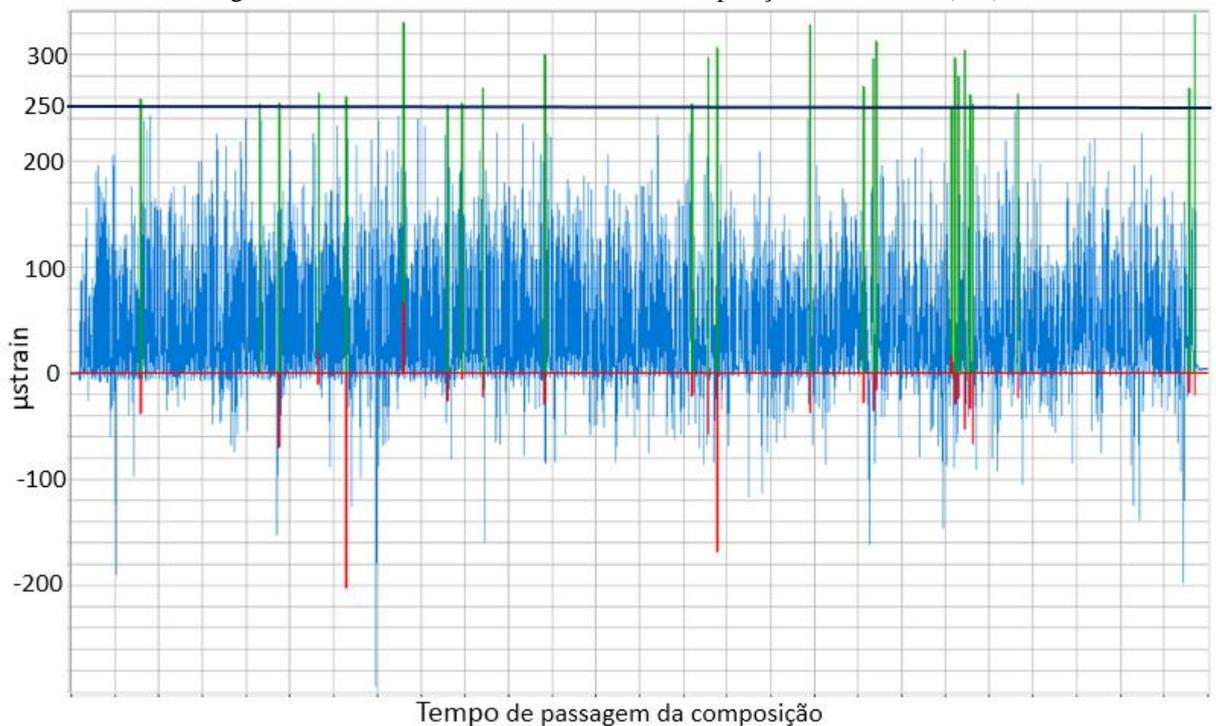
Na Figura 33, o ponto 13 do trilho cidade apresentou 24 picos com deformações acima do limite de Nadal de 0,8.

Figura 33: Resultados da extensometria da composição 3 - Ponto 13 (Cidade)



Na Figura 34, o ponto 17 do trilho rio apresentou 27 picos com deformações acima do limite de Nadal de 0,8.

Figura 34: Resultados da extensometria da composição 3 - Ponto 17 (Rio)



Os principais pontos que apresentaram elevados picos de coeficiente de Nadal acima de 0,8 são apresentados na Figura 35.

Figura 35: Pontos críticos no trecho instrumentado.



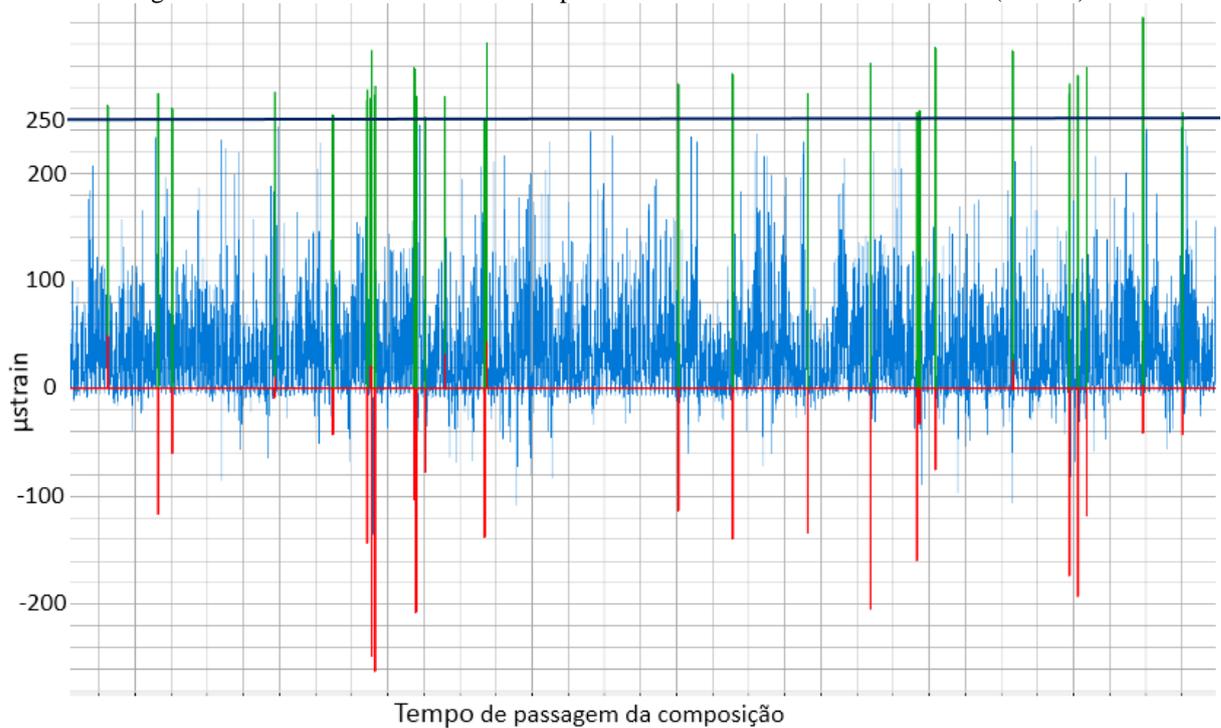
Pode-se observar que os pontos 11, 12 e 13 por serem pontos consecutivos são considerados pontos críticos pois os elevados coeficientes de L/V atuam por um tempo maior, aumentando o deslocamento ascendente da roda sobre o trilho.

Outro fator importante que pode ser observado, definindo que a composição carregada segue o sentido da mina para o porto é que após a passagem pelos pontos 11, 12 e 13, há uma baixa ocorrência de valores elevados do coeficiente de Nadal ou seja, os movimentos dinâmicos laterais da composição diminuem. Esta mesma análise pode ser feita para a região do trilho nos pontos 11 a 20. A elevada ocorrência de valores de Nadal maiores que 0,8 neste trecho pode ter sido ocasionada por defeitos na via próximos ao ponto 20. Este possível defeito amplifica os movimentos dinâmicos do vagão como o *pitch* e *hunting* acarretando em um possível aumento das cargas laterais em outros pontos.

5.2.4 Velocidade de 60km/h

Analisando-se a velocidade de 60km/h da composição medida no dia 08 de novembro de 2017, pode-se observar que o trilho do lado cidade possui mais picos com valores de L/V acima de 0,8. A Figura 36 mostra os picos ocorridos no ponto 11, trilho cidade. Não será exibido o gráfico do ponto 11 do trilho lado rio, pois não houve nenhuma ocorrência.

Figura 36: Resultados da extensometria para a velocidade de 60km/h - Ponto 11 (Cidade)

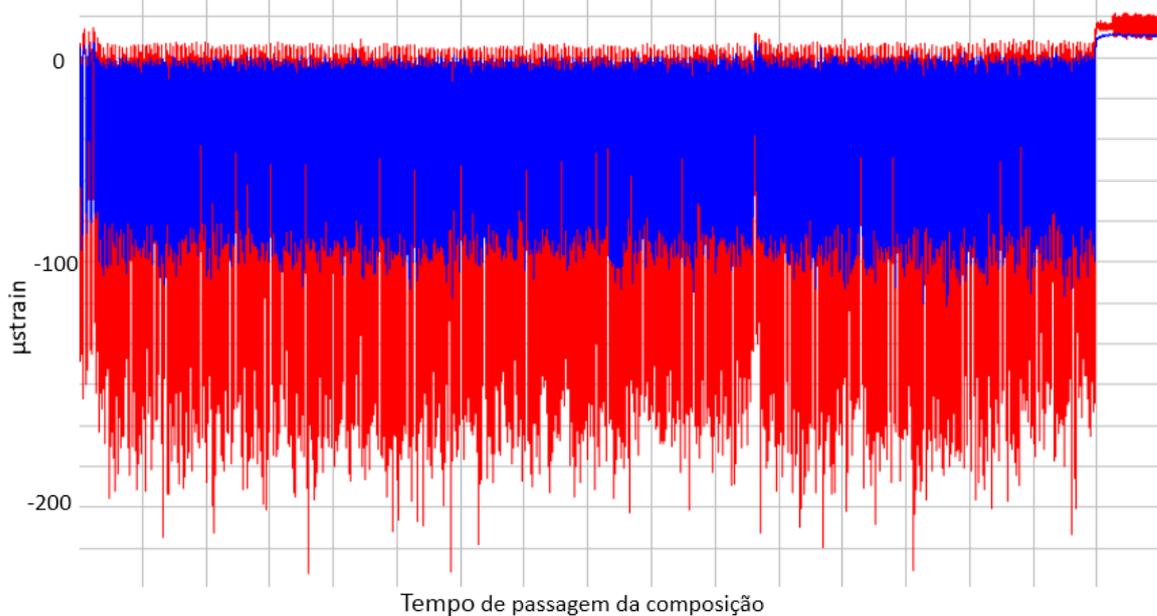


A análise das deformações verticais foi realizada retirando-se a média das deformações nos extensômetros instalados em ambos os lados do trilho. Com isto, retira-se a componente de deformação relacionada a flexão e torção no trilho.

O gráfico é apresentado com as deformações do trilho lado cidade na cor azul e as deformações do trilho lado rio na cor vermelha.

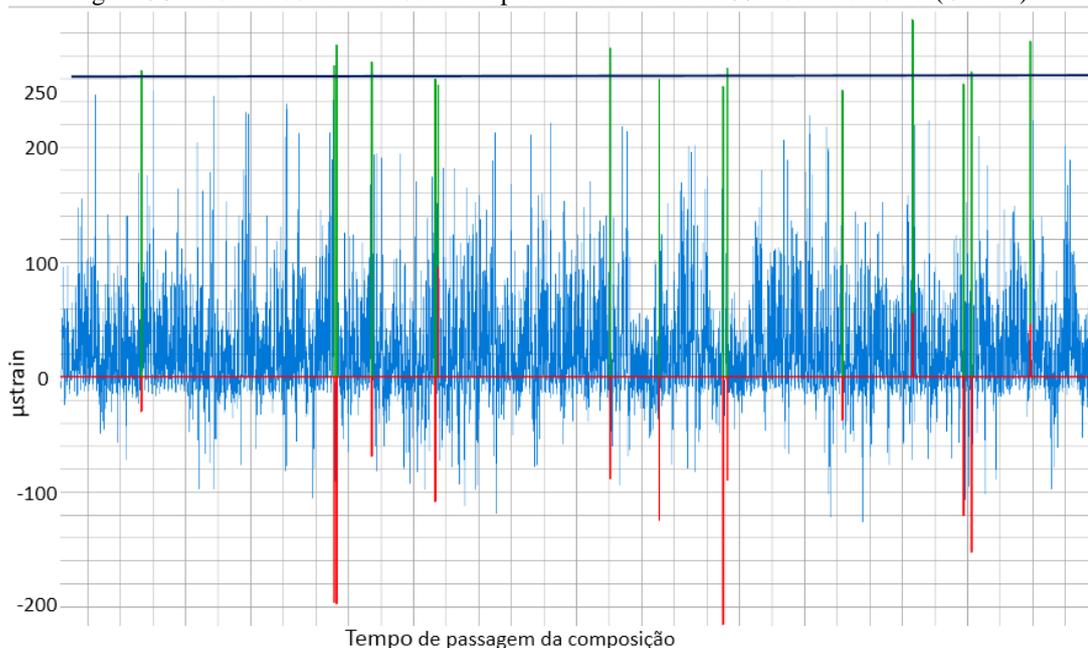
No ponto 11 é observado que a deformação vertical no trilho lado cidade é menor do que no trilho lado rio durante a passagem de toda a composição, causando um aumento do coeficiente L/V no trilho lado cidade visto que a carga vertical está no denominador da equação. Os valores de deformação para o trilho lado rio tem valores em torno de $210\mu\text{strain}$ enquanto o trilho lado cidade estão próximos de $100\mu\text{strain}$.

Figura 37: Resultados da extensometria para a velocidade de 60km/h - Deformação Vertical no Ponto 11



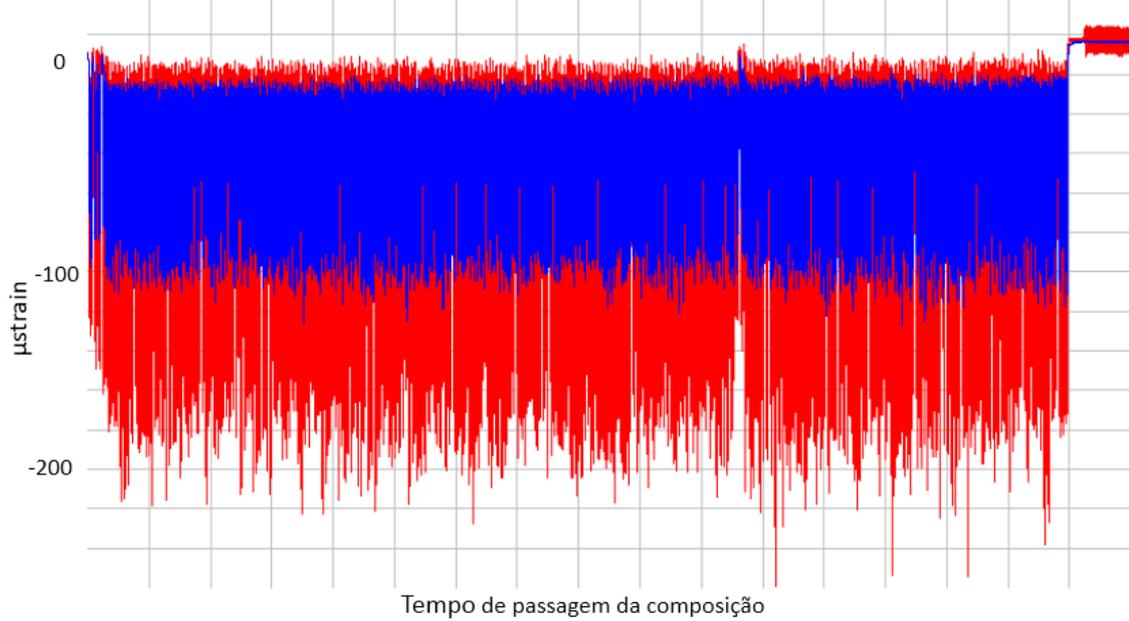
Para o ponto 12, os mesmos resultados foram observados. Na Figura 38 são mostrados os picos encontrados na medição para o lado cidade, enquanto o lado rio não houve ocorrência de nenhum pico.

Figura 38: Resultados da extensometria para a velocidade de 60km/h - Ponto 12 (Cidade)



As deformações causadas por cargas verticais no ponto 12 são menores no lado cidade comparando-as com o lado rio como mostrado na Figura 39. Os valores de deformação para o trilho rio tem valores, em média, de $210\mu\text{strain}$ enquanto o trilho cidade estão próximos de $100\mu\text{strain}$.

Figura 39: Resultados da extensometria para a velocidade de 60km/h - Deformações verticais no Ponto 12



Para o ponto 13, ambos os trilhos (cidade e rio) apresentaram picos acima de 0,8. A Figura 40 apresenta os picos para o trilho cidade enquanto a Figura 41 apresenta os picos para o trilho rio.

Figura 40: Resultados da extensometria para a velocidade de 60km/h - Ponto 13 (Cidade)

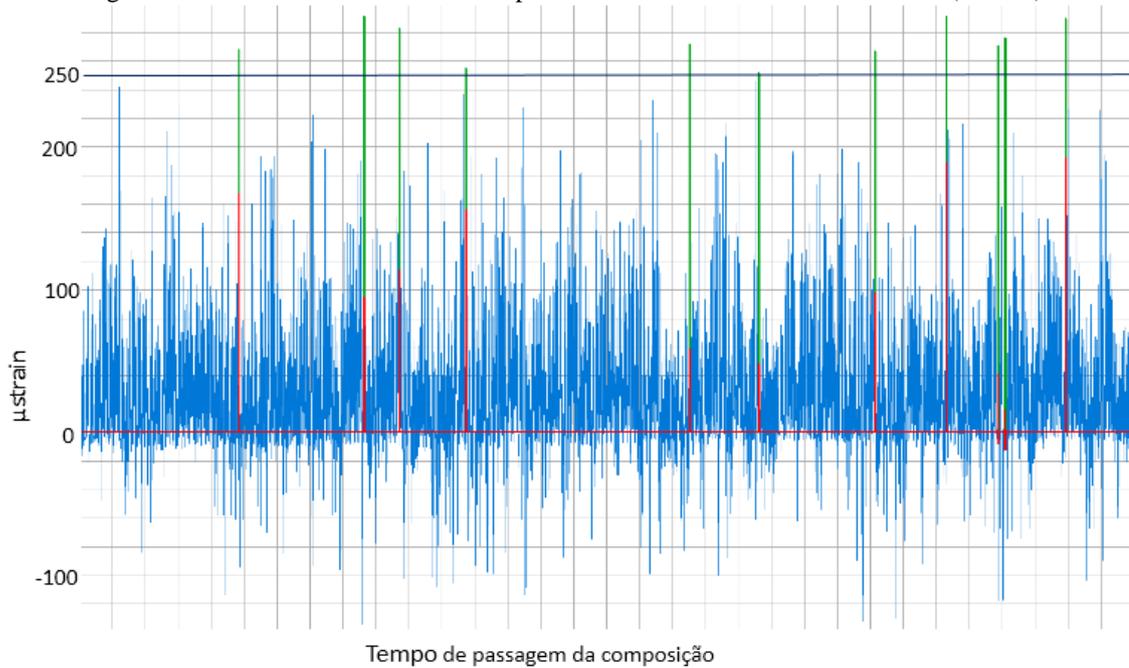
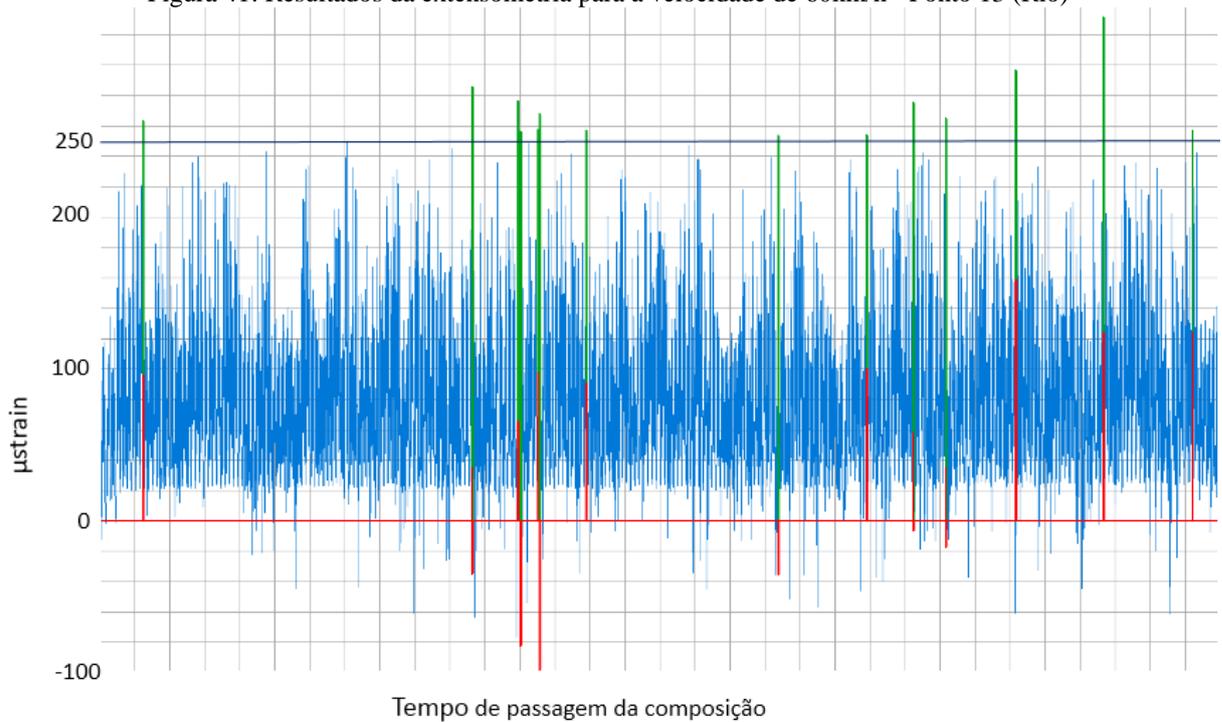
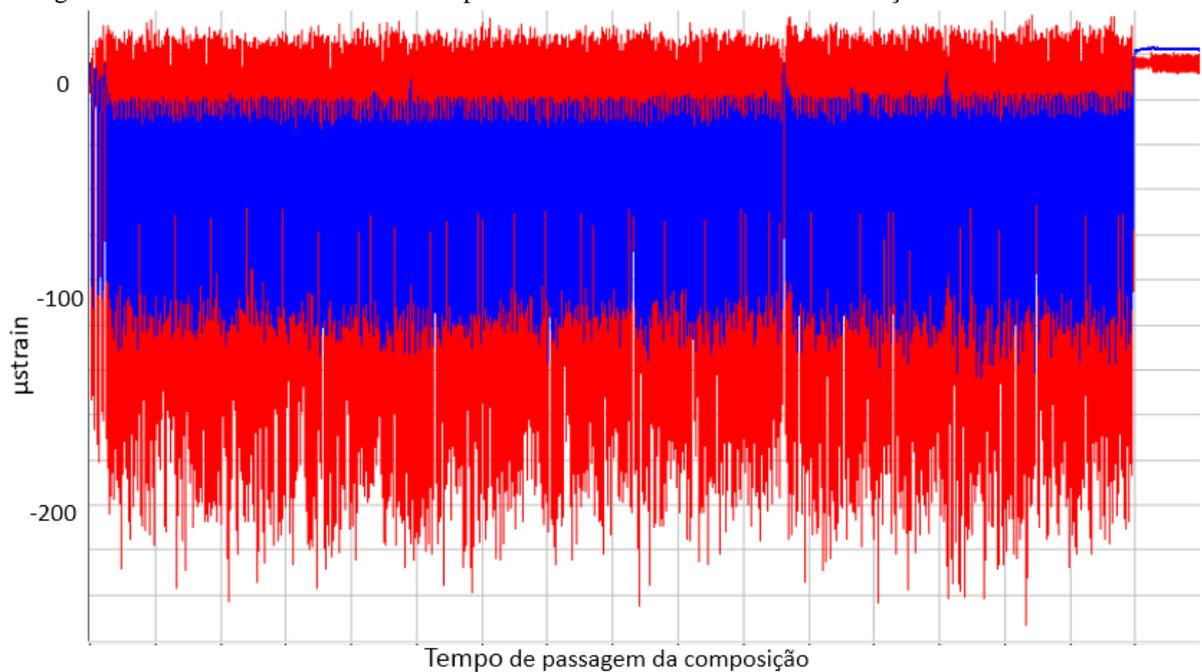


Figura 41: Resultados da extensometria para a velocidade de 60km/h - Ponto 13 (Rio)



A Figura 42 apresenta as deformações causadas por cargas verticais nos trilhos no ponto 13. Os valores de deformação para o trilho rio tem valores, em média, de 200 μstrain enquanto o trilho cidade possui, em média, 110 μstrain .

