

A MONITORIZAÇÃO ESTRUTURAL NO APOIO À DECISÃO



Paulo Silveira

Investigador Principal
LNEC
Lisboa
paulo.silveira@lnec.pt

SUMÁRIO

Na sequência da deteção, por técnicos do Instituto de Soldadura e Qualidade (ISQ), de fendas junto às aberturas existentes nas extremidades das chapas de ligação dos dois perfis “U”, que formam a corda superior, da treliça dos painéis transversais da viga de rigidez da Ponte 25 de Abril, e por solicitação da Infraestruturas de Portugal – IP, SA, o Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) efetuou, entre os dias 17 e 25 de julho de 2012, a medição de extensões, entre os painéis 79 e 81, no Tramo Lateral Sul da ponte 25 de Abril.

Este estudo foi desencadeado pelo facto de se ter verificado que após a reparação de algumas destas fendas, com um cordão de soldadura, surgiram novas fendas ao lado das existentes, sendo por isso necessário obter informação tendente a esclarecer as causas deste fenómeno, o que implicava avaliar as variações de tensão, devidas às sobrecargas.

Tendo em conta que o padrão de fendas era idêntico na generalidade das vigas danificadas, afetando as chapas de ligação dos perfis “U”, decidiu-se instrumentar estas mesmas chapas.

Os resultados obtidos permitiram esclarecer as causas da fendilhação e calibrar os modelos numéricos utilizados no projeto de reabilitação, evidenciando-se assim a importância da monitorização estrutural no apoio à decisão.

Palavras-chave: ponte suspensa, variações de tensão, fendilhação.

1. INTRODUÇÃO

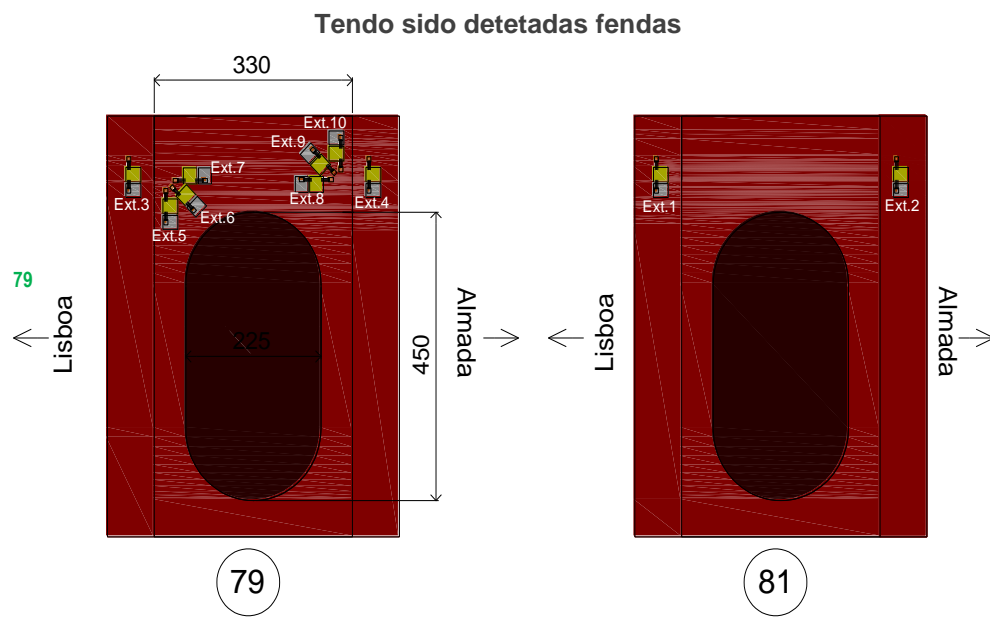
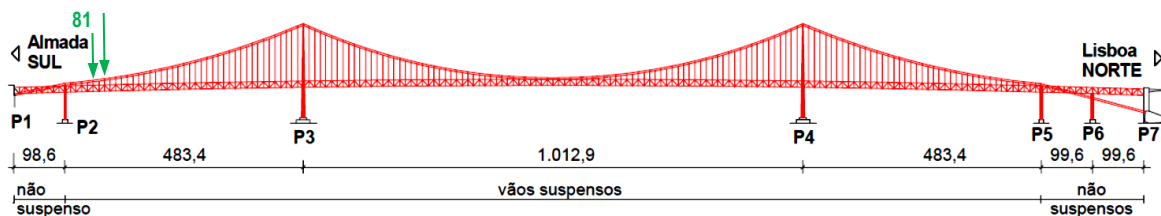


Fig. 3), por técnicos do Instituto de Soldadura e Qualidade (ISQ), junto às aberturas existentes nas extremidades das chapas de ligação dos dois perfis “U”, que formam a corda superior, da treliça dos painéis transversais da viga de rigidez da Ponte 25 de Abril, e por solicitação da Infraestruturas de Portugal - IP, SA, o Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) efetuou, entre os dias 17 e 25 de julho de 2012, a medição de extensões, entre os painéis 79 e 81, no Tramo Lateral Sul da ponte 25 de Abril.