Figura 42: Resultados da extensometria para a velocidade de 60km/h - Deformações verticais no Ponto 13

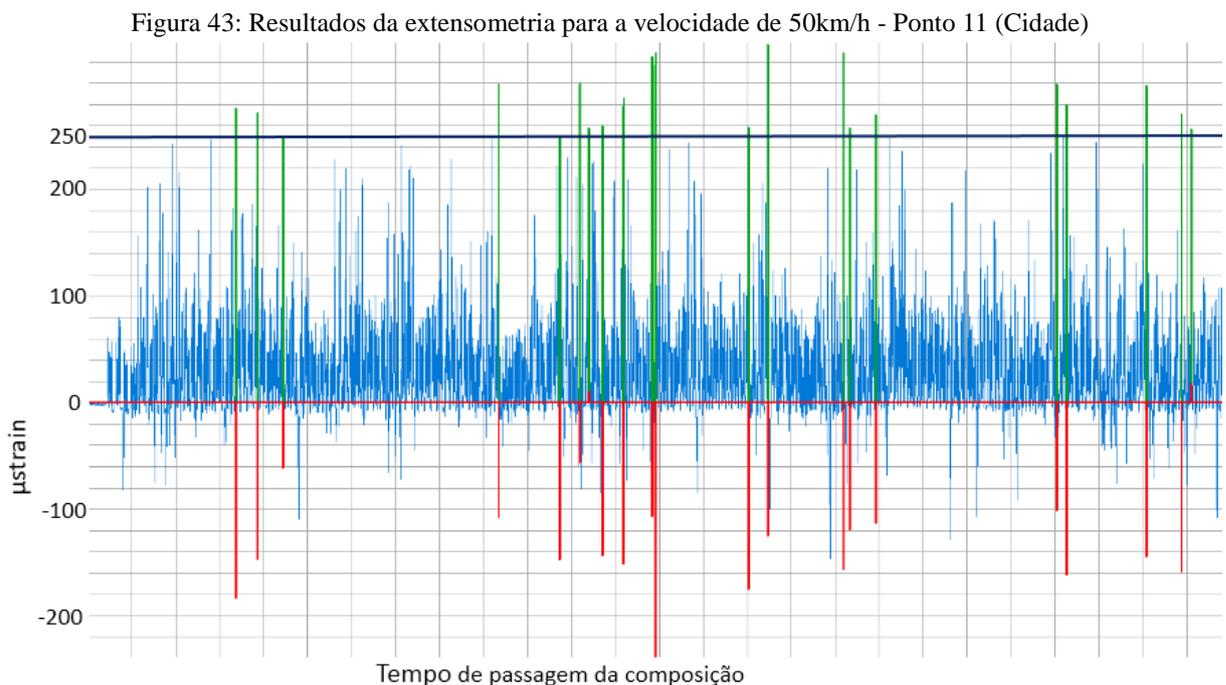


Pode-se observar que novamente, o trilho lado cidade apresenta menores valores de deformação vertical quando comparados ao lado rio.

Os picos encontrados no trilho rio podem ter sido ocasionados por uma diferença no contato roda trilho do local devido a alguma imperfeição na via. Pode-se observar pela Figura 42 que ocorrem valores superiores ao zero da medição para o lado rio. Isso indica uma possível mudança nos efeitos de deformação local do trilho.

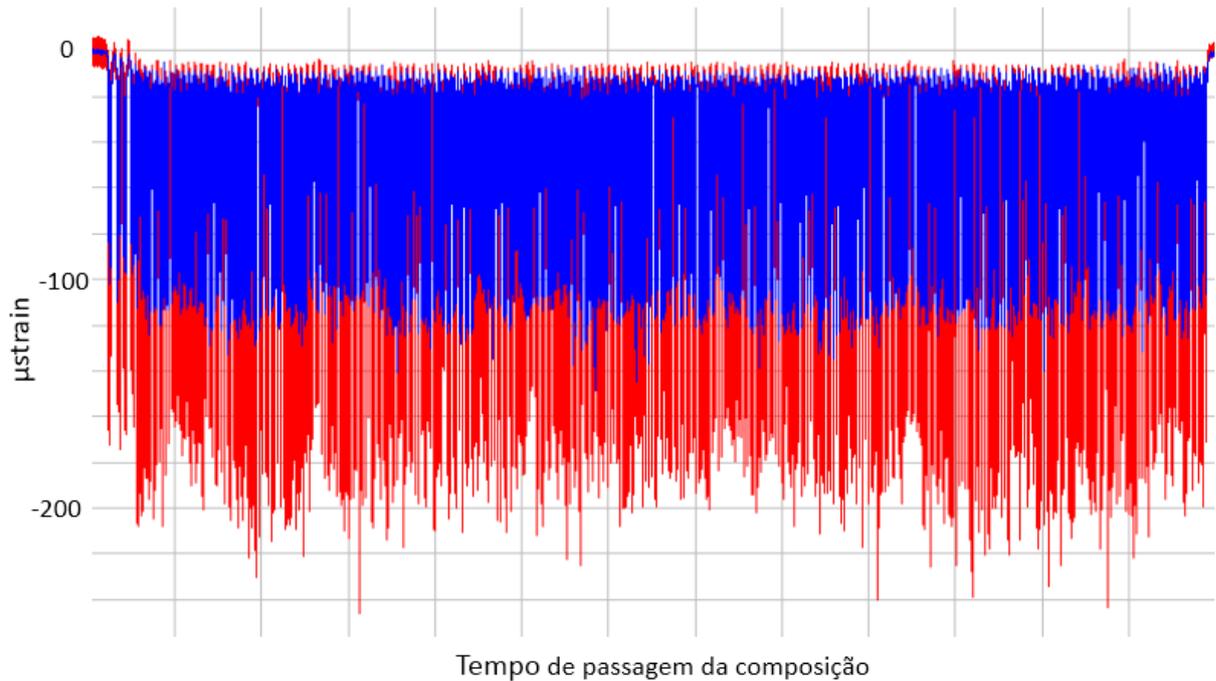
5.2.5 Velocidade de 50km/h

Para a análise da velocidade de 50km/h da composição medida no dia 06 de novembro de 2017 as 17:02, pode-se observar que o trilho do lado cidade possui mais picos com valores de L/V acima de 0,8. A Figura 43 mostra os picos ocorridos no ponto 11 cidade, enquanto no ponto 11 rio, não houve nenhuma ocorrência.



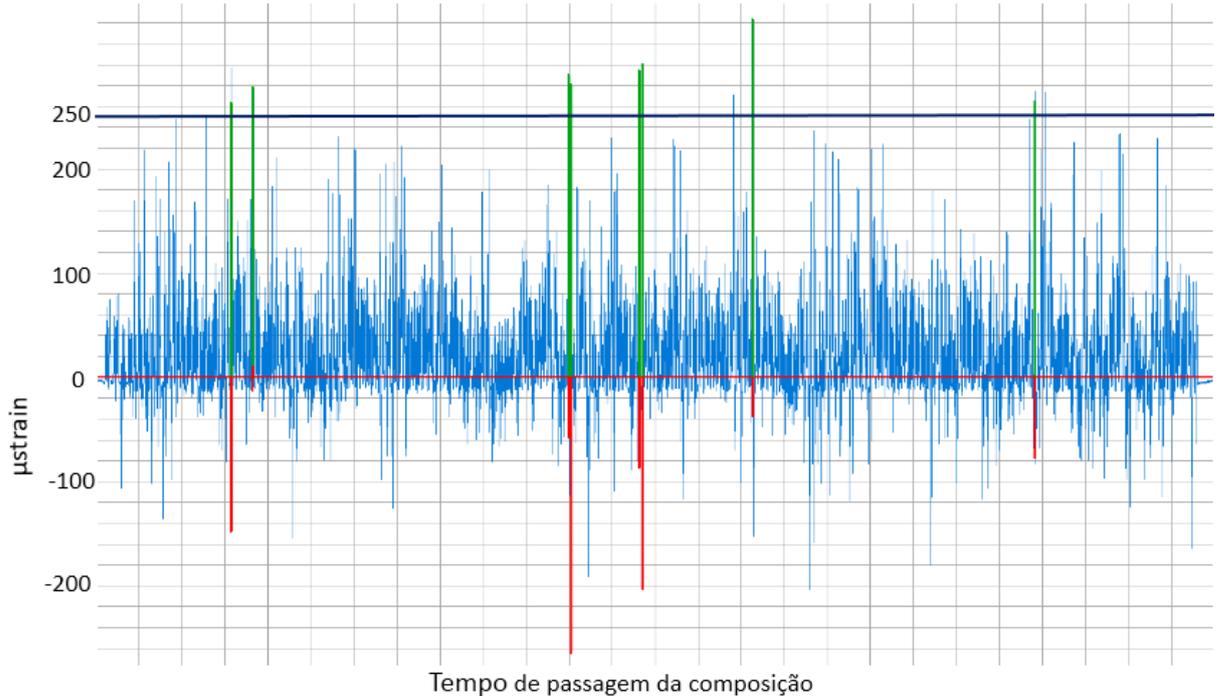
A análise das deformações verticais na linha no ponto 11 mostram que a deformação vertical sentida no trilho cidade é menor do que no trilho rio durante a passagem de toda a composição, causando um aumento do coeficiente L/V . Os valores máximos de deformação para o trilho rio tem valores em torno de 180 μstrain enquanto o trilho cidade estão próximos à 100 μstrain .

Figura 44: Resultados da extensometria para a velocidade de 50km/h - Deformações Verticais no Ponto 11



Para o ponto 12, os mesmos resultados foram observados. A Figura 45 mostra os picos encontrados na medição para o lado cidade, enquanto o lado rio não houve ocorrência de nenhum pico.

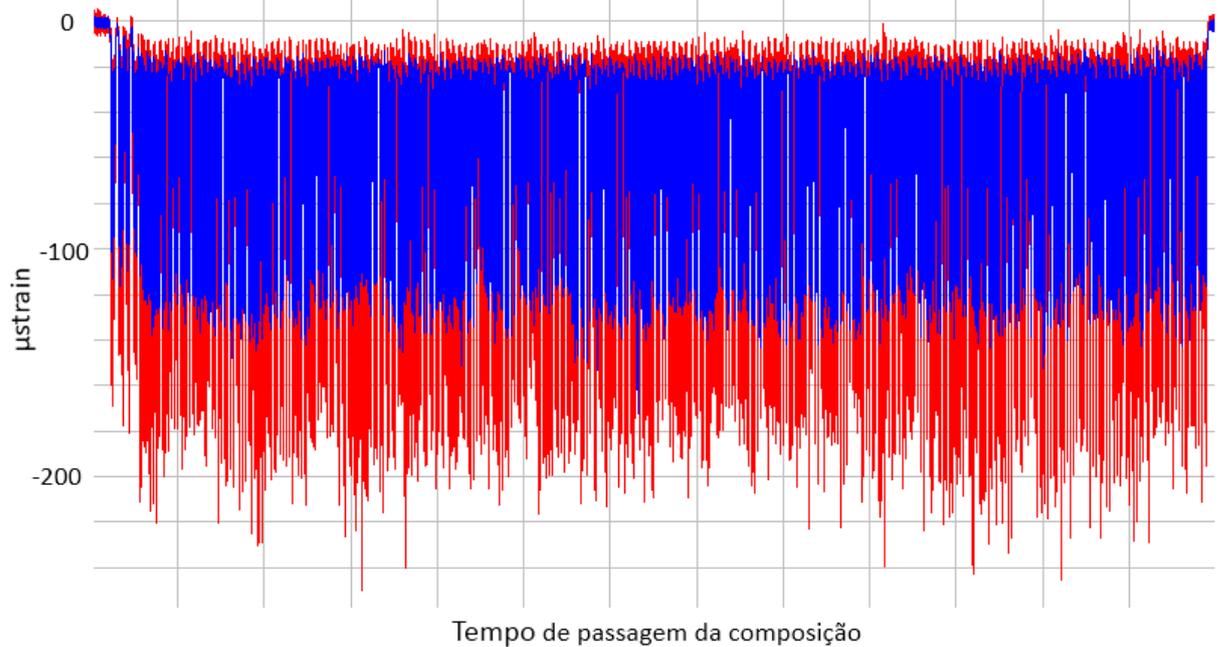
Figura 45: Resultados da extensometria para a velocidade de 50km/h - Ponto 12 (Cidade)



As deformações causadas por cargas verticais no ponto 12 são menores no lado cidade comparando-as com o lado rio como mostra a Figura 46. Os valores máximos de

deformação para o trilho rio tem valores estão próximos de $180\mu\text{strain}$ enquanto o trilho cidade possui próximos de $120\mu\text{strain}$.

Figura 46: Resultados da extensometria para a velocidade de 50km/h - Deformações Verticais no Ponto 12



Para o ponto 13, ambos os trilhos (cidade e rio) apresentaram picos acima de 0,8. A Figura 47 apresenta os picos para o trilho cidade enquanto a Figura 48 apresenta os picos para o trilho rio.

Figura 47: Resultados da extensometria para a velocidade de 50km/h - Ponto 13 (Cidade)

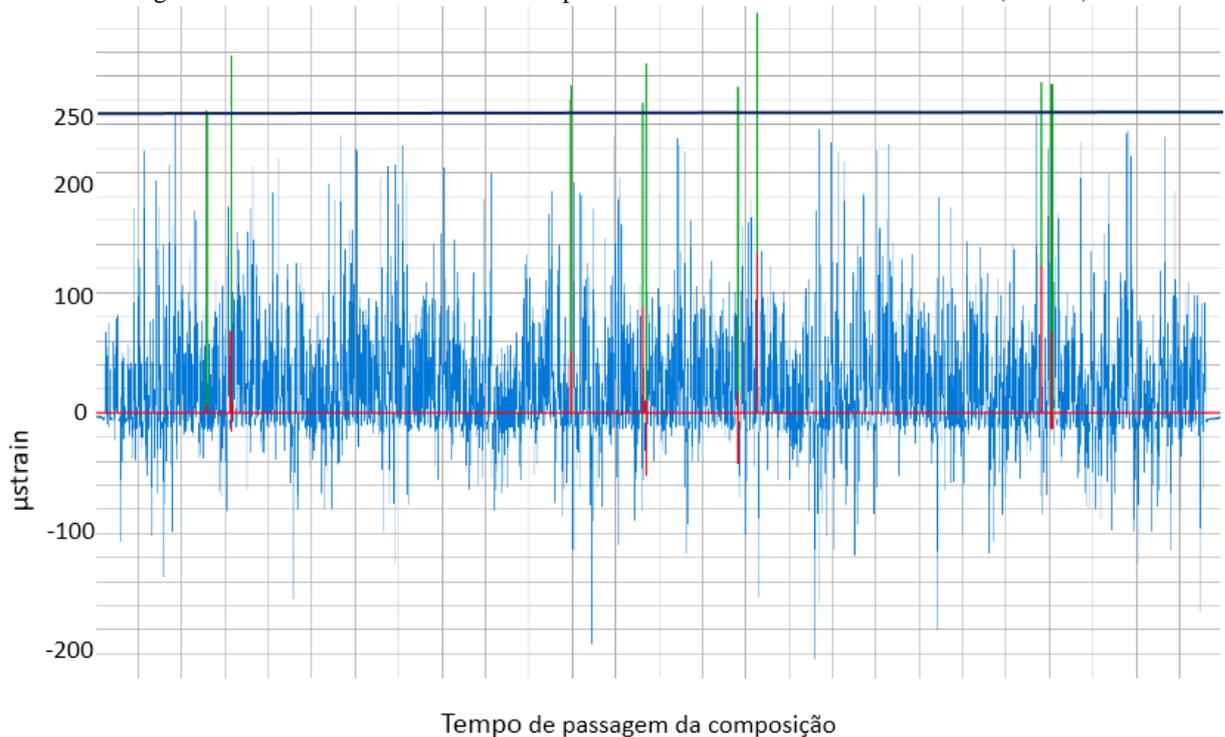
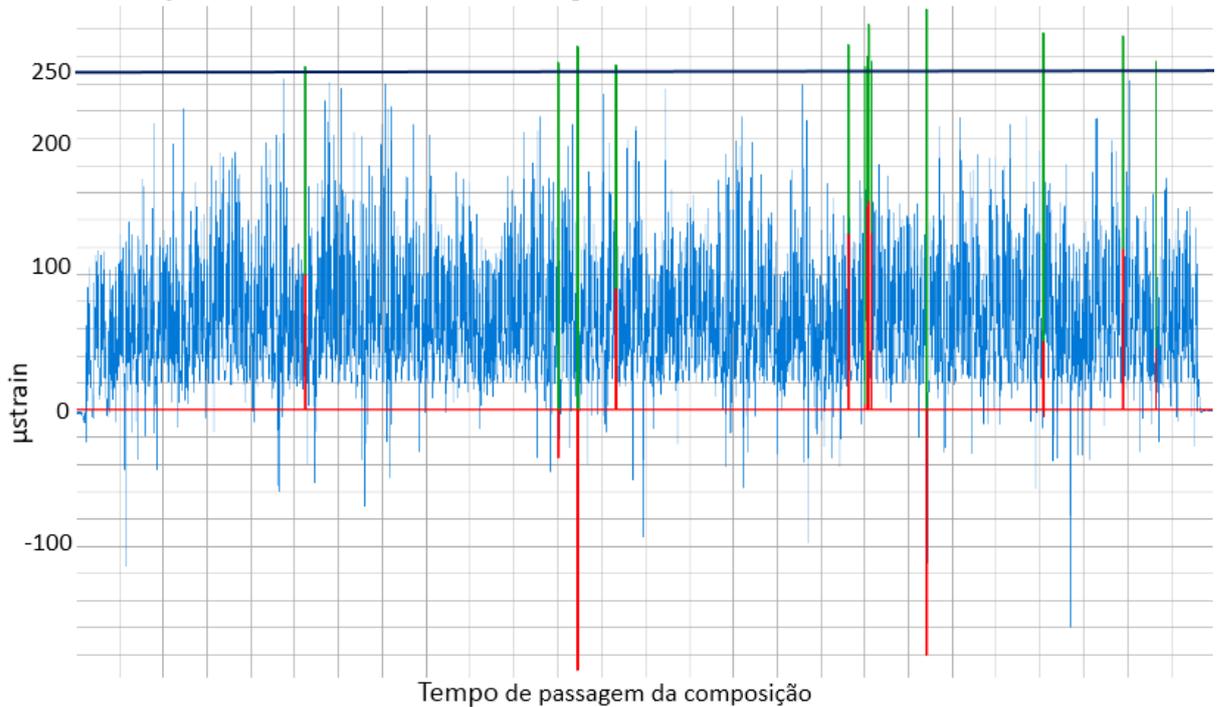
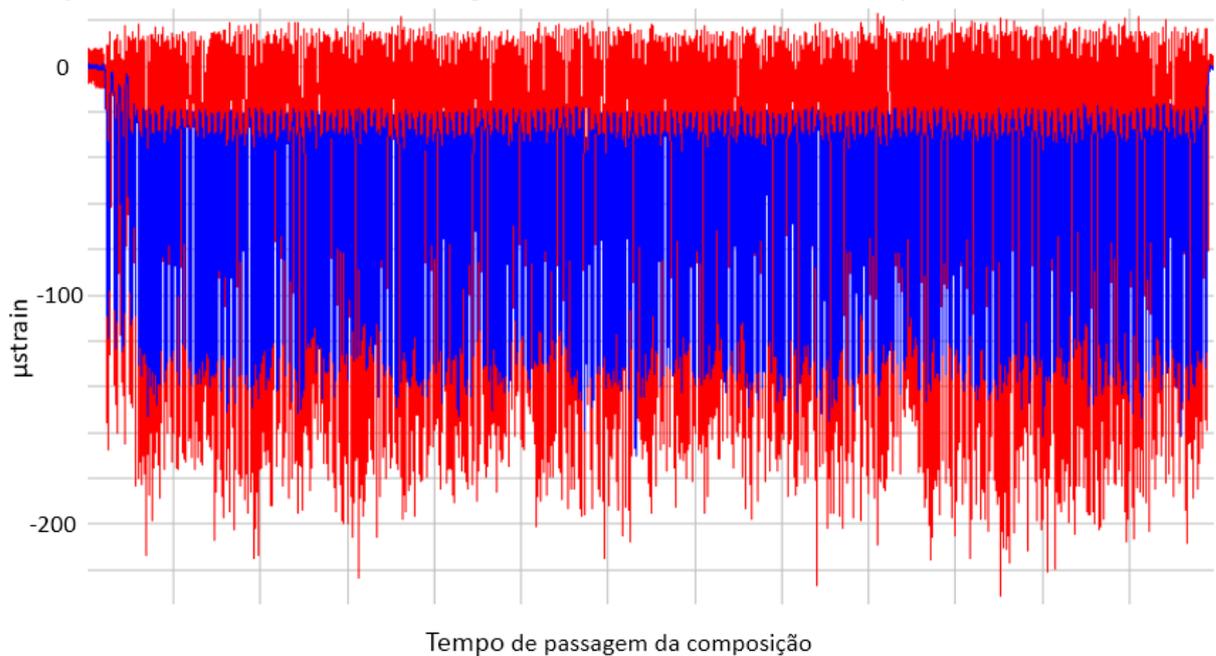


Figura 48: Resultados da extensometria para a velocidade de 50km/h - Ponto 13 (Rio)



A Figura 49 apresenta as deformações causadas por cargas verticais nos trilhos no ponto 13. Os valores máximos de deformação para o trilho rio tem valores próximos de $180\mu\text{strain}$ enquanto o trilho cidade ficam próximos de $130\mu\text{strain}$.