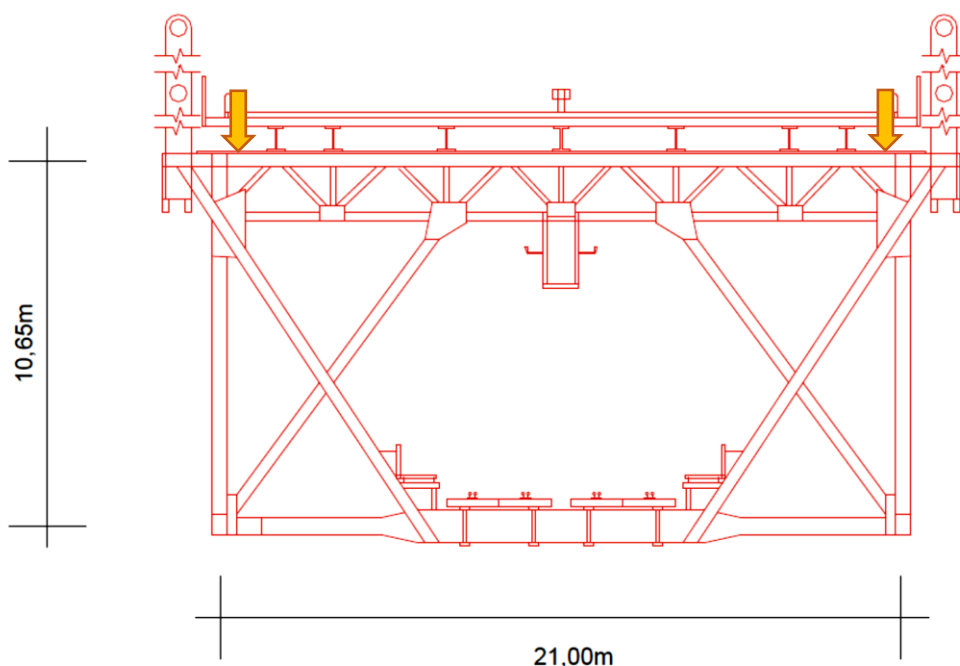


Fig. 1 – Localização das fendas nos painéis transversais da viga de rigidez

Imagens obtidas pelo ISQ



Fig. 2 – Fendas no Painel 81

Tendo-se verificado, nalguns casos, a abertura de novas fendas na proximidade das que foram reparadas com um cordão de soldadura, importava esclarecer as causas que poderiam estar na origem deste fenómeno, para o que era fundamental efetuar a avaliação das variações de tensão devidas às sobrecargas.

Nesta comunicação apresentam-se os resultados obtidos, entre as 16:00h do dia 17 de julho e as 17:00h do dia 18 de julho de 2012.

2. EQUIPAMENTO DE MONITORIZAÇÃO ESTRUTURAL

Dada a natureza do fenómeno em causa, foi considerado conveniente instrumentar uma viga que não apresentasse fendas e uma viga que se encontrasse fendilhada. Para tal foram,

respetivamente, escolhidas as vigas dos Painéis 79 e 81

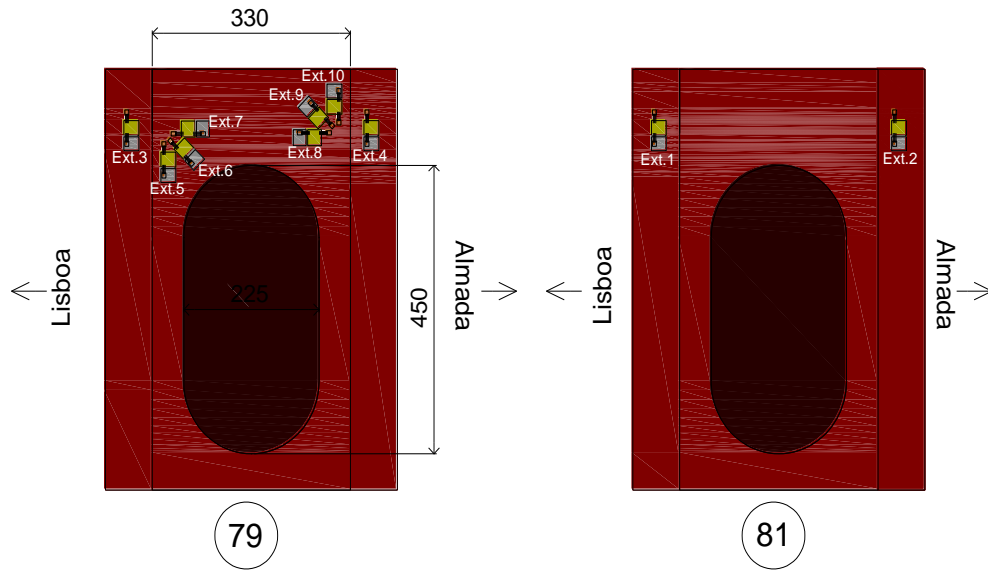
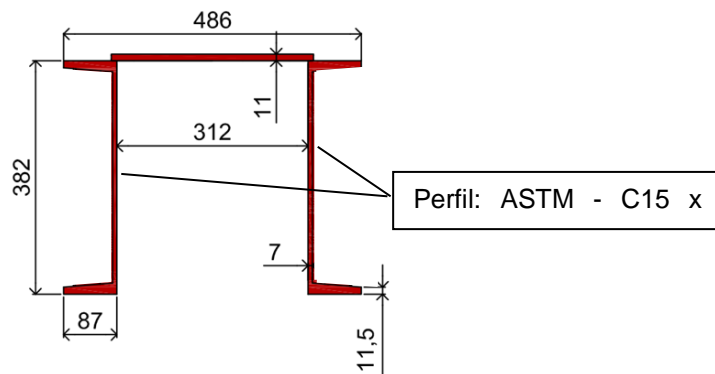


Fig. 3).

Para poder relacionar as extensões medidas nas treliças, com a passagem do tráfego ferroviário, foram também instrumentadas as longarinas destinadas ao apoio da via-férrea (Fig. 4). As longarinas escolhidas foram as interiores e pertencem a vias diferentes, de modo a tornar possível a deteção da passagem de comboios, quer no sentido ascendente, quer no sentido descendente.



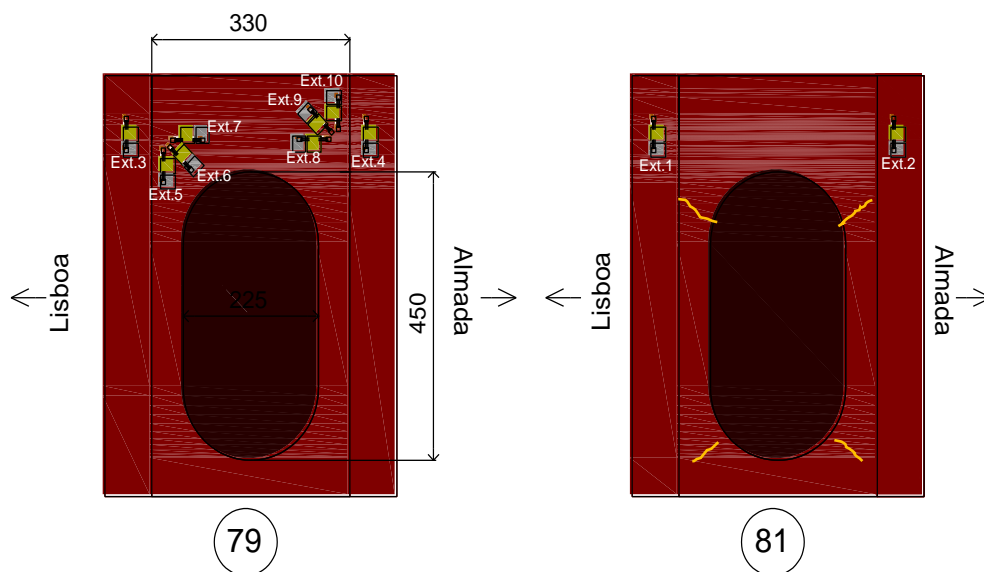


Fig. 3 – Seções instrumentadas nos Painéis 79 e 81

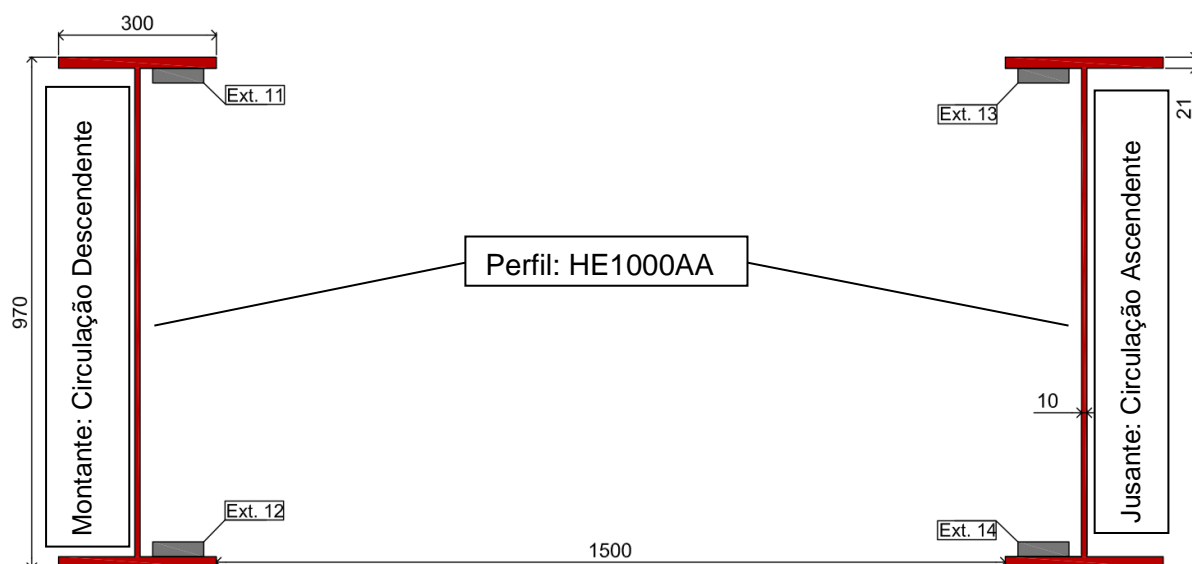


Fig. 4 – Longarinas da via-férrea instrumentadas entre os Painéis 79 e 80

A leitura dos extensómetros foi efetuada por módulos de aquisição e.blox A1 da Gantner Instruments (Fig. 5), que foram instalados junto aos transdutores. Os módulos de aquisição foram ligados a um módulo de controlo e.pac DP, que se encontrava centralizado. Este módulo de controlo encontrava-se, por sua vez, ligado a um computador compacto industrial localmente instalado (Fig. 6).

Apara além dos extensómetros foi também colocado um termómetro do tipo PT100, no Painel 81.

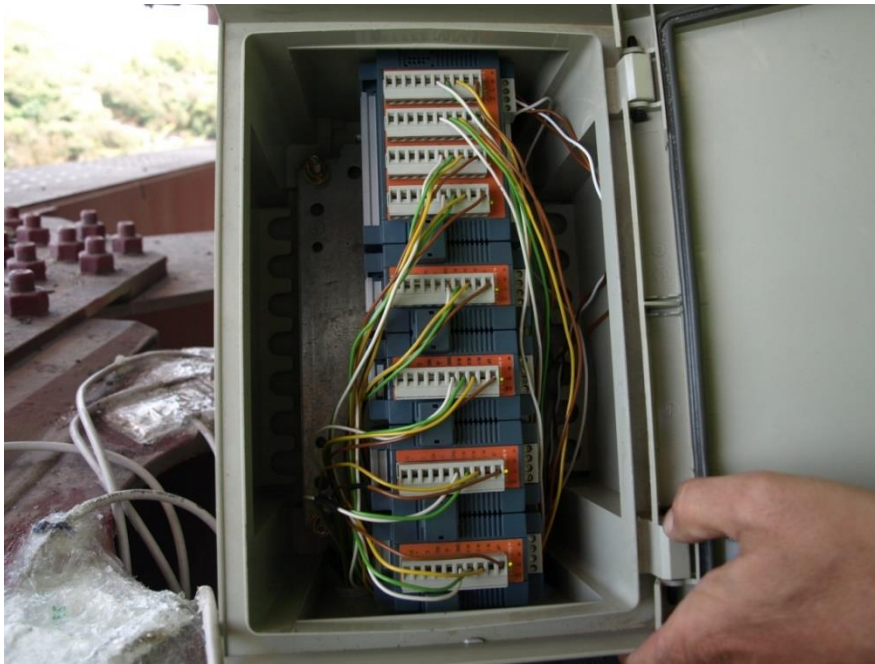


Fig. 5 – Módulos de aquisição



Fig. 6 – Módulo de controlo e computador

3. TRÁFEGO FERROVIÁRIO

A partir dos registos efetuados foi possível detetar as passagens do tráfego ferroviário, tendo-se verificado algumas situações de cruzamento de comboios na zona das secções instrumentadas.

Na Fig. 7 apresenta-se uma imagem da passagem de um comboio de mercadorias, no dia 18 de julho, às 11:48h.



Fig. 7 – Passagem de um comboio de mercadorias, no dia 18 de julho, às 11:48h

4. MONITORIZAÇÃO ESTRUTURAL

A medição dos valores foi efetuada a uma frequência de 100Hz, pelo que, no período de 25 horas, durante o qual decorreram os ensaios, foram efetuadas 9.000.000 leituras para cada um dos quinze transdutores instalados, o que perfaz um total 135.000.000 de leituras efetuadas.

Para representar um tão grande número de valores, optou-se por apresentar, para as extensões, valores médios, máximos e mínimos, referidos ao período de um minuto.

Apresentam-se também as diferenças entre os valores máximos e mínimos verificadas nos extensómetros longitudinais das vigas “U”, por constituírem uma medida da amplitude das extensões que aí se verificam.

Dado que parte das variações de extensão estão relacionadas com as variações temperatura na estrutura, apresenta-se o valor médio, por minuto, da temperatura medida na viga superior da treliça do painel 81, durante as referidas 25 horas de observação.

Para exibir o efeito da passagem dos comboios são ainda apresentados gráficos com uma extensão temporal de poucos minutos.