Figura 49: Resultados da extensometria para a velocidade de 50km/h - Deformações verticais no Ponto 13

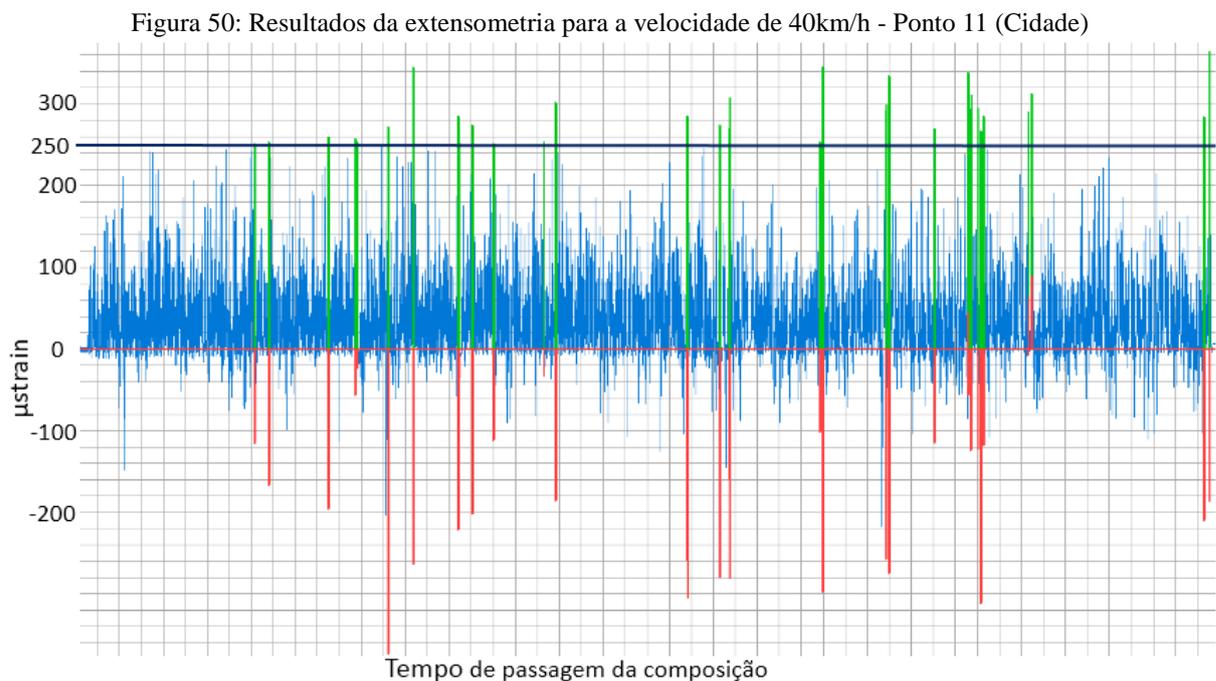


Pode-se observar que novamente, o trilho lado cidade apresenta menores valores de deformação vertical quando comparados ao lado rio.

Os picos encontrados no trilho rio podem ter sido ocasionados por uma diferença no contato roda trilho do local devido a alguma imperfeição na via. Pode-se observar pela Figura 49 que ocorreram valores superiores ao zero da medição para o lado rio. Isso indica uma possível mudança nos efeitos de deformação local do trilho.

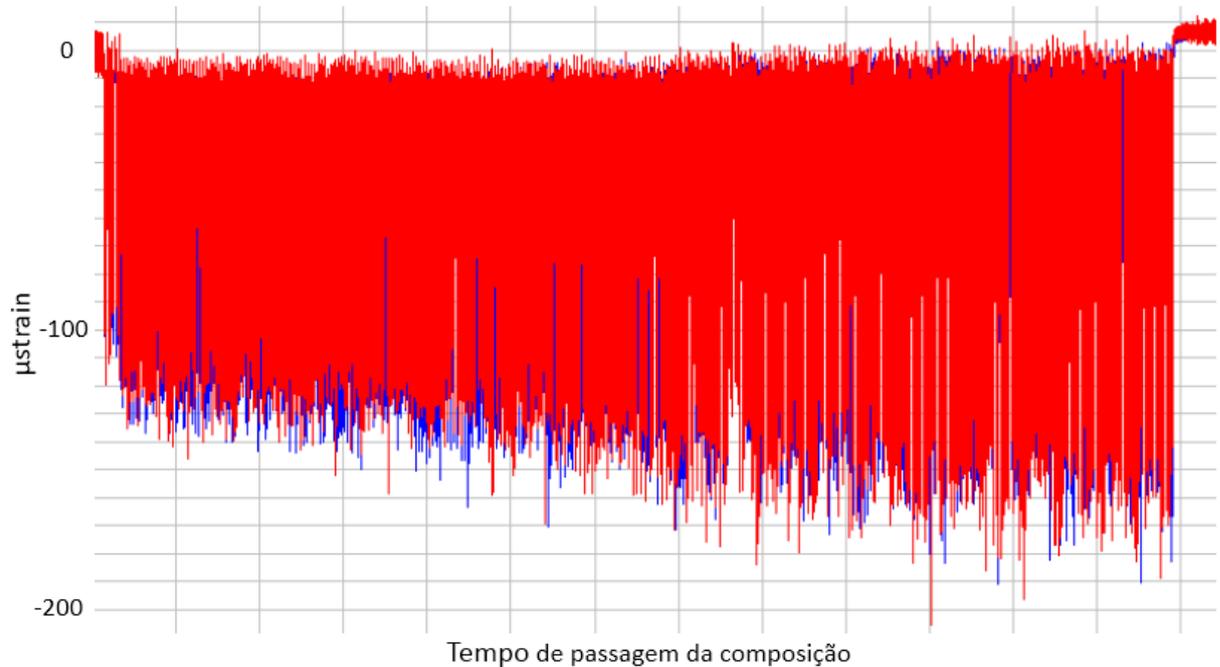
5.2.6 Velocidade de 40km/h

Ao analisarmos a velocidade de 40km/h da composição medida no dia 02 de novembro de 2017 as 04:24, foi observado que o trilho do lado cidade possui mais picos com valores de L/V acima de 0,8. A Figura 50 mostra os picos ocorridos no ponto 11 cidade, enquanto no ponto 11 rio, não houve nenhuma ocorrência.



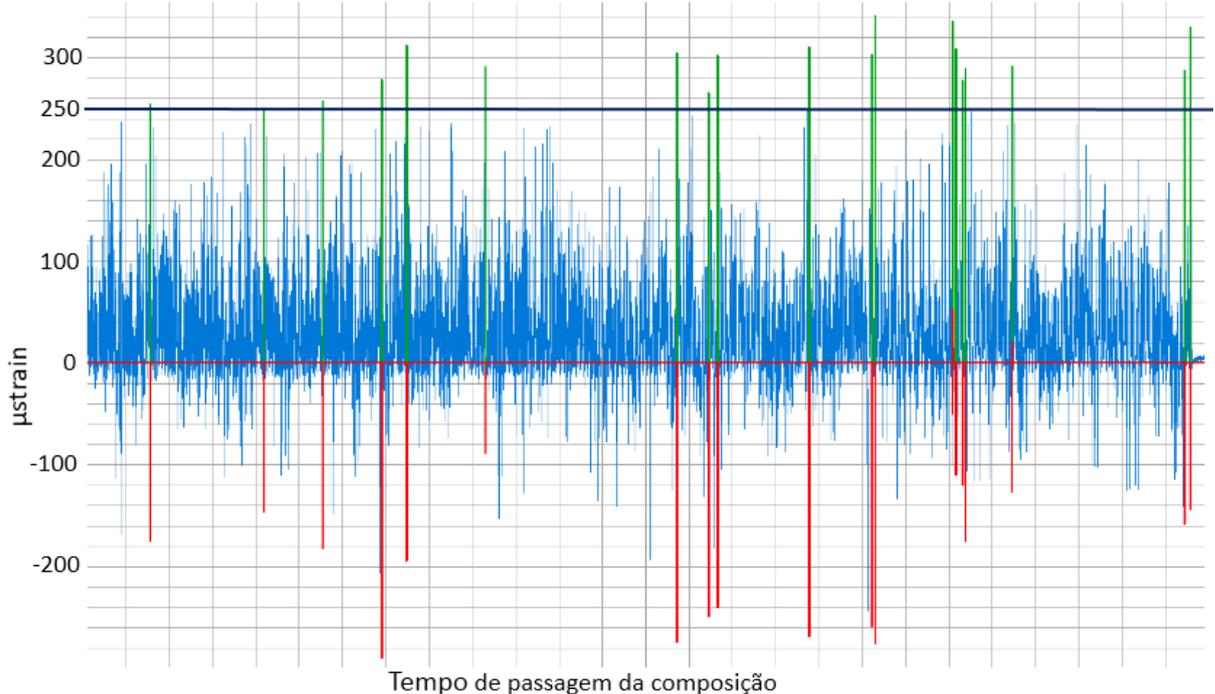
A análise das deformações verticais na linha no ponto 11 mostram que a deformação vertical sentida em ambos os trilhos durante a passagem de toda a composição é equivalente entre si. Os valores máximos de deformação para ambos os trilhos giram em torno de $150\mu\text{strain}$ no fim da medição.

Figura 51: Resultados da extensometria para a velocidade de 40km/h Deformações verticais do Ponto 11



Para o ponto 12, os mesmos resultados foram observados. A Figura 52 mostra os picos encontrados na medição para o lado cidade, enquanto o lado rio não houve ocorrência de nenhum pico.

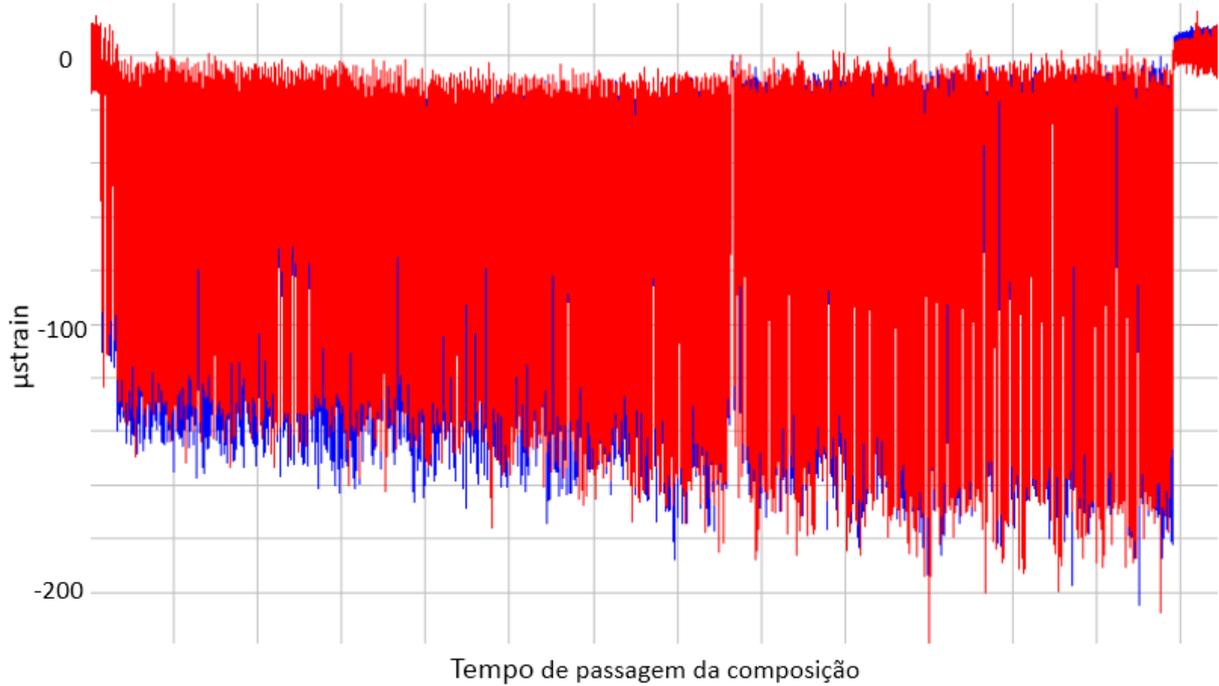
Figura 52: Resultados da extensometria para a velocidade de 40km/h Ponto 12 (Cidade)



A análise das deformações verticais na linha no ponto 12 mostram que a deformação vertical sentida em ambos os trilhos durante a passagem de toda a composição é equivalente

entre si. Os valores máximos da deformação para ambos os trilhos giram torno de $160\mu\text{strain}$ no fim da medição.

Figura 53: Resultados da extensometria para a velocidade de 40km/h Deformações Verticais do Ponto 12



Para o ponto 13, ambos os trilhos (cidade e rio) apresentaram picos acima de 0,8. A Figura 54 apresenta os picos para o trilho lado cidade enquanto a Figura 55 apresenta os picos para o trilho lado rio.

Figura 54: Resultados da extensometria para a velocidade de 40km/h Ponto 13 (Cidade)

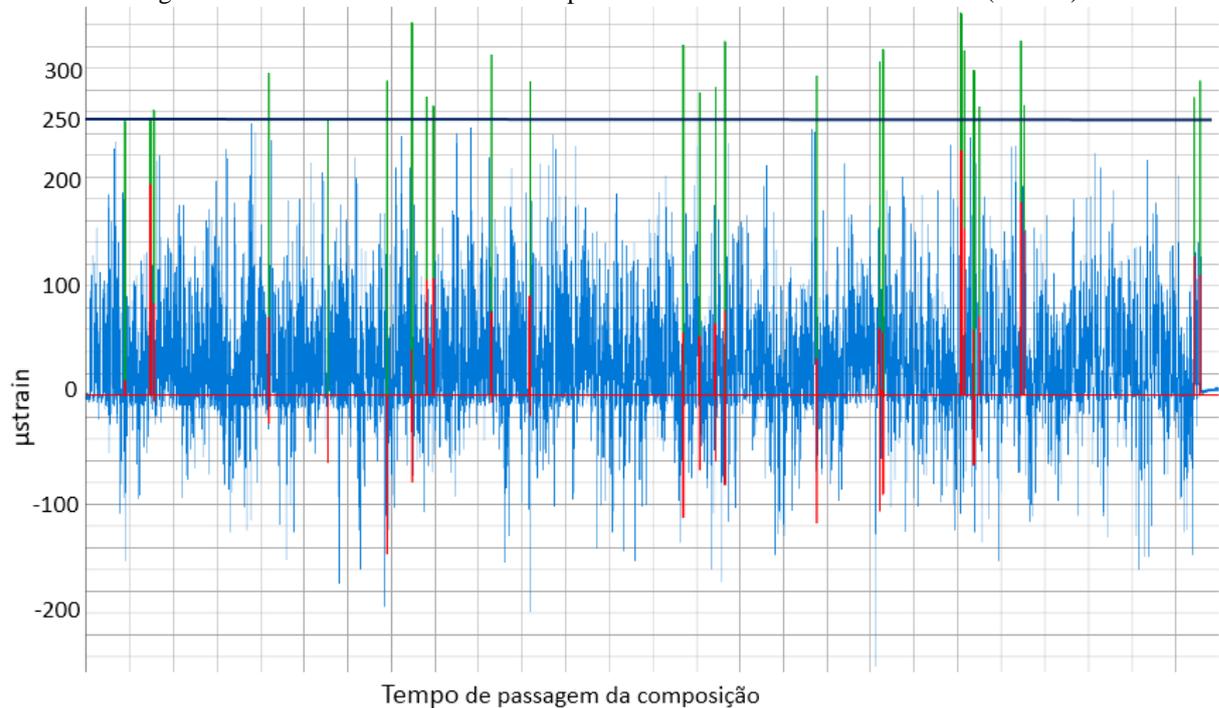
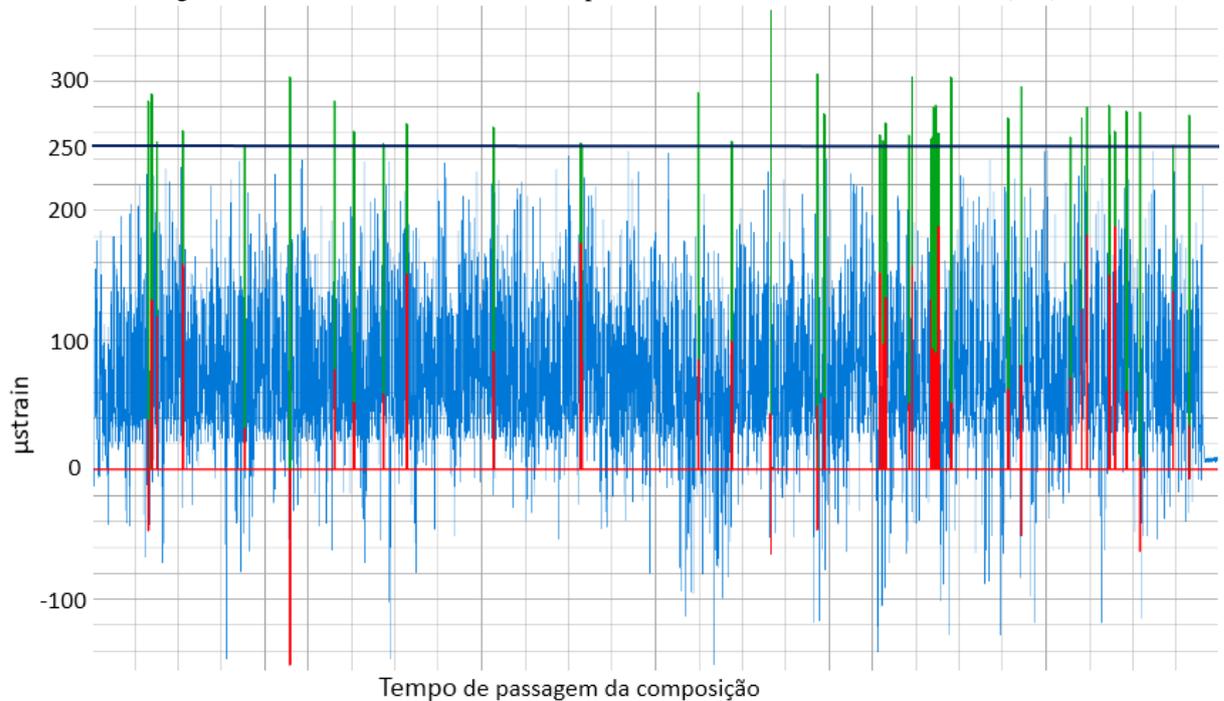
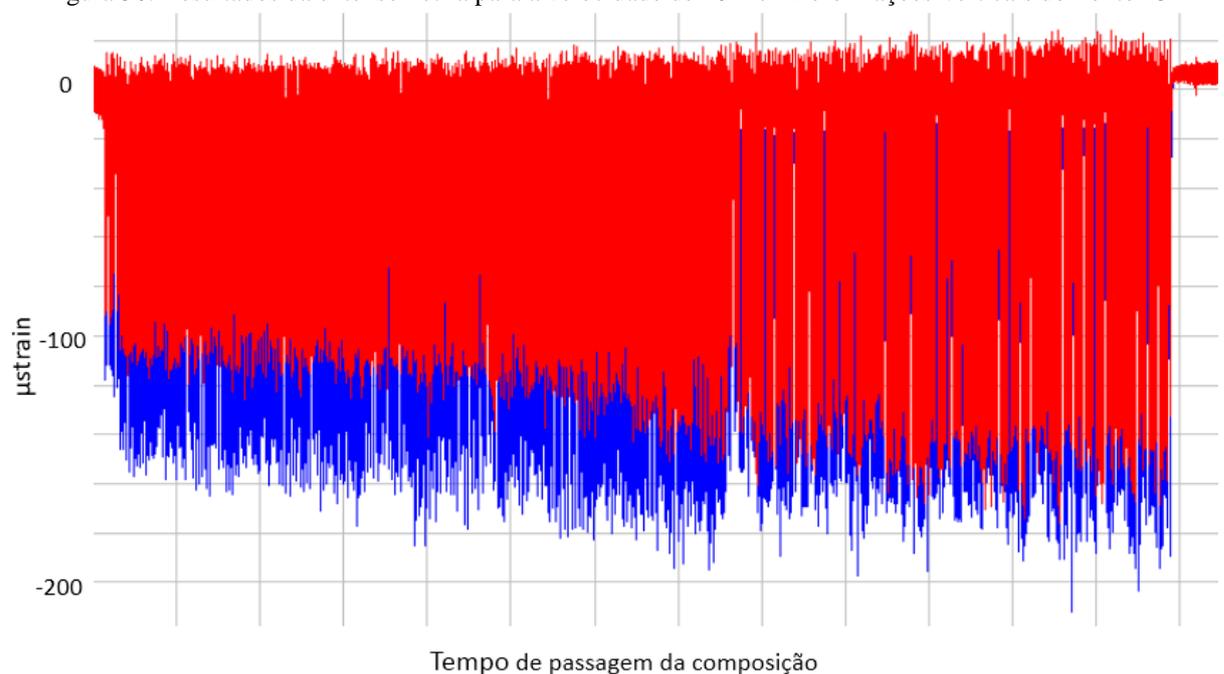


Figura 55: Resultados da extensometria para a velocidade de 40km/h Ponto 13 (Rio)



A análise das deformações verticais na linha no ponto 11 mostram que a deformação vertical no trilho lado cidade é maior do que a deformação no trilho lado rio no início da medição. Em ambos os trilhos, no final da medição, os valores de deformação são equivalentes entre si. Os valores máximos de deformação no início da medição são de aproximadamente 110 μstrain para o trilho lado rio e de 150 μstrain para o trilho lado cidade. No final da medição, ambos os trilhos possuem valores máximos próximos à 160 μstrain .

Figura 56: Resultados da extensometria para a velocidade de 40km/h Deformações Verticais do Ponto 13



A velocidade de 40km/h foi a que apresentou melhor distribuição de cargas verticais nos dois trilhos quando comparados as velocidades de 50km/h e 60km/h e também foi a que apresentou menores valores de deformação vertical entre as velocidades analisadas.

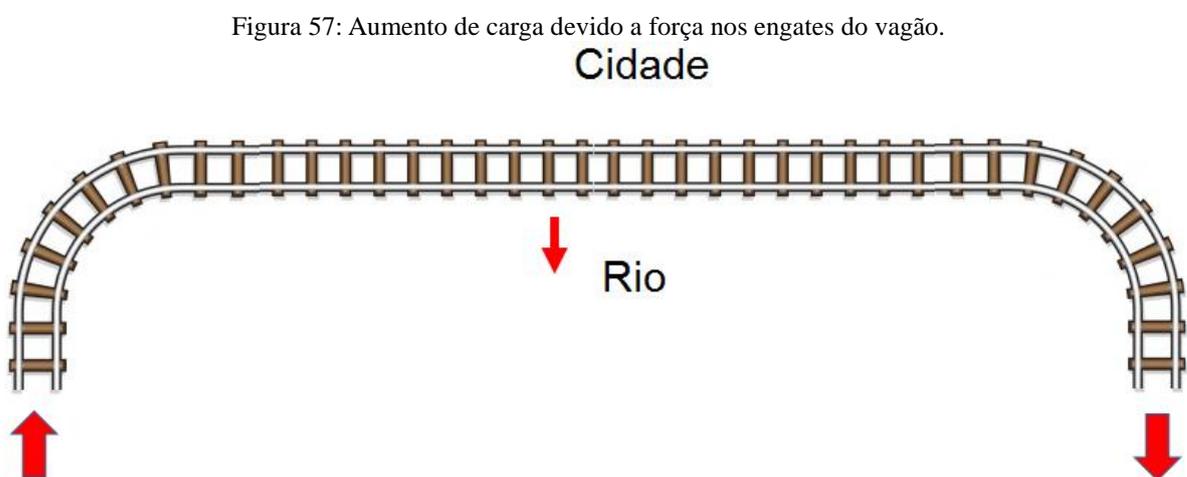
A Tabela 4 mostra a quantidade de medições com coeficiente L/V acima de 0,8 encontrados na análise do trilho lado cidade de duas composições distintas nas velocidades de 40km/h, 50km/h e 60km/h.

Tabela 4: Quantidade de medições com L/V maior que 0,8

	Picos		
	40 km/h	50 km/h	60 km/h
Ponto 11	65	77	41
Ponto 12	33	08	21
Ponto 13	36	11	19
Soma	134	96	81

Pode-se observar que a velocidade de 40km/h é a mais crítica tendo um aumento na ocorrência de picos de 67% em relação a velocidade de 60km/h. Também é possível observar que a ocorrência de picos no ponto 11 é significativamente maior do que nos pontos subsequentes, para as três velocidades.

A Figura 57 apresenta o sentido de circulação de um vagão carregado de minério. Para velocidades acima de 40km/h, a força nos engates gera uma força maior e contrária do que a tendência da força centrípeta ao final do trecho curvo, aumentando a carga no trilho lado rio.



6 CONCLUSÃO

Foi possível caracterizar diversos tipos de problemas durante a análise realizada em relação à velocidade de operação e trechos na via.

A velocidade de 40km/h foi a mais crítica apresentando uma maior frequência de picos que excederam o valor de L/V de 0,8. Os valores de deformação vertical obtidos nesta velocidade foram os menores dentre as outras velocidades de operação, o que contribuiu com uma menor carga vertical, aumentando-se o valor do coeficiente de Nadal. Contudo, a velocidade de 40km/h foi a que apresentou melhor uniformidade de distribuição de cargas verticais em ambos os trilhos.

Os pontos instrumentados na via que mais apresentaram picos acima de 0,8 foram os pontos 11, 12 e 13.

Como os vagões não apresentam motores acoplados em suas rodas sendo tracionados apenas pelas locomotivas têm-se uma disputa entre a força centrípeta e a força de tração causada pelas locomotivas nos vagões. Para velocidades de aproximadamente 40km/h estas forças estabilizam a carga vertical em ambos os trilhos. Para velocidades superiores a 40km/h a força de tração das locomotivas gera um efeito nos vagões com um tendência de aumentar as cargas verticais no trilho rio e diminuição das cargas verticais no trilho cidade.

7 BIBLIOGRAFIA

- [1] ADOLFATO, Rodrigo Piernas; CAMACHO, Jefferson Sidney; BRITO, Gilberto Antônio de. **Extensometria Básica**. Ilha Solteira: Nepae, 2004. 46 p;
- [2] DALLY, James W. **Experimental stress analysis**. 3. ed. New York: Mcgraw-hill, 2000. 639 p;
- [3] COIMBRA, Marcelo do Vale. **MODOS DE FALHA DOS COMPONENTES DA VIA PERMANENTE FERROVIÁRIA E SEUS EFEITOS NO MEIO AMBIENTE**. 2008. 168 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Transportes, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2008;
- [4] GWALIOR, MAHARAJPUR, **A Technical Guide on Derailments**, CAMTECH/M/3, Abril 1998;
- [5] MACEDO, Fernanda Bittencourt. **ESTUDO DO DESGASTE DE TRILHOS FERROVIÁRIOS**. 2009. 50 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Produção, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2009;
- [6] MARQUIS, Brian; GREIF, Robert. Application of Nadal Limit for the Prediction of Wheel Climb Derailment. **2011 Joint Rail Conference**, [s.l.], v. 1, n. 1, p.273-280, 2011. ASME. <http://dx.doi.org/10.1115/jrc2011-56064>;
- [7] MAZILU, Traian. AN ANALYSIS OF BOGIE HUNTING INSTABILITY. **Upb Scientific Bulletin**, Bucureste, v. 2, n. 71, p.63-78, jan. 2009.
- [8] McCLANACHAM, M; DHANASEKAR, M; SKERMAN, D and DAVEY, J. **Monitoring the Dynamics of Freight Wagons**. em: CORE 2002: Cost Efficient Railways through Engineering. Wollongong, N.S.W.: Railway Technical Society of Australasia/Rail Track Association of Australia, 2002: 213-221;
- [9] NATIONAL INSTRUMENTS, NI cDAQ-9172 User Manual, Junho, 2008. 84p.;
- [10] VISHAY PRECISION GROUP, Instruction Bulletin B-127-14 – **Strain Gage Installations with M-Bond 200 Adhesive**, Micro-Measurements, Rev 14, 2011;
- [11] VISHAY PRECISION GROUP, Instruction Bulletin B-129-8 – **Surface Preparation for Strain Gage Bonding**, Micro-Measurements, Rev 19, 2011;

8 APÊNDICE I – RESULTADOS DA ANÁLISE DA VIA FÉRREA

8.1 Composição 1

Figura 58: Resultados da extensometria da composição 1 - Ponto 6 (Cidade)

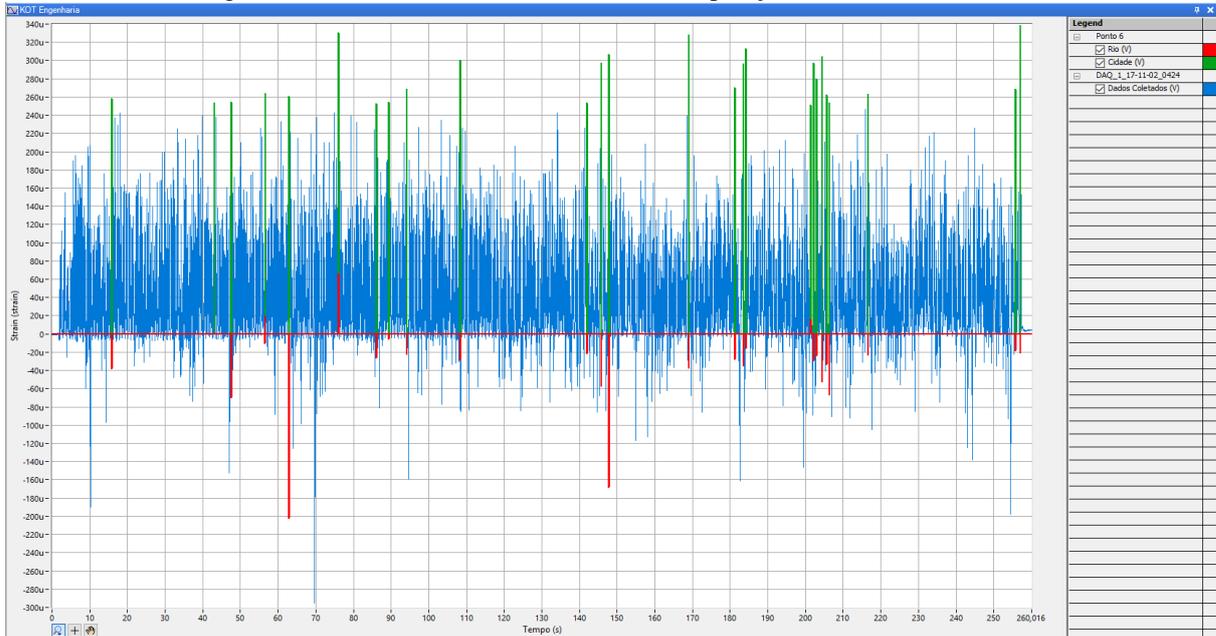


Figura 59: Composição 1 - Ponto 7 (Cidade)

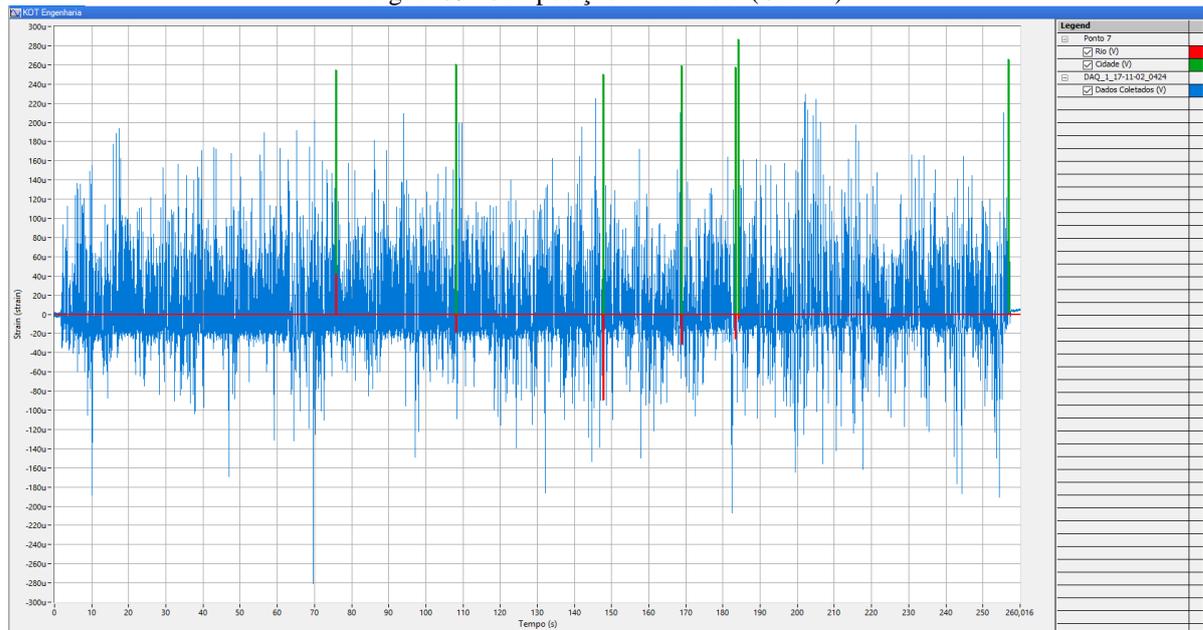


Figura 60: Resultados da extensometria da composição 1 - Ponto 8 (Cidade)

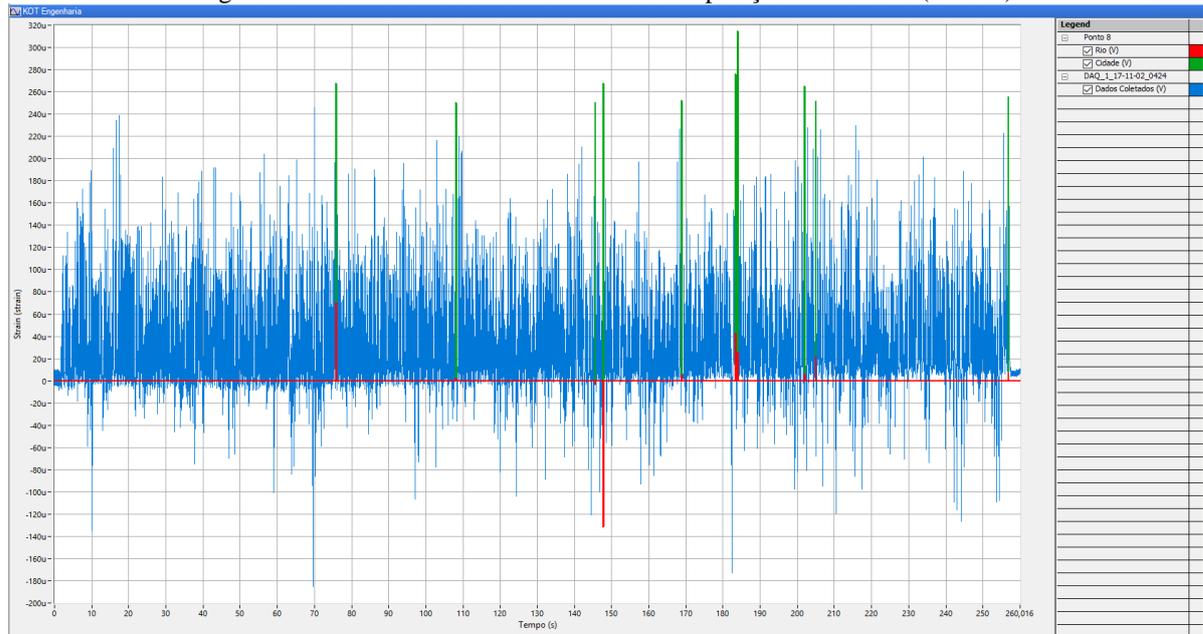


Figura 61: Composição 1 - Ponto 9 (Cidade)

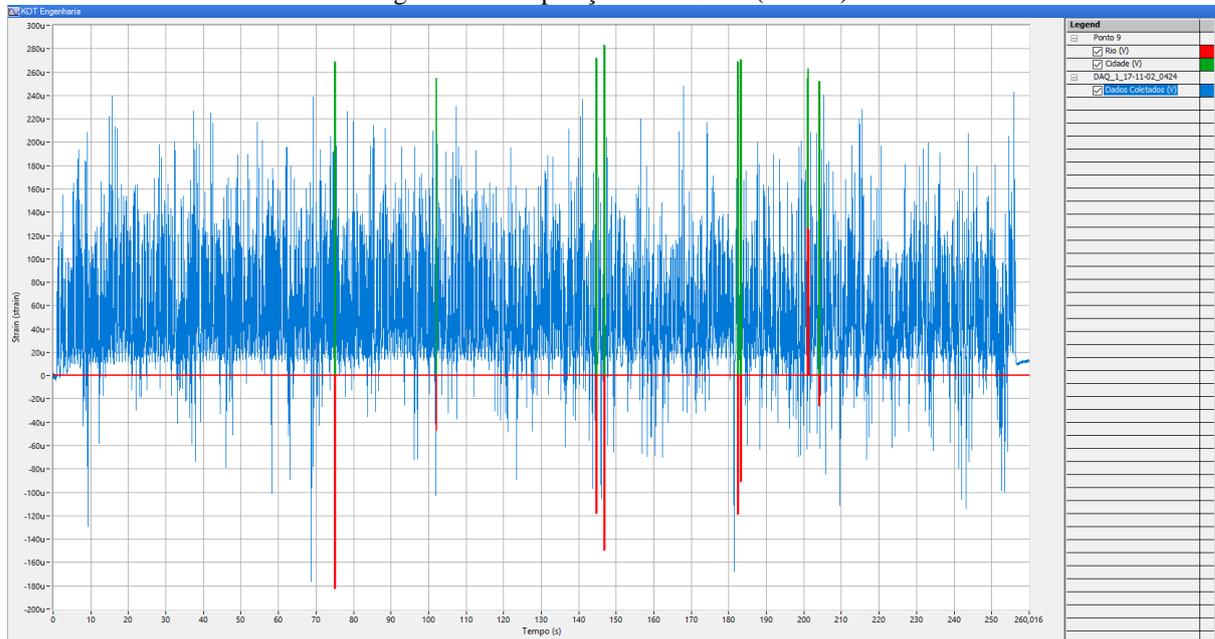


Figura 62: Resultados da extensometria da composição 1 - Ponto 10 (Cidade)

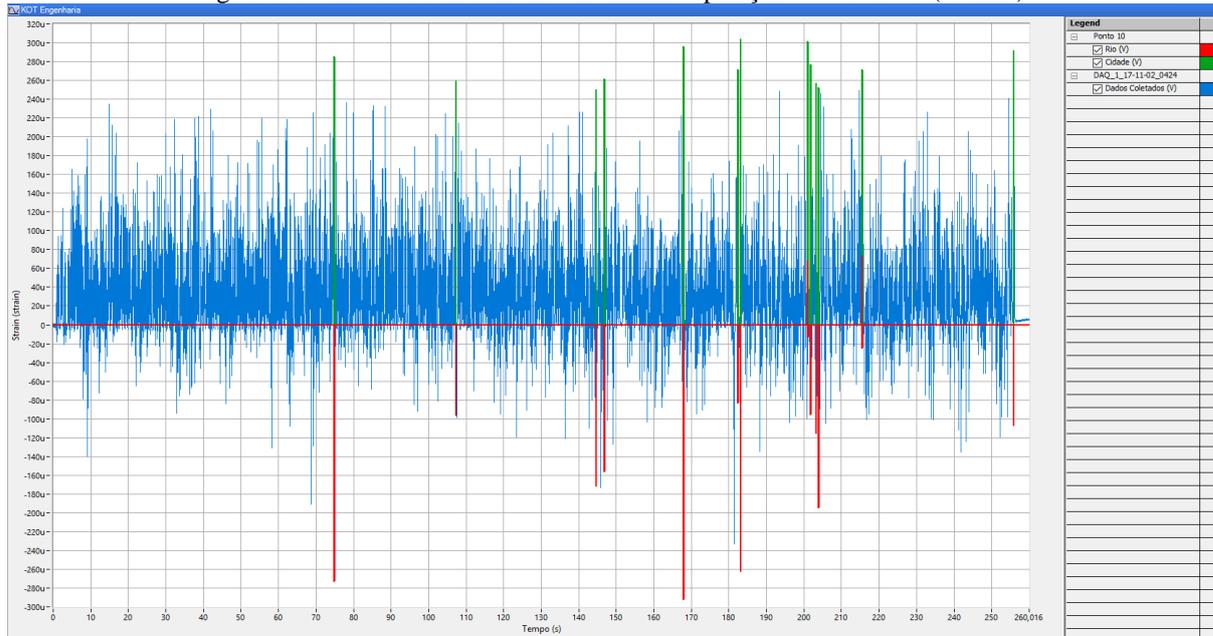


Figura 63: Composição 1 - Ponto 14 (Cidade)