Relativamente à ilustração do efeito do tráfego rodoviário, optou-se por apresentar gráficos obtidos em períodos de dez minutos, durante os quais não houve passagem de comboios.

Na análise dos resultados que não foram sujeitos a filtragem, deve ter-se em conta que o ruído associado às medições com extensómetros é cerca de 10 a 15x10⁻⁶, pelo que os

valores efetivos referentes às diferenças entre os máximos e mínimos, num minuto, poderão, nalguns casos, ser inferiores em cerca de 20 a 30×10^{-6} .

4.1 Valores médios, máximos e mínimos obtidos durante o período de 25 horas

Neste ponto apresentam-se valores medidos, não filtrados, entre as 16:00h do dia 17 de julho de 2012 e as 17:00h do dia 18 do mesmo mês.

Para a temperatura medida na viga superior da treliça do painel 81 apresentam-se, na Fig. 8, os valores médios referidos a períodos de um minuto.

Para as extensões apresentam-se, da Fig. 9 à Fig. 25, valores médios, máximos e mínimos, para períodos de um minuto.

As diferenças entre os valores máximos e mínimos das extensões medidas, durante períodos de um minuto, nos extensómetros longitudinais das vigas “U”, são apresentadas da Fig. 19 à Fig. 26.

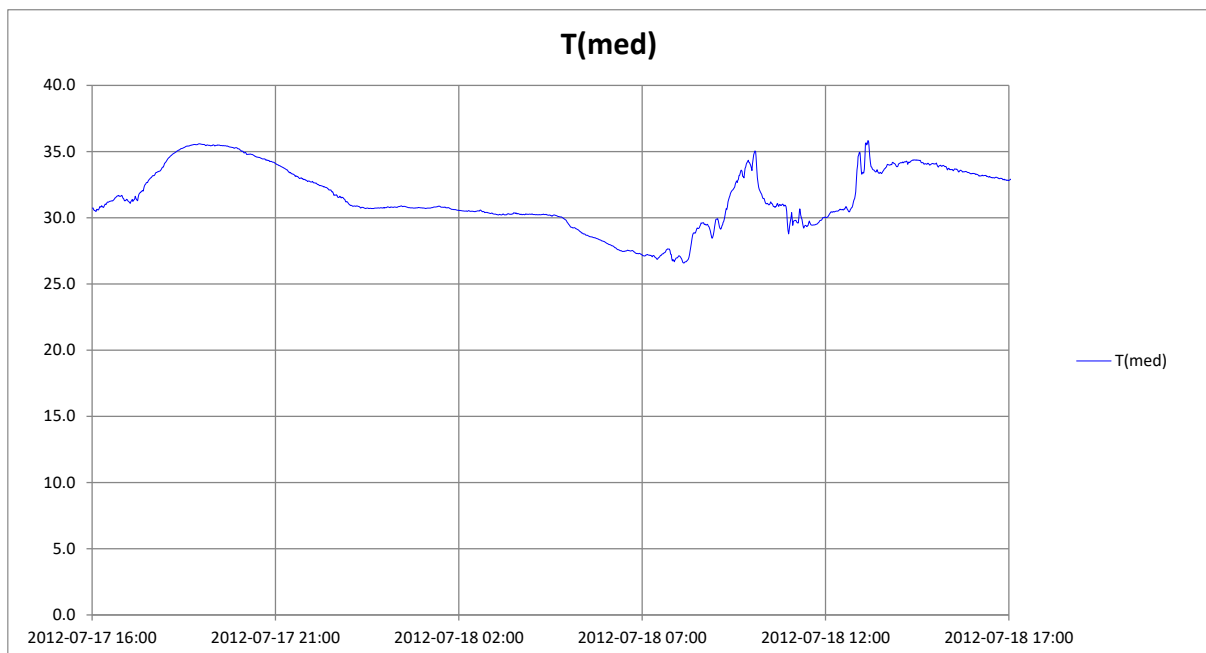


Fig. 8 – Temperatura média em um minuto na viga superior da treliça do painel 81

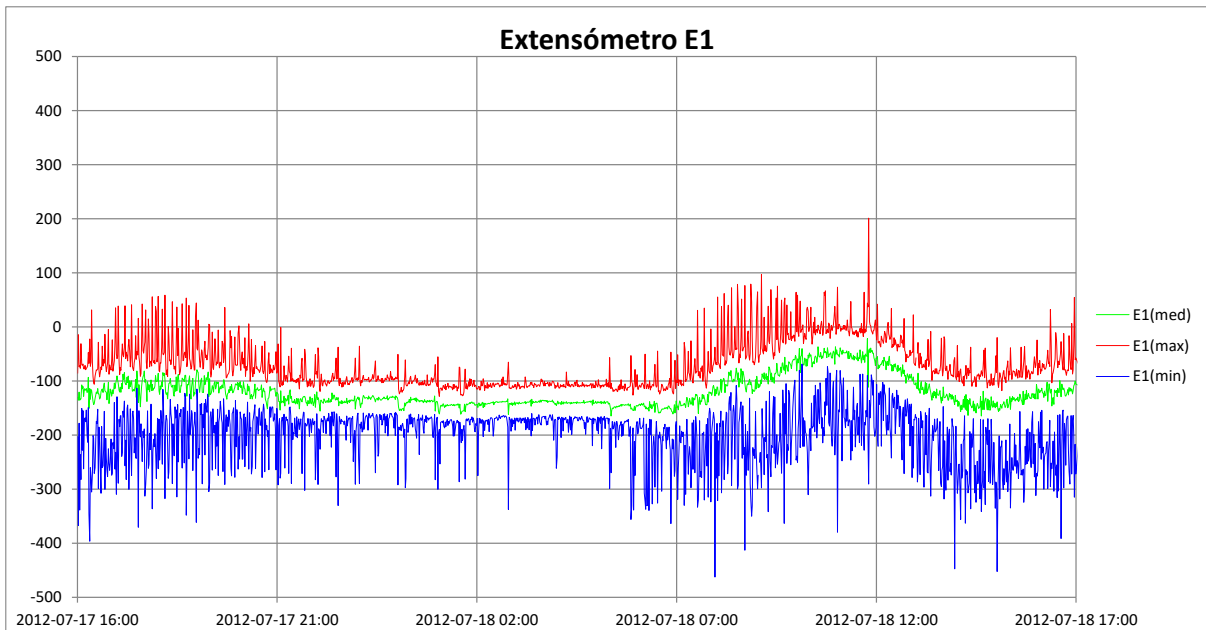


Fig. 9 – Extensómetro E1: medições em 25 horas – Valores Méd., Máx e Min em um minuto

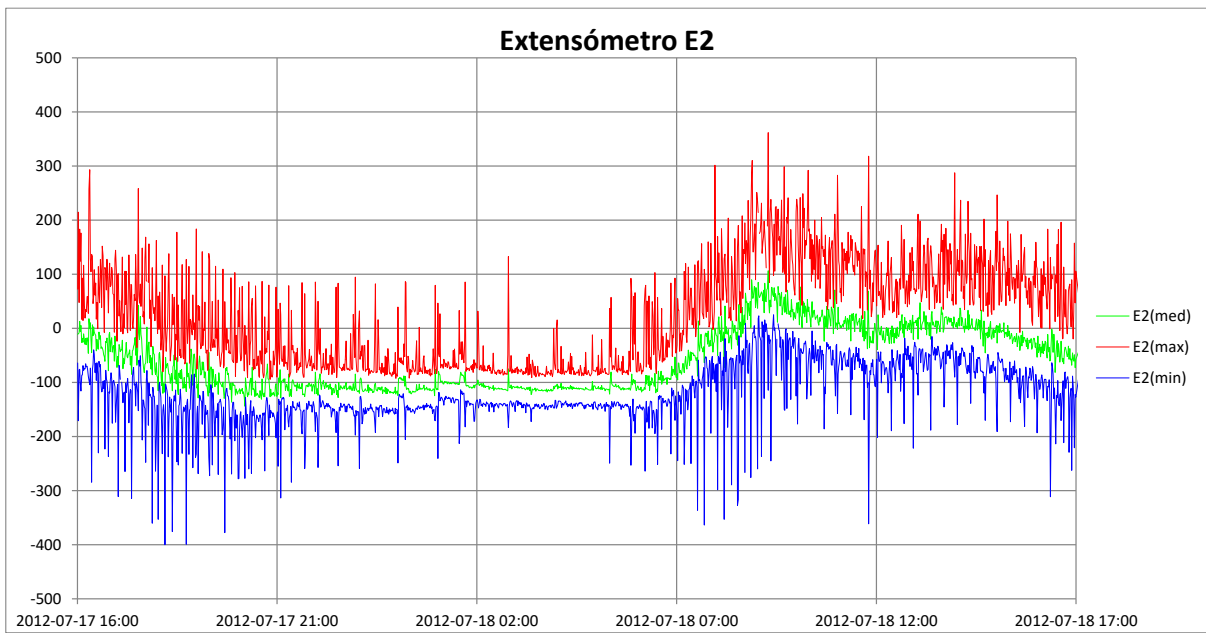


Fig. 10 – Extensómetro E2: medições em 25 horas – Valores Méd., Máx e Min em um minuto