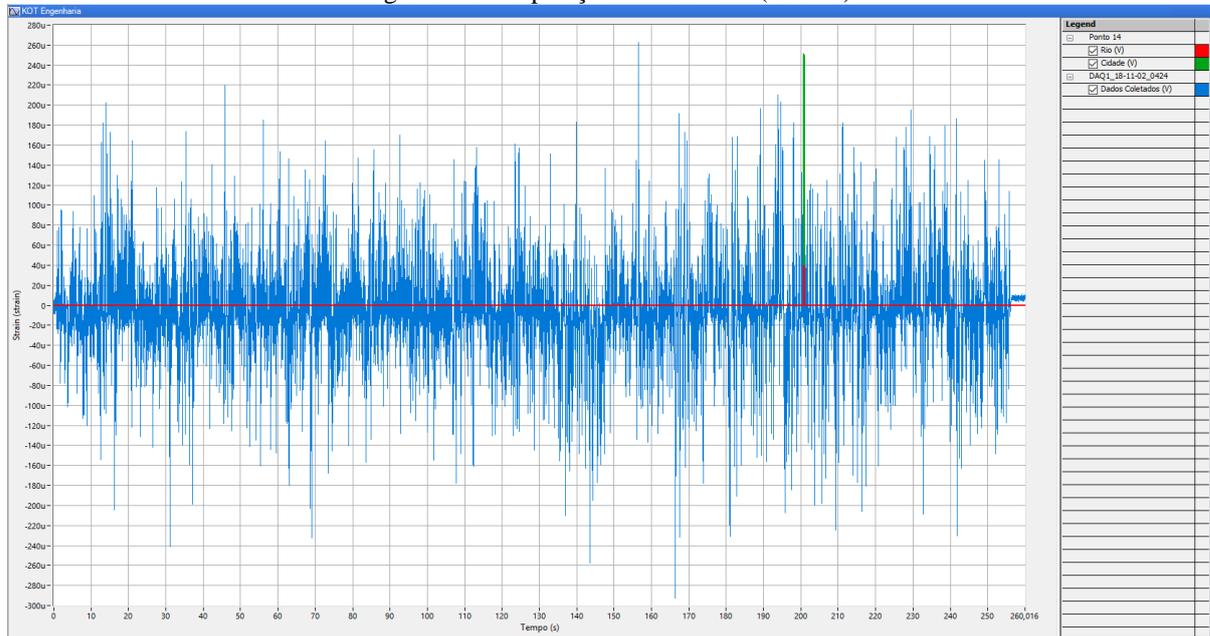


Figura 64: Resultados da extensometria da composição 1 - Ponto 16 (Cidade)

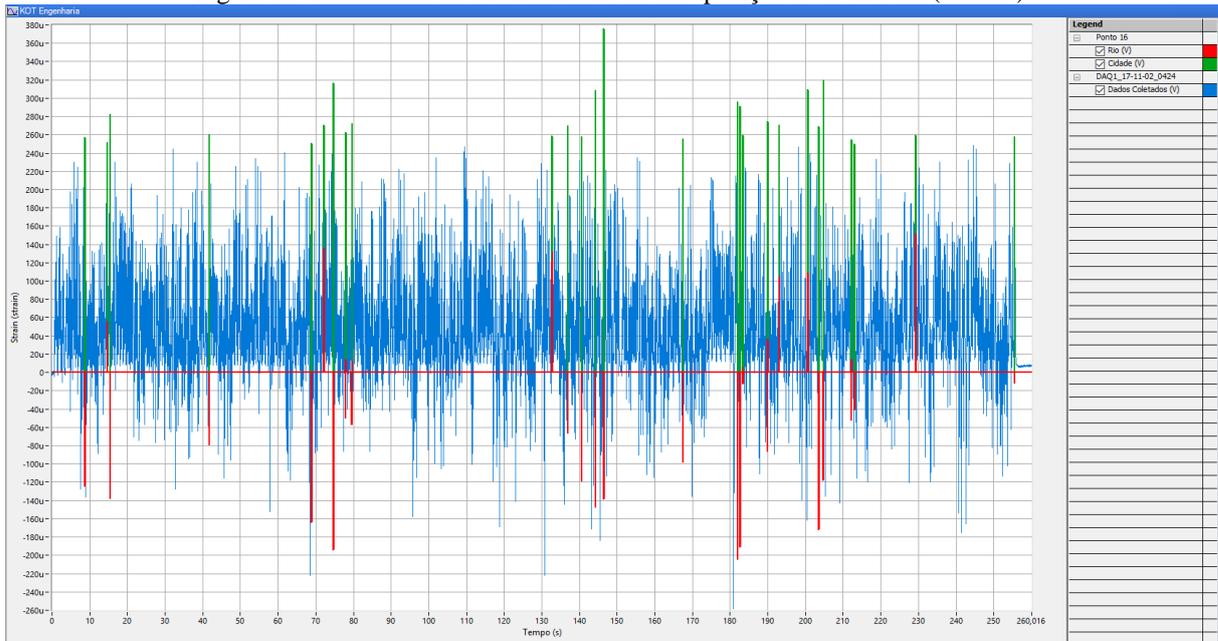


Figura 65: Composição 1 - Ponto 17 (Cidade)

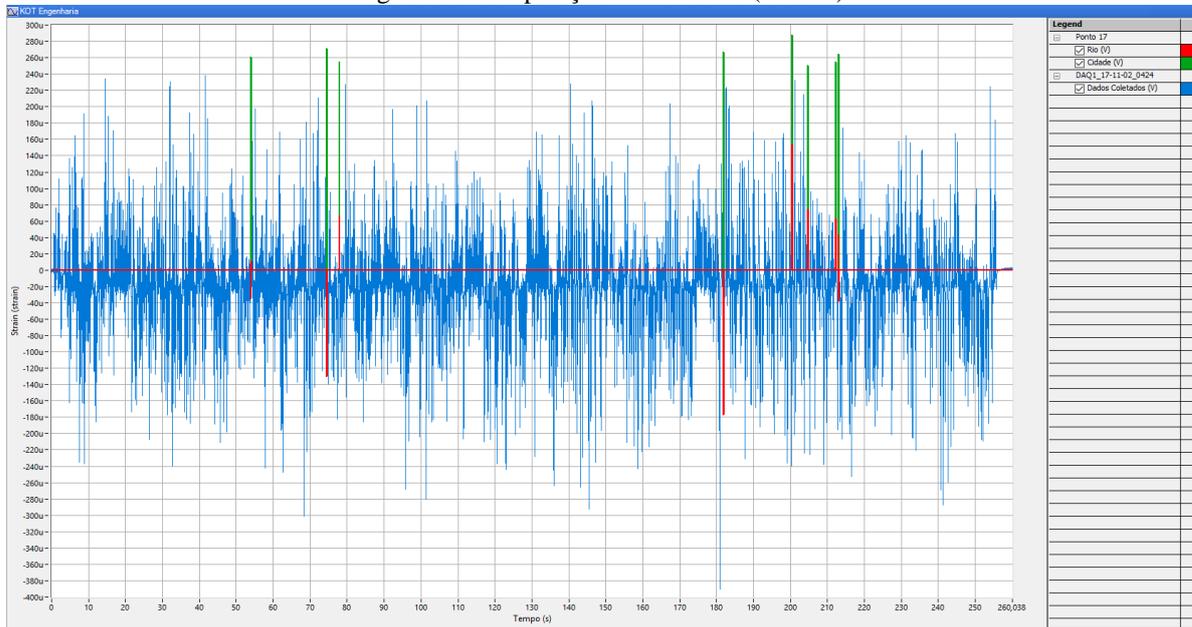


Figura 66: Resultados da extensometria da composição 1 - Ponto 18 (Cidade)

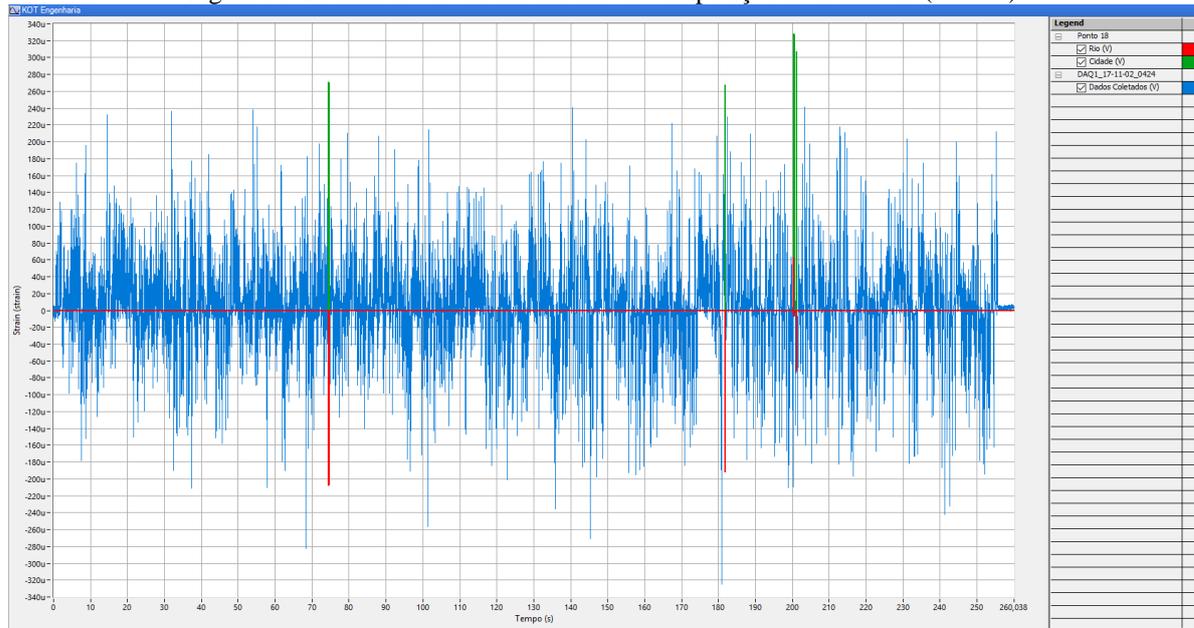


Figura 67: Composição 1 - Ponto 19 (Cidade)

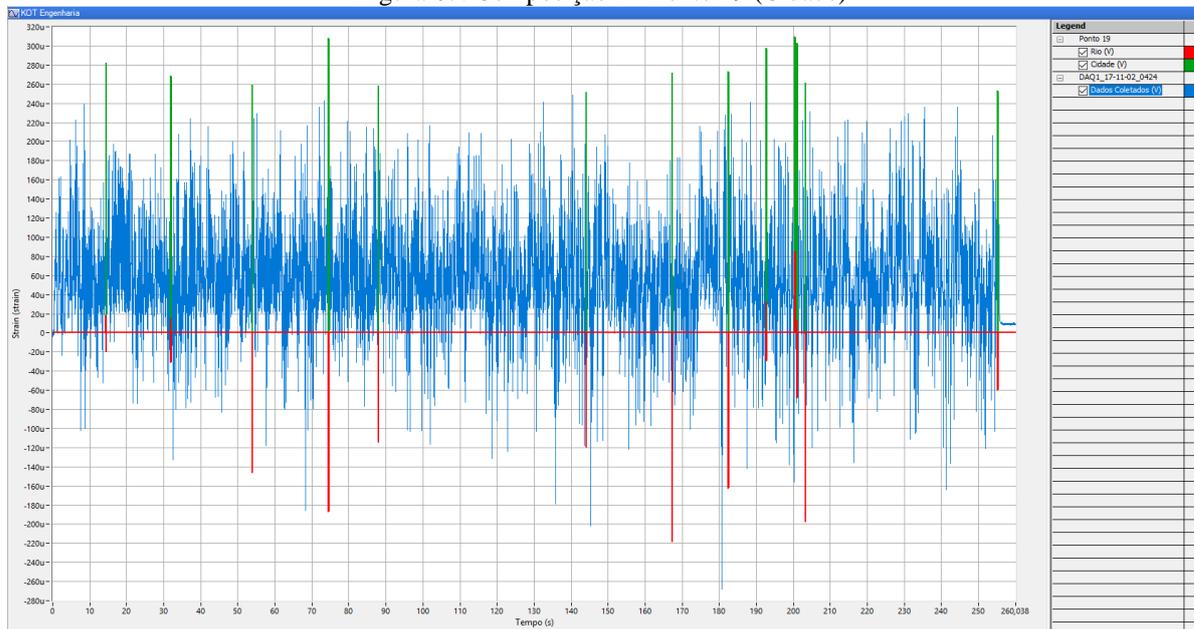


Figura 68: Resultados da extensometria da composição 1 - Ponto 7 (Rio)

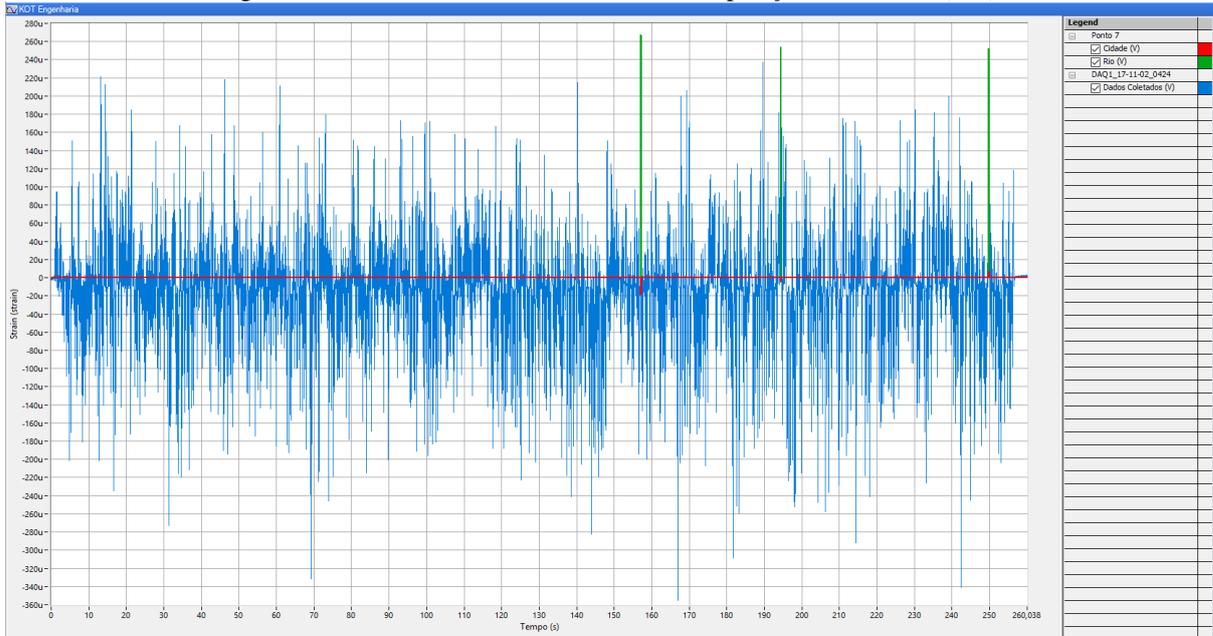


Figura 69: Composição 1 - Ponto 8 (Rio)

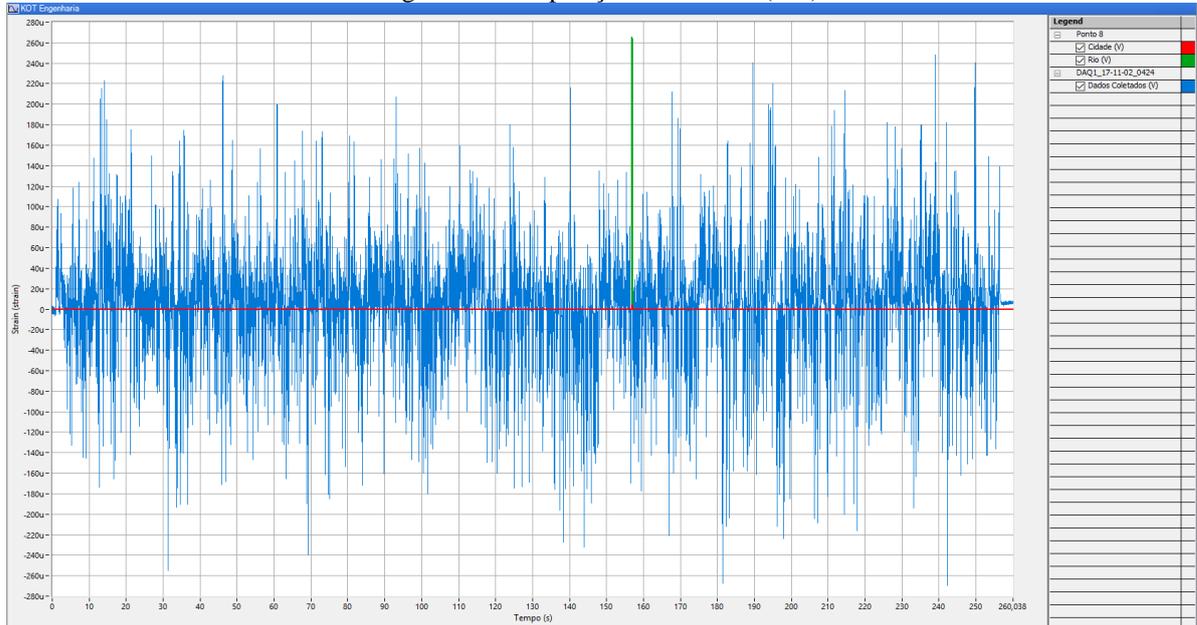


Figura 70: Resultados da extensometria da composição 1 - Ponto 9 (Rio)

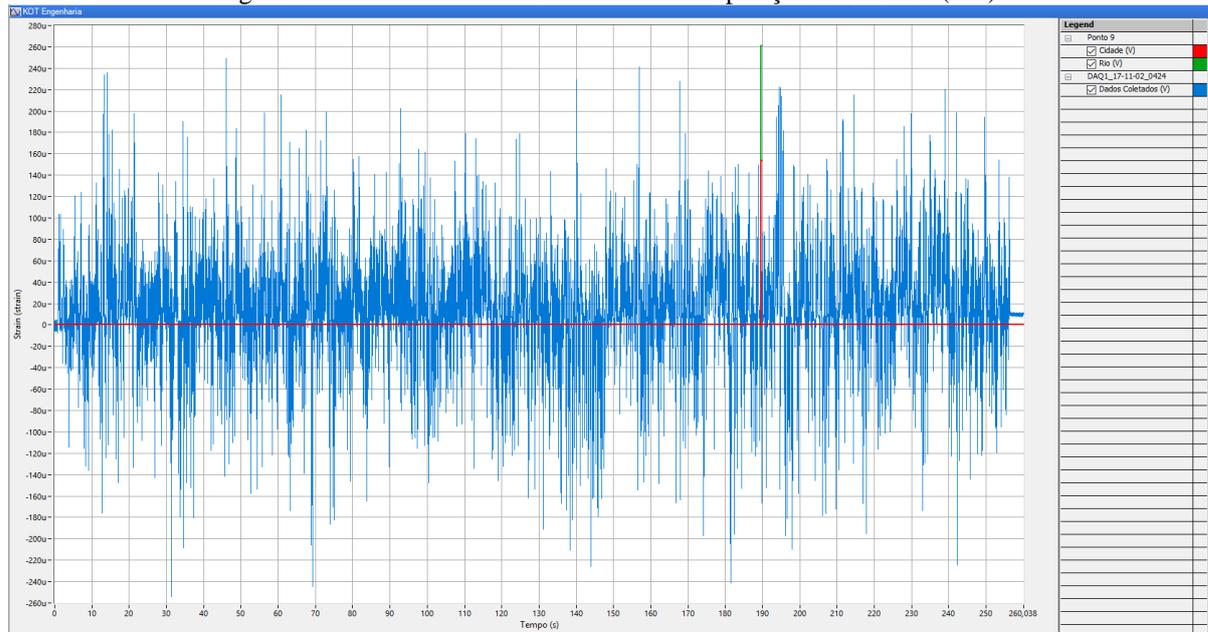


Figura 71: Resultados da extensometria da composição 1 - Ponto 13 (Rio)

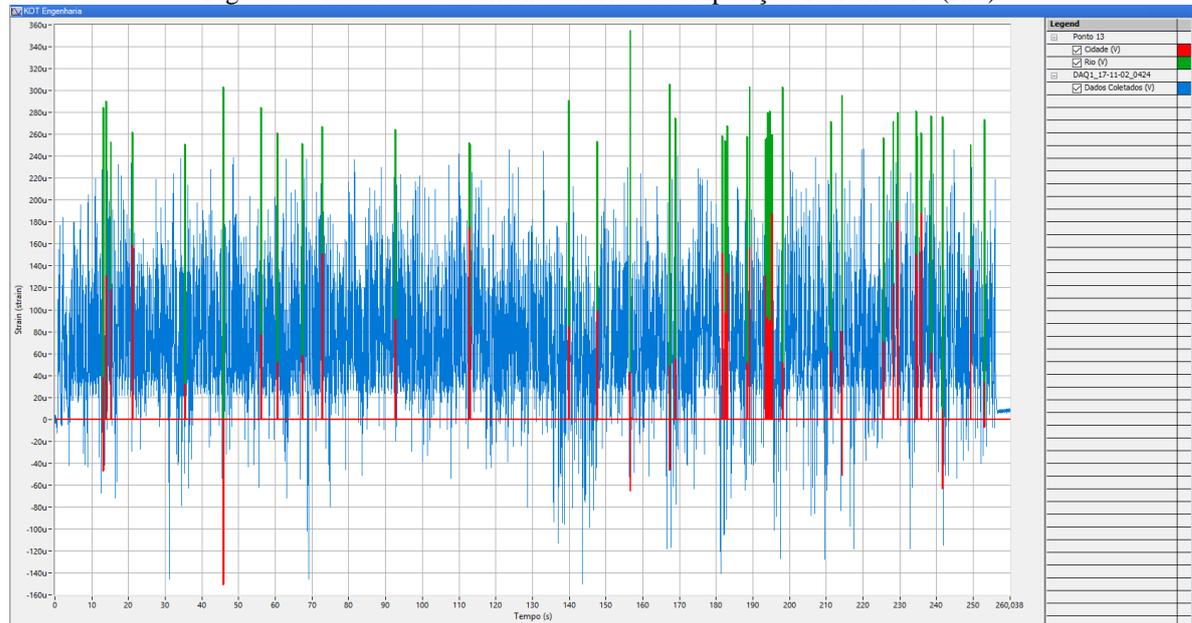


Figura 72: Resultados da extensometria da composição 1 - Ponto 14 (Rio)

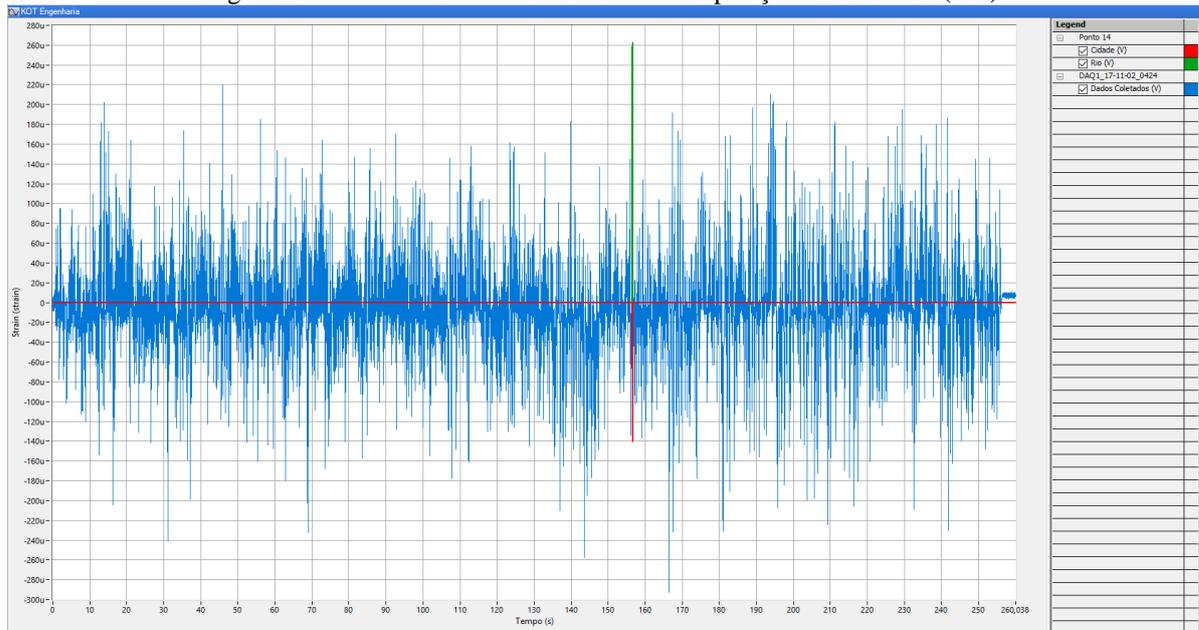


Figura 73: Resultados da extensometria da composição 1 - Ponto 13 (Rio)

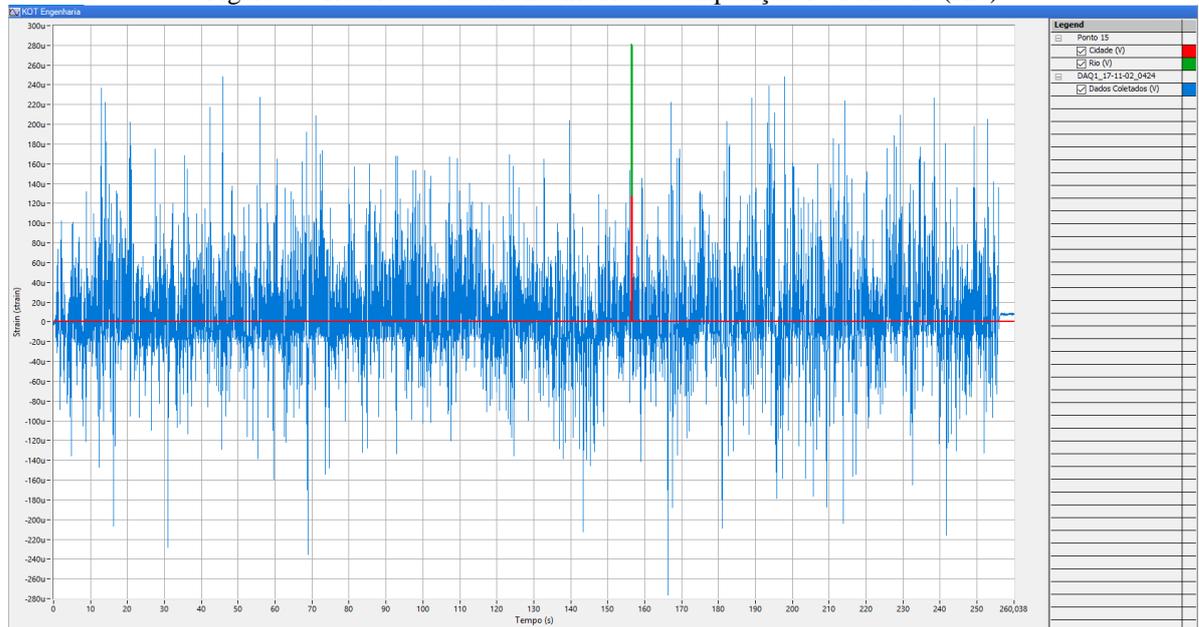


Figura 74: Resultados da extensometria da composição 1 - Ponto 16 (Rio)

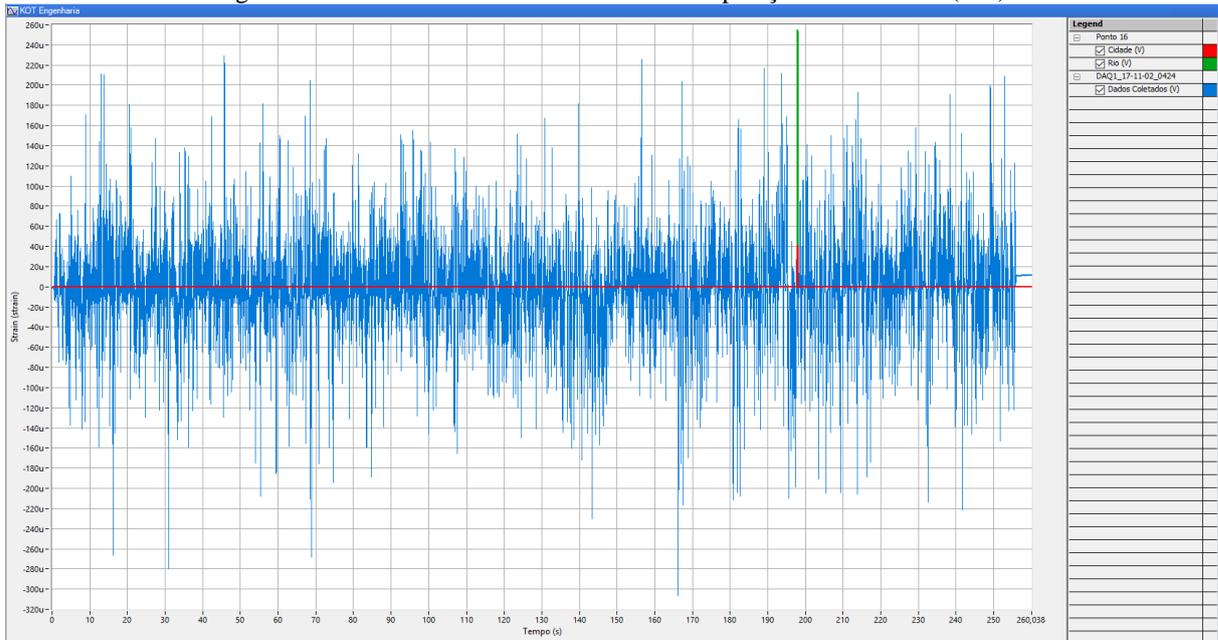


Figura 75: Resultados da extensometria da composição 1 - Ponto 18 (Rio)

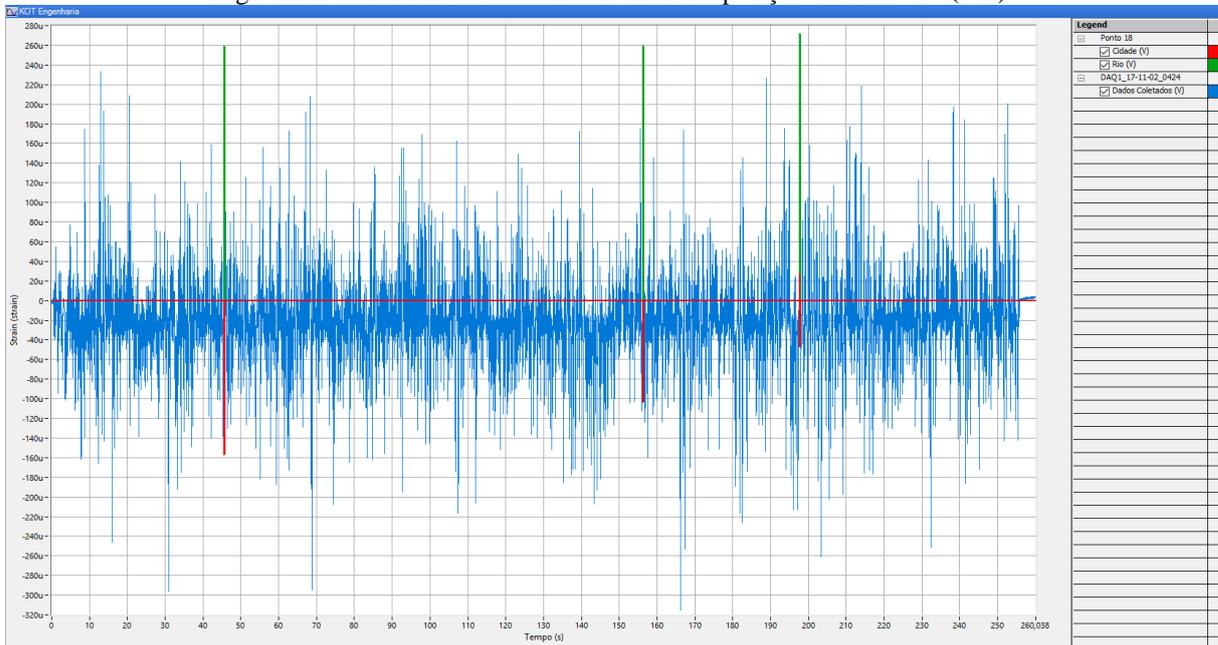


Figura 76: Resultados da extensometria da composição 1 - Ponto 19 (Rio)

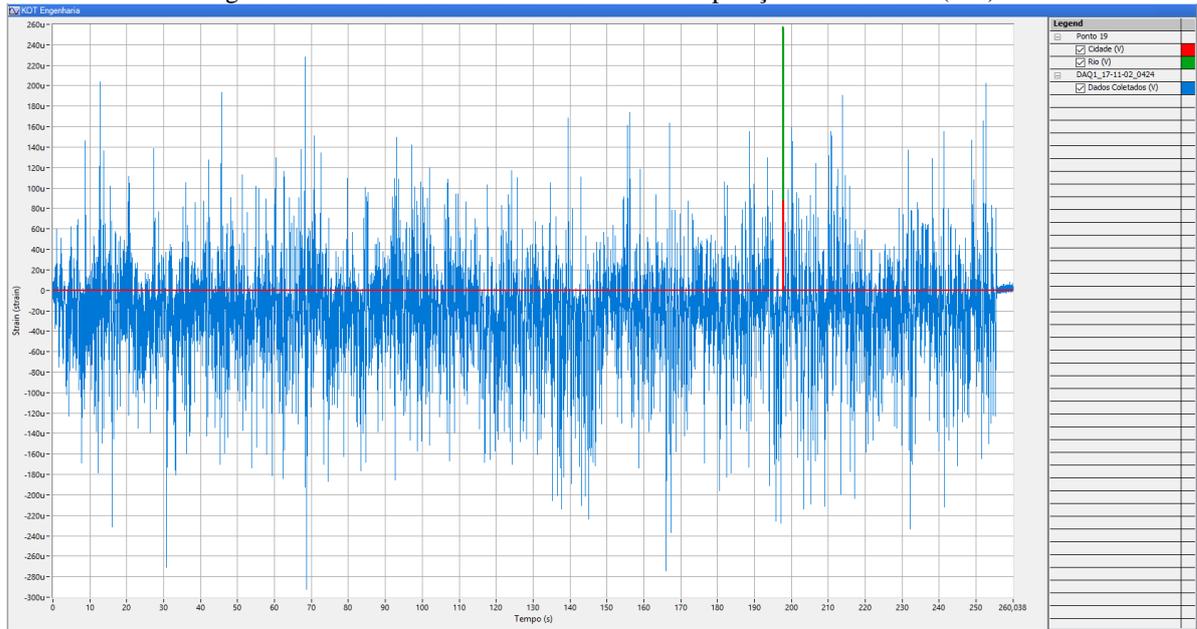
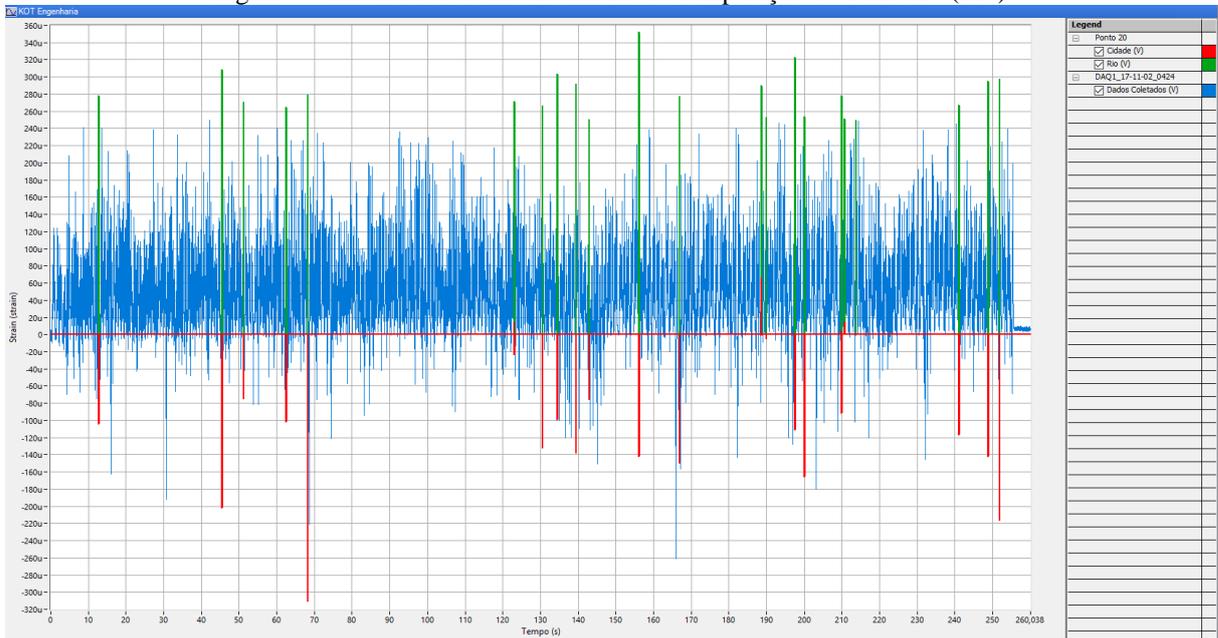


Figura 77: Resultados da extensometria da composição 1 - Ponto 20 (Rio)



8.2 Composição 2

Figura 78: Resultados da extensometria da composição 2 - Ponto 6 (Cidade)

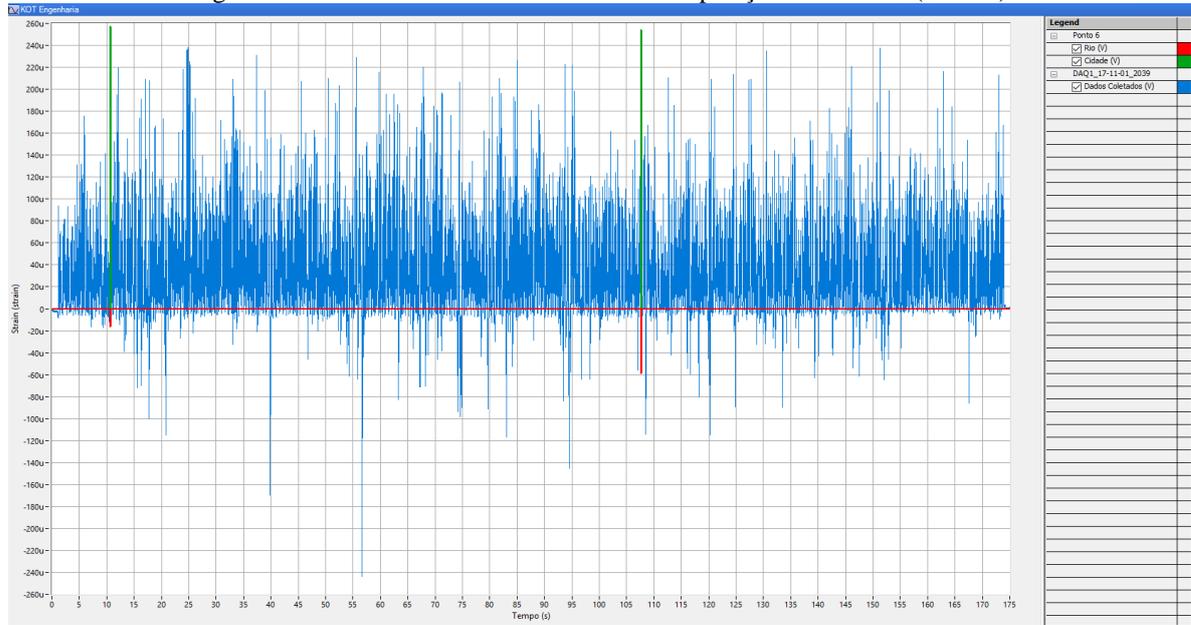


Figura 79: Resultados da extensometria da composição 2 - Ponto 16 (Cidade)

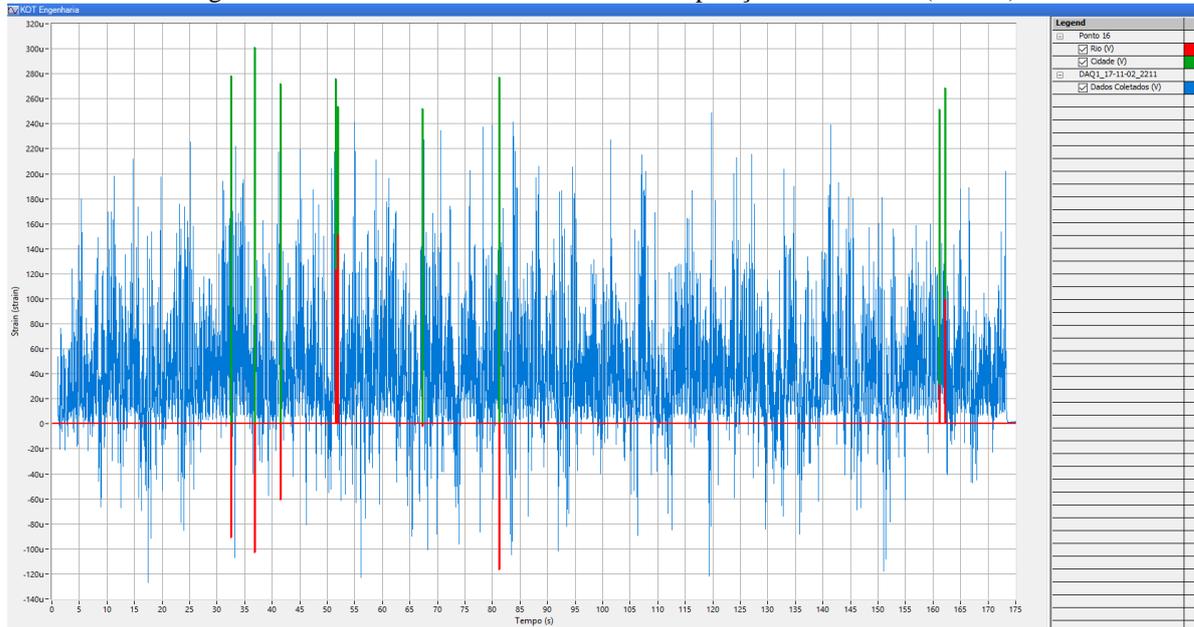


Figura 80: Resultados da extensometria da composição 2 - Ponto 17 (Cidade)