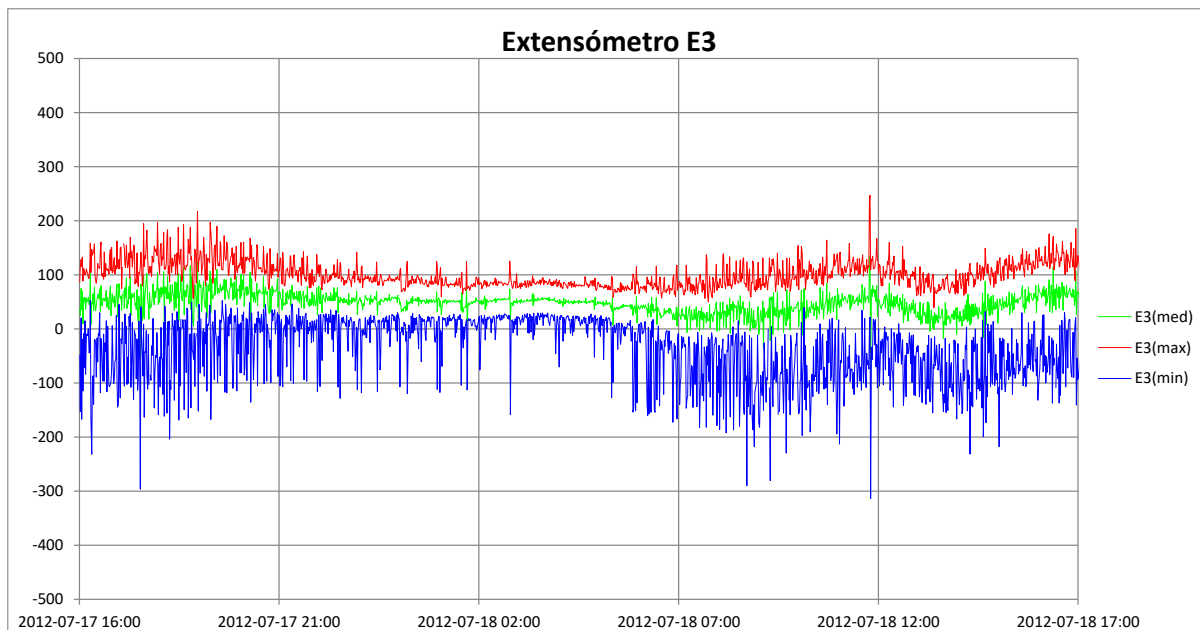


Fig. 11 – Extensómetro E3: medições em 25 horas – Valores Méd., Máx e Min em um minuto

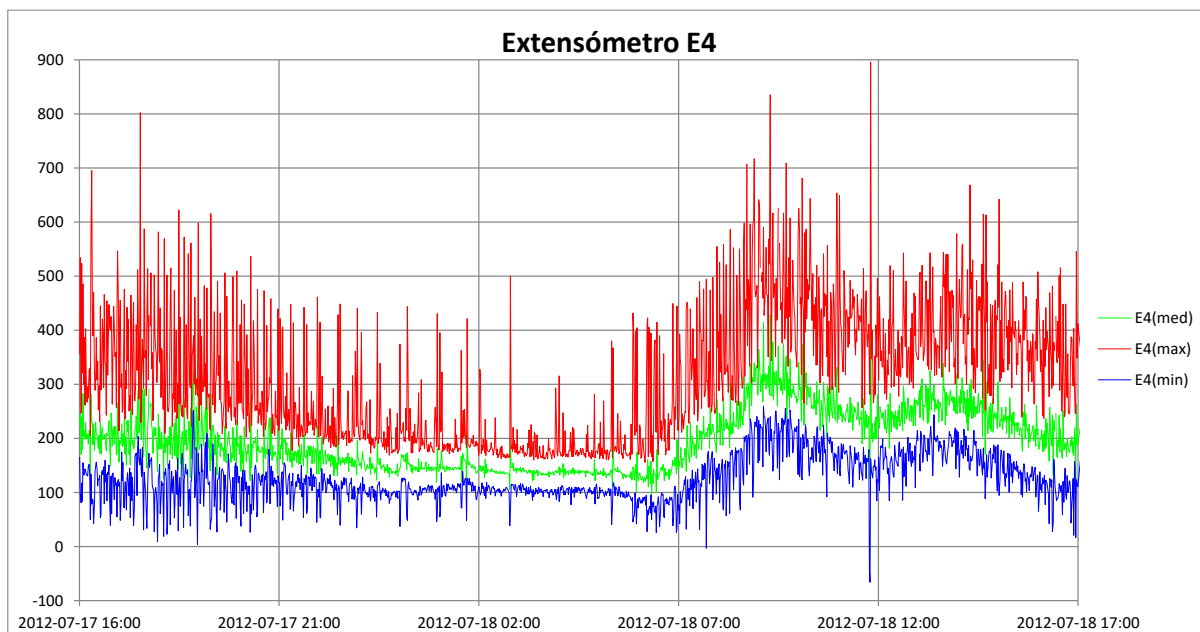


Fig. 12 – Extensómetro E4: medições em 25 horas – Valores Méd., Máx e Min em um minuto