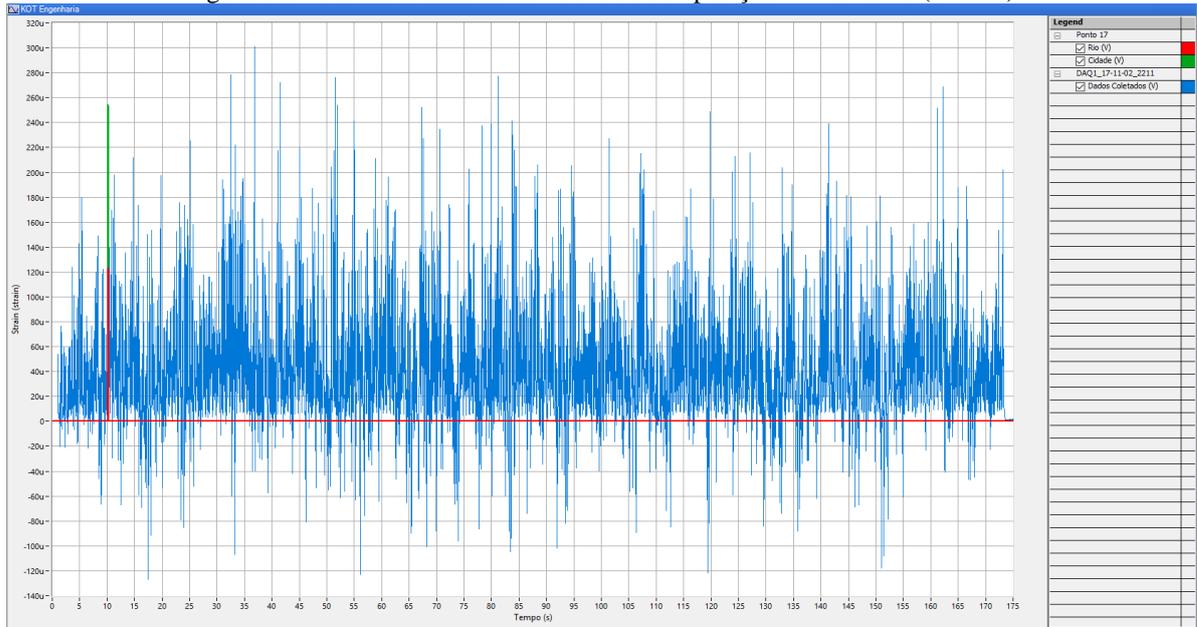


Figura 81: Resultados da extensometria da composição 2 - Ponto 6 (Rio)

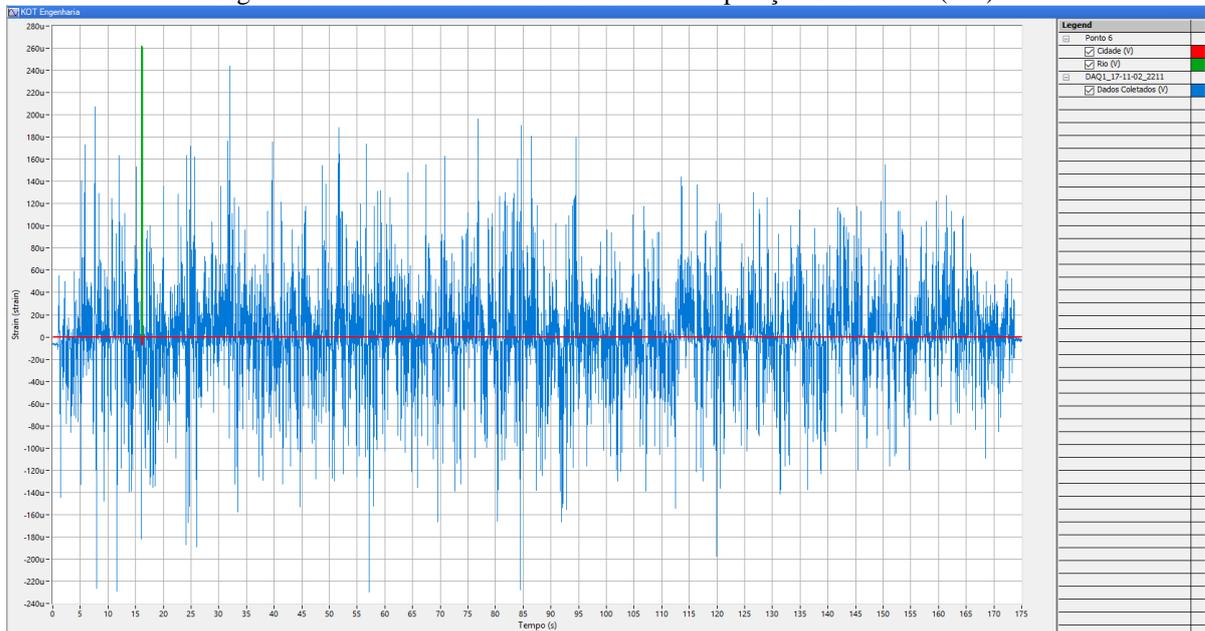


Figura 82: Resultados da extensometria da composição 2 - Ponto 7 (Rio)

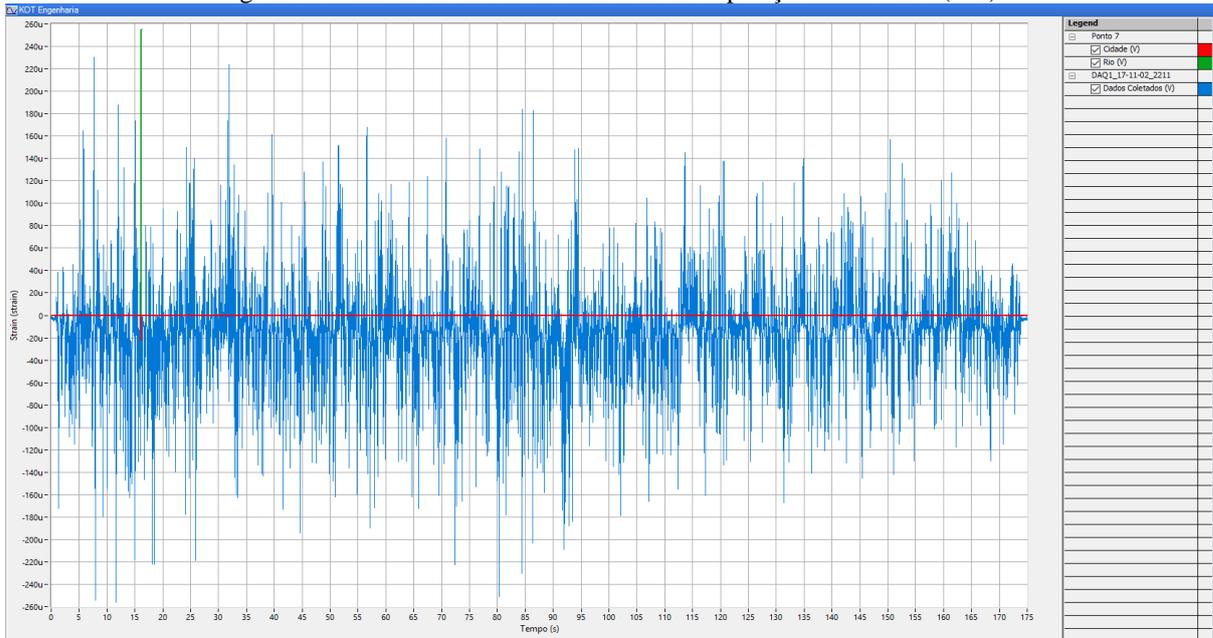


Figura 83: Resultados da extensometria da composição 2 - Ponto 9 (Rio)

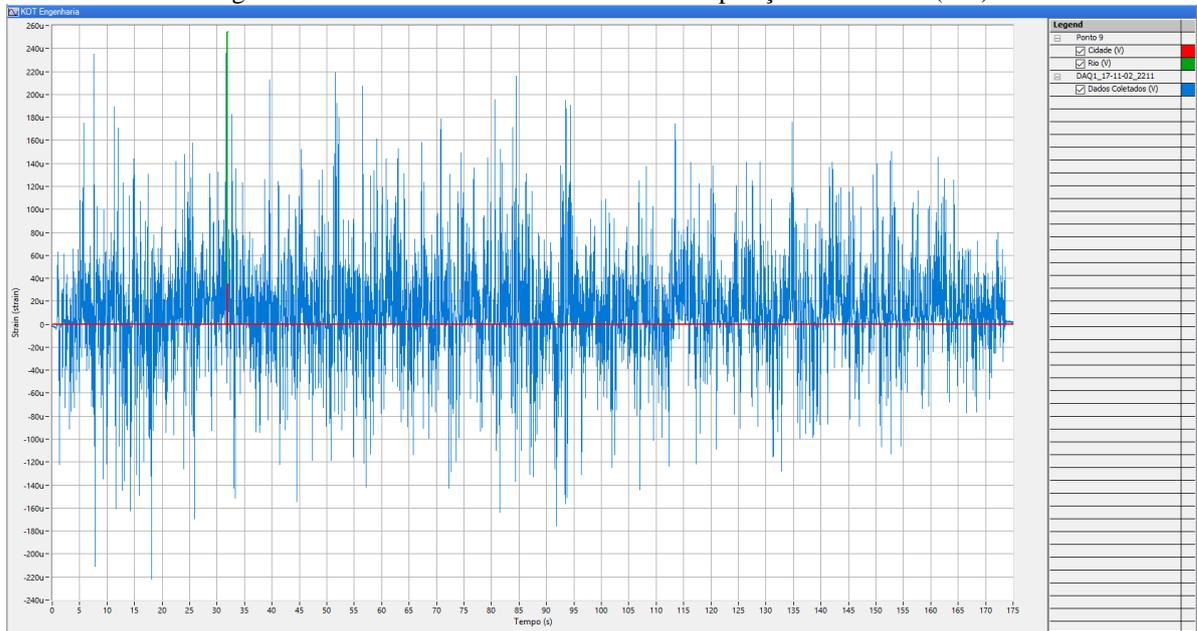
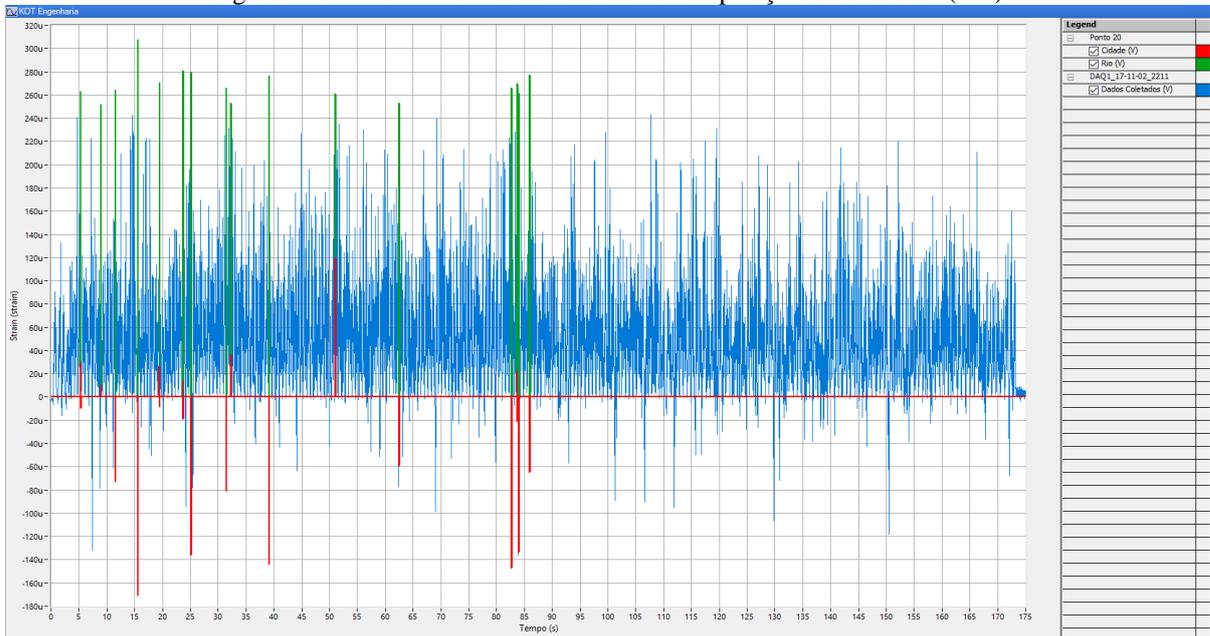


Figura 84: Resultados da extensometria da composição 2 - Ponto 13 (Rio)



Figura 85: Resultados da extensometria da composição 2 - Ponto 20 (Rio)



8.3 Composição 3

Figura 86: Resultados da extensometria da composição 3- Ponto 6 (Cidade)

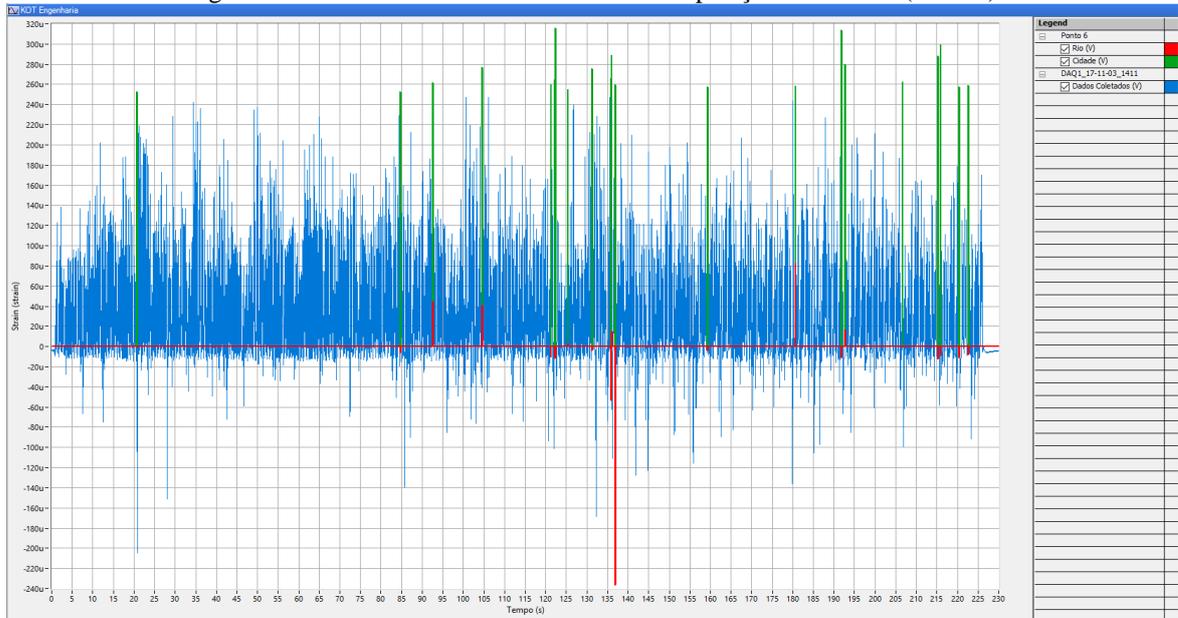


Figura 87: Resultados da extensometria da composição 3- Ponto 8 (Cidade)

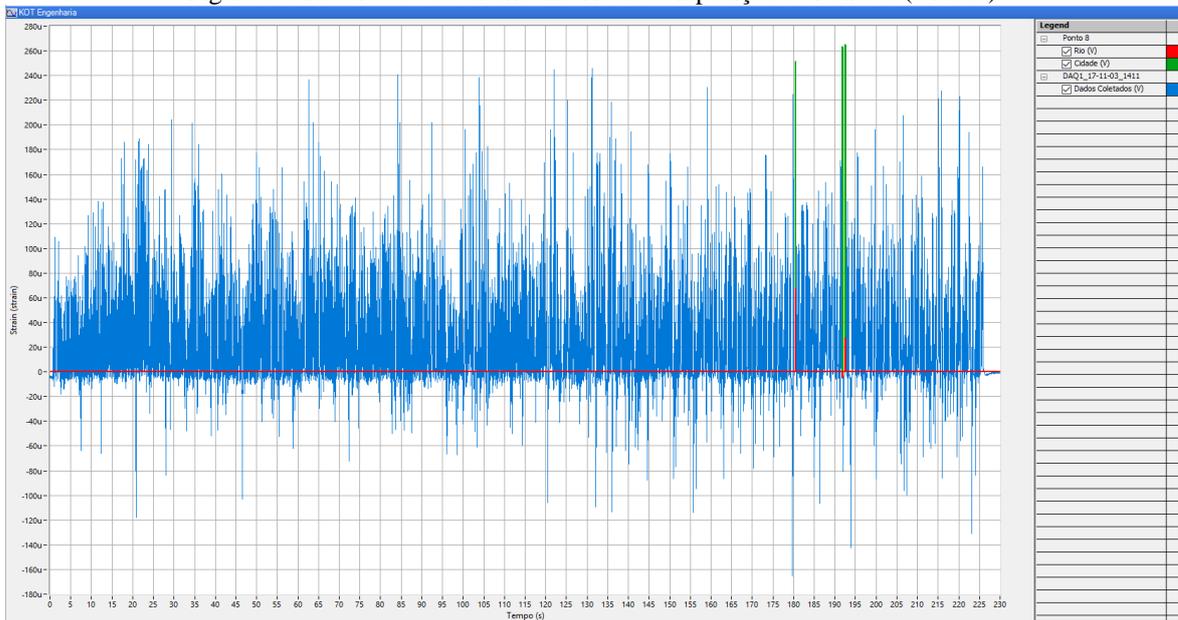


Figura 88: Resultados da extensometria da composição 3- Ponto 9 (Cidade)

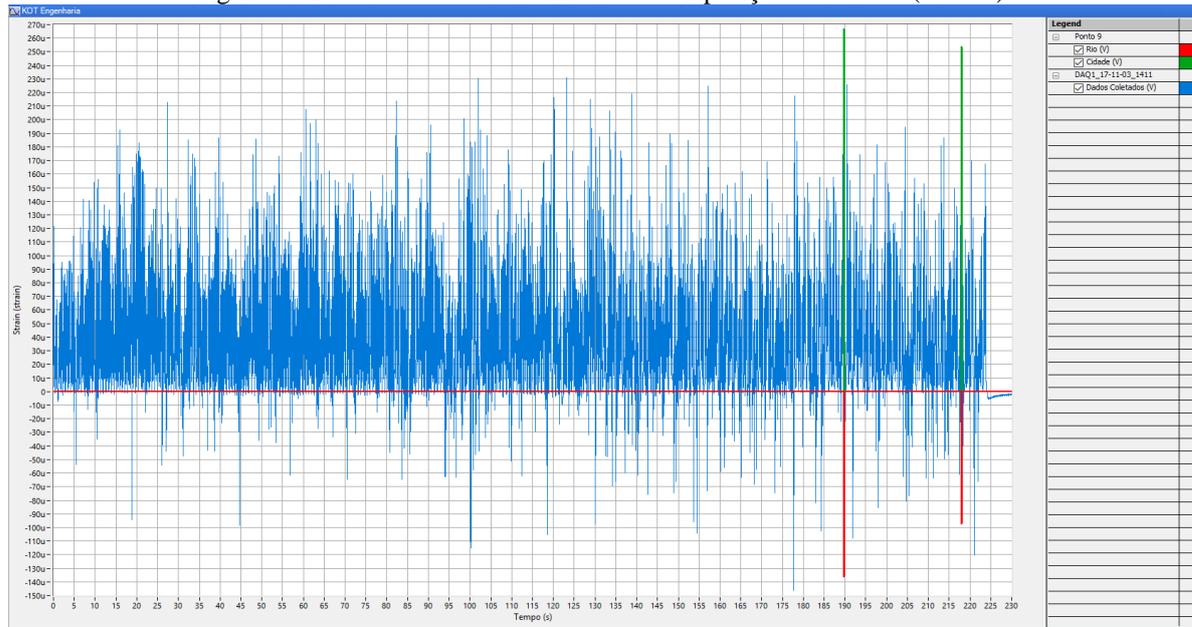


Figura 89: Resultados da extensometria da composição 3- Ponto 10 (Cidade)

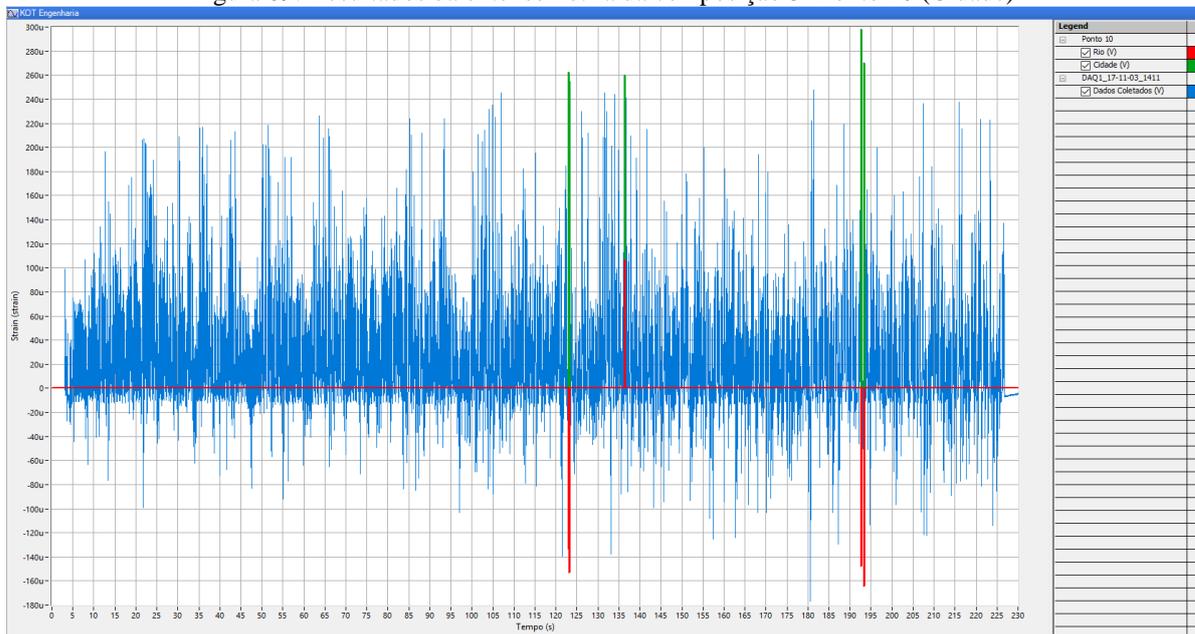


Figura 90: Resultados da extensometria da composição 3- Ponto 16 (Cidade)

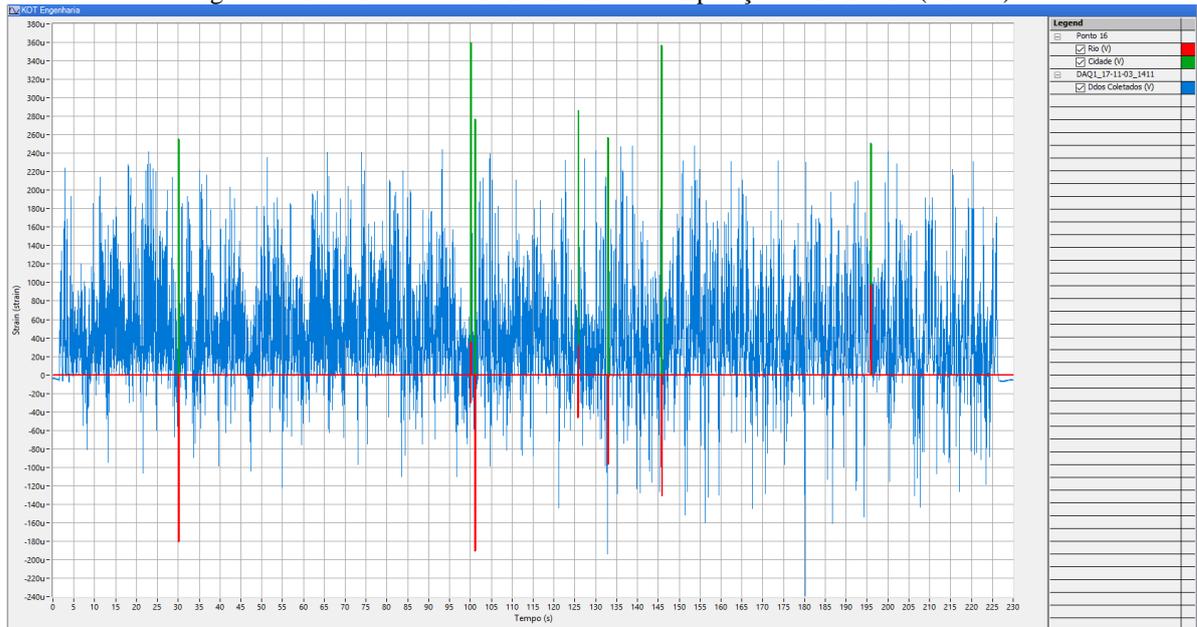


Figura 91: Resultados da extensometria da composição 3- Ponto 18 (Cidade)

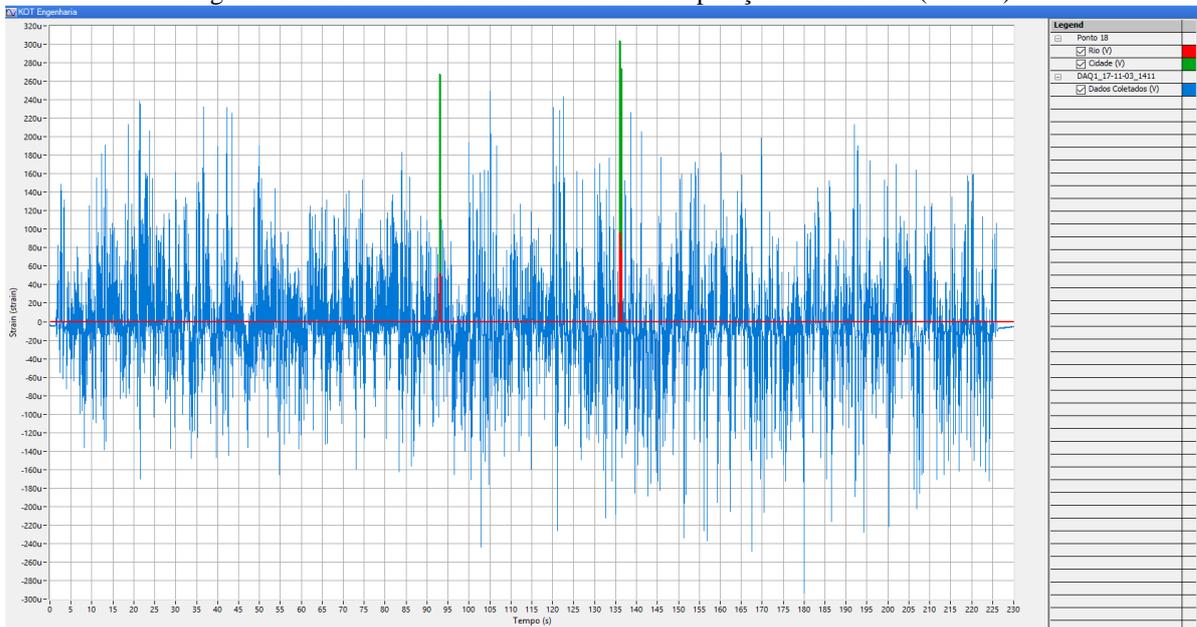


Figura 92: Resultados da extensometria da composição 3- Ponto 19 (Cidade)

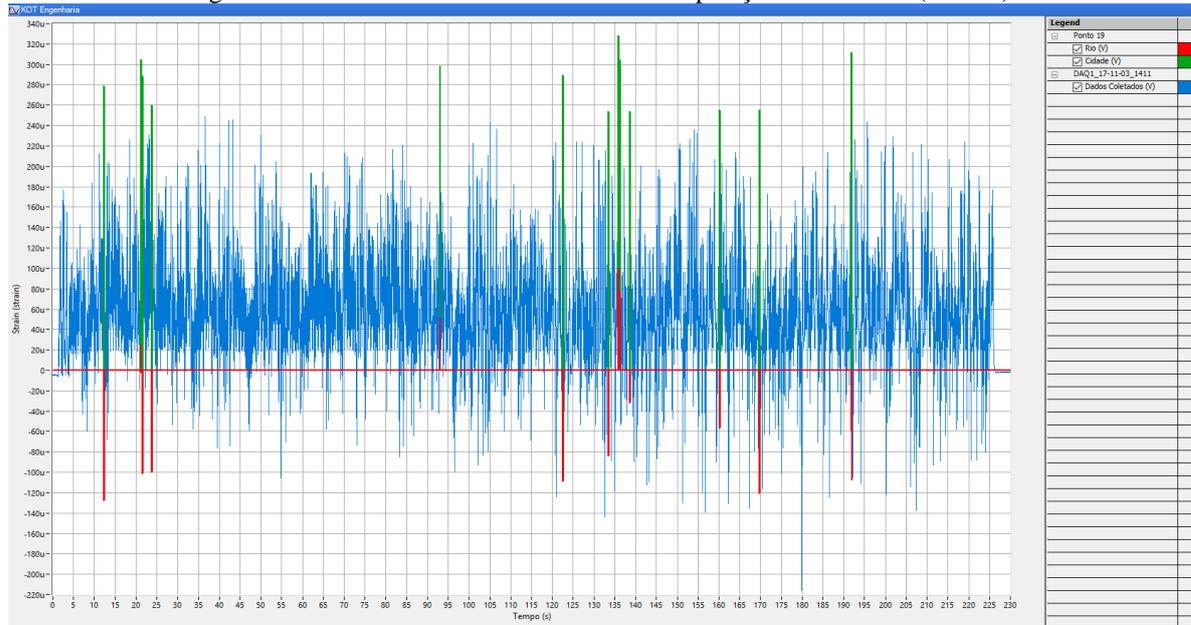


Figura 93: Resultados da extensometria da composição 3- Ponto 6 (Rio)

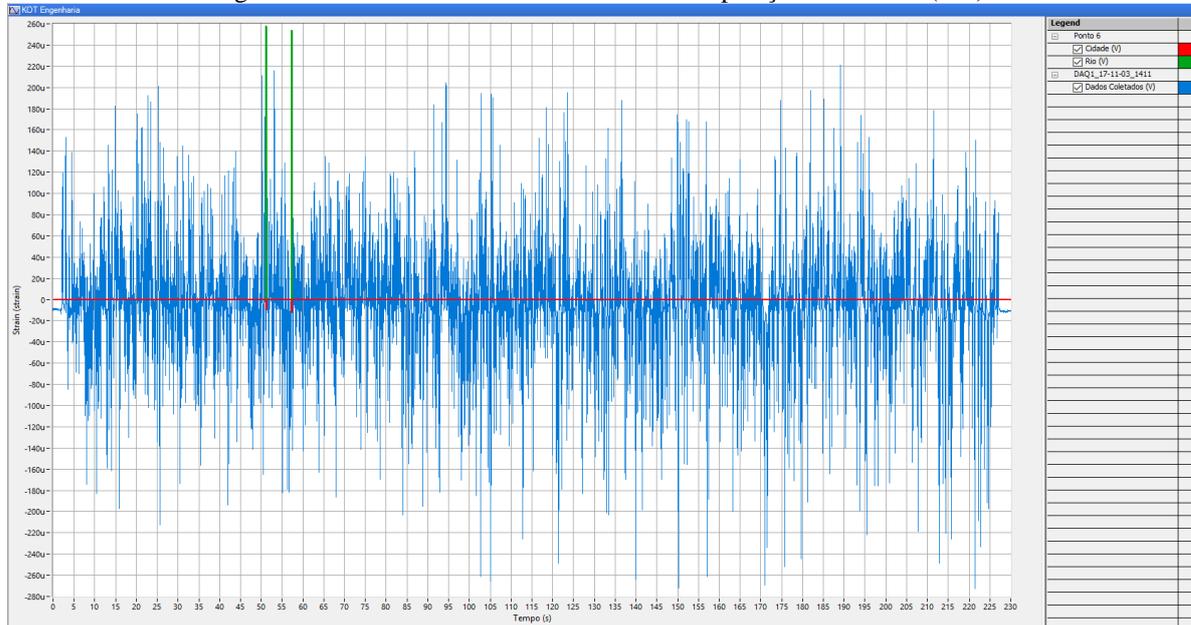


Figura 94: Resultados da extensometria da composição 3- Ponto 8 (Rio)

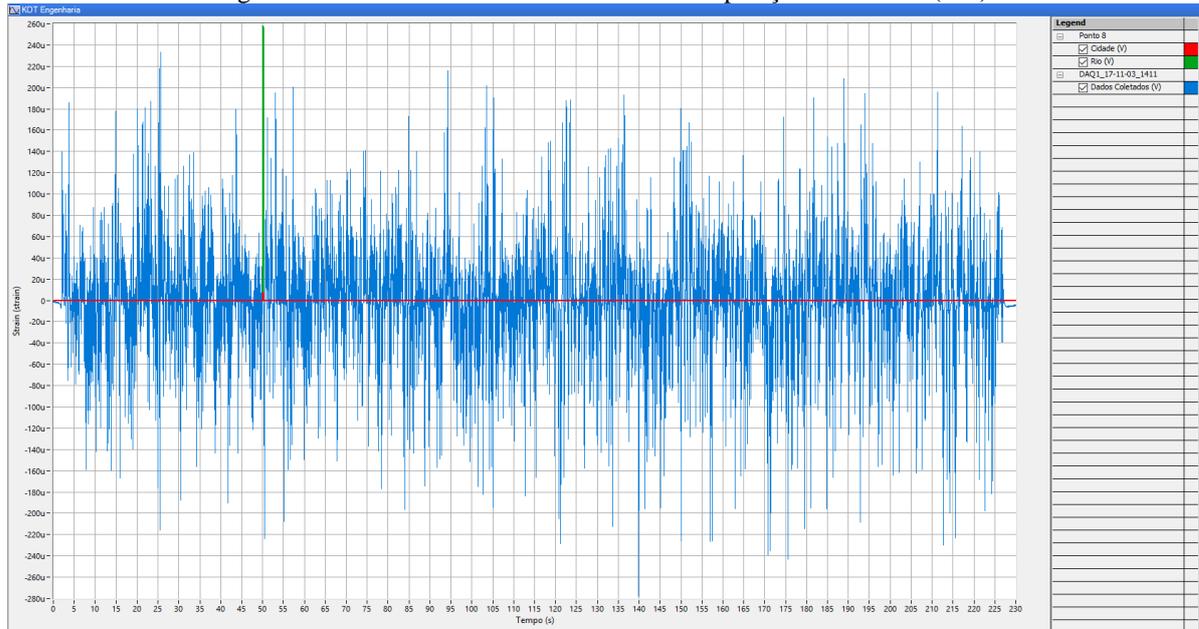


Figura 95: Resultados da extensometria da composição 3- Ponto 13 (Rio)

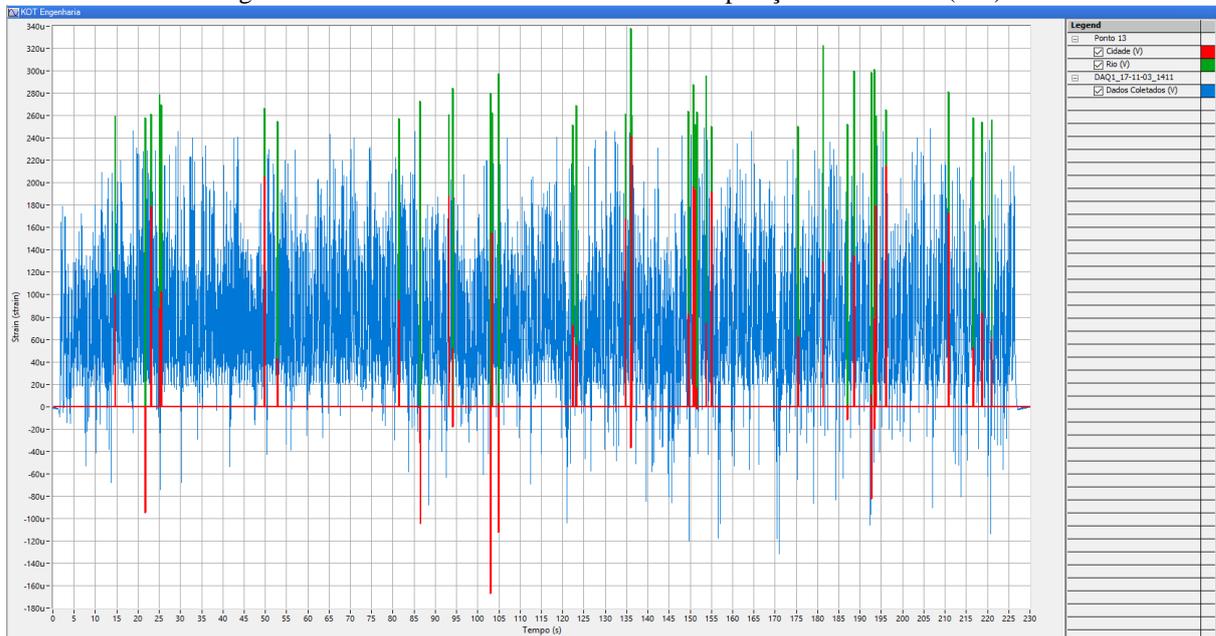


Figura 96: Resultados da extensometria da composição 3- Ponto 15 (Rio)

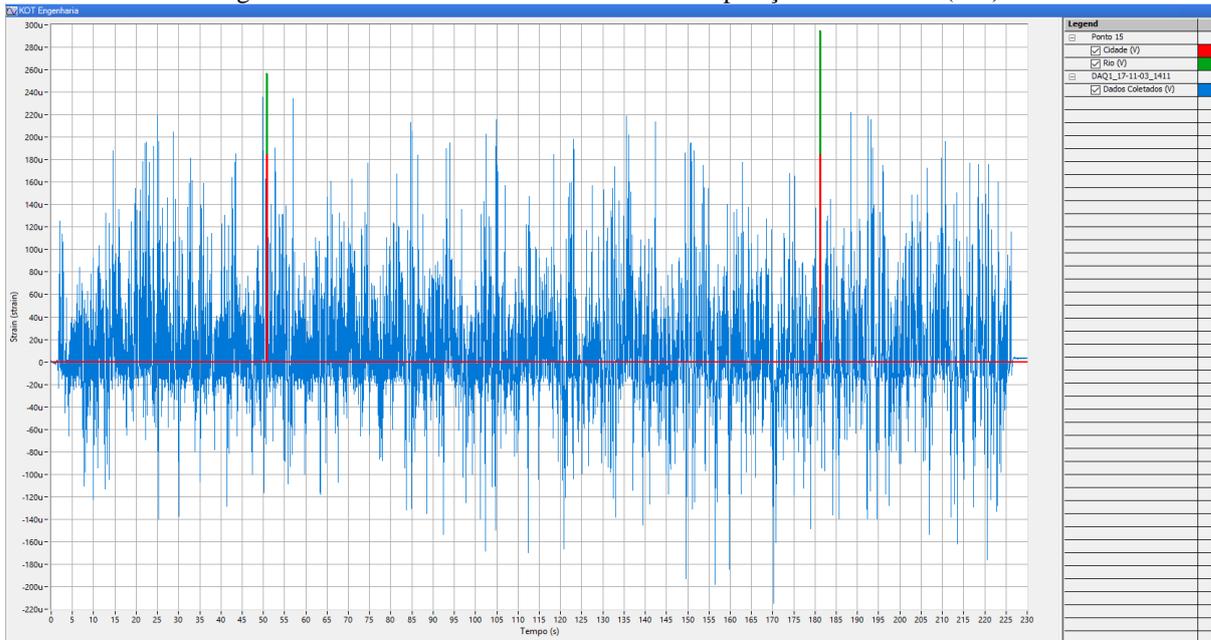


Figura 97: Resultados da extensometria da composição 3- Ponto 16 (Rio)

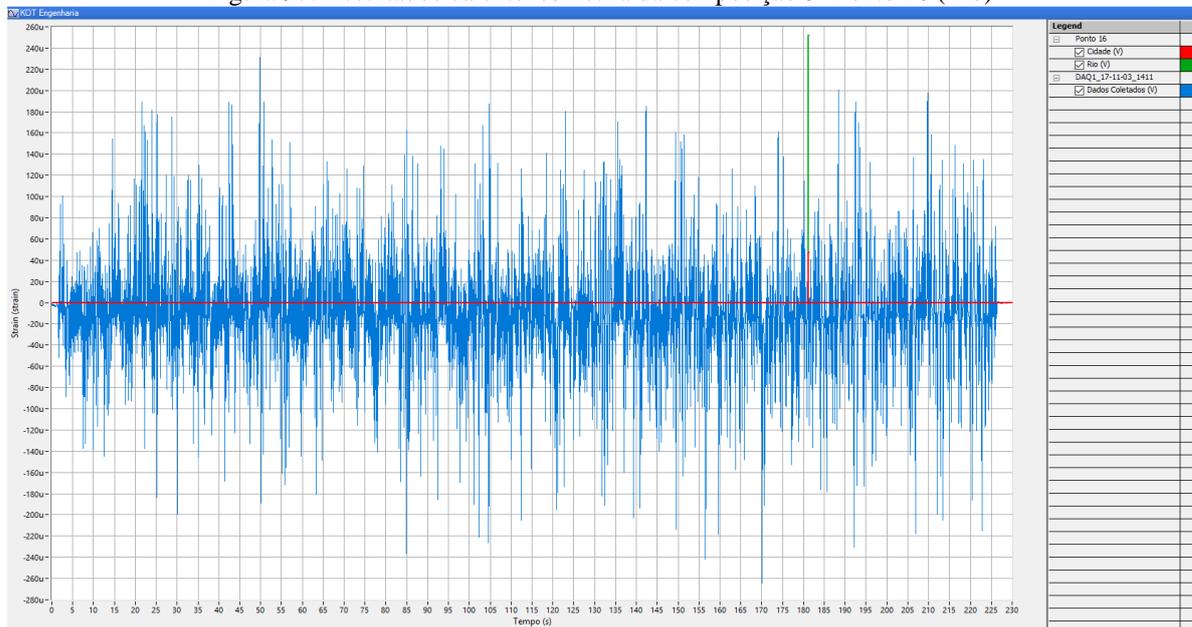


Figura 98: Resultados da extensometria da composição 3- Ponto 20 (Rio)