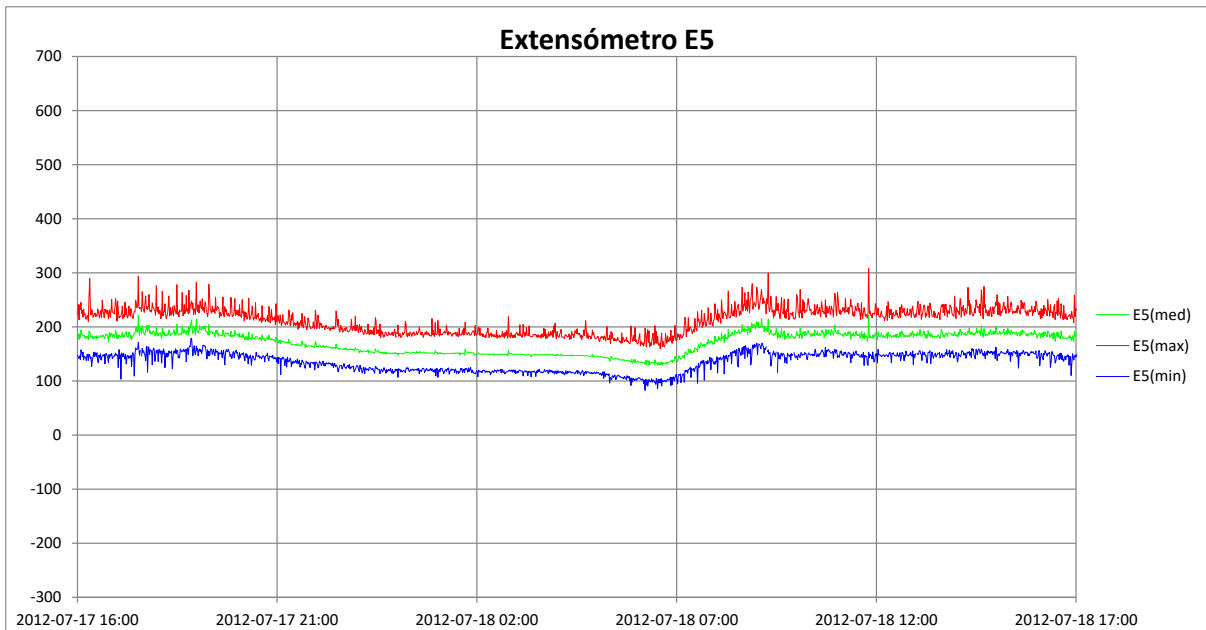


Fig. 13 – Extensómetro E5: medições em 25 horas – Valores Méd., Máx e Min em um minuto

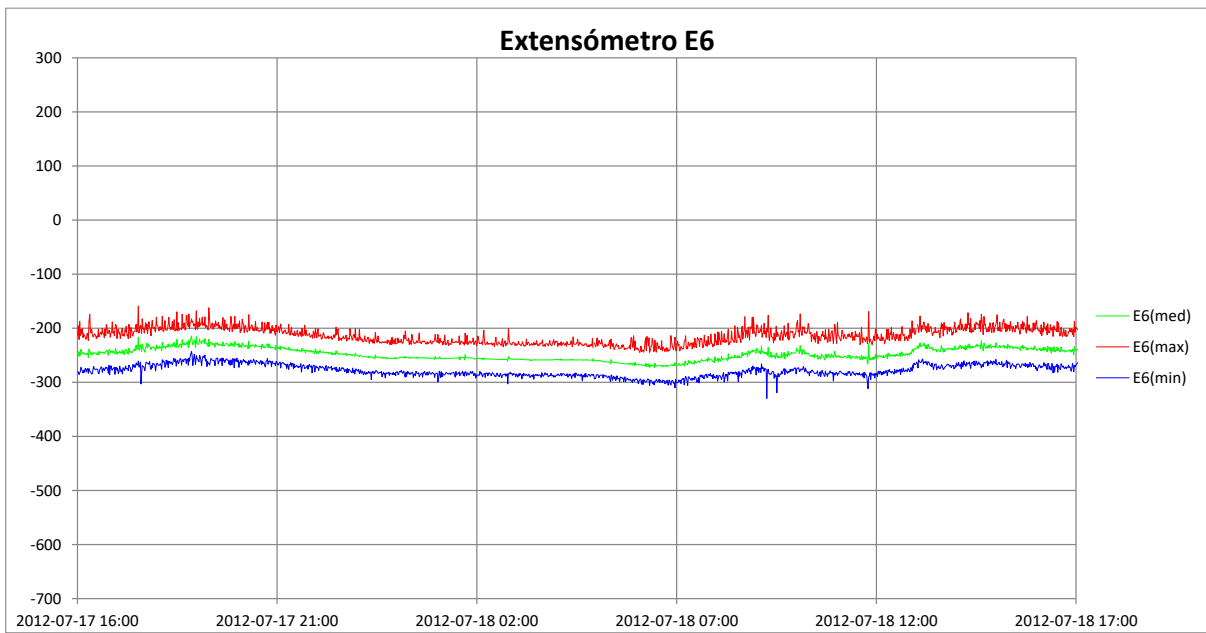


Fig. 14 – Extensómetro E6: medições em 25 horas – Valores Méd., Máx e Min em um minuto

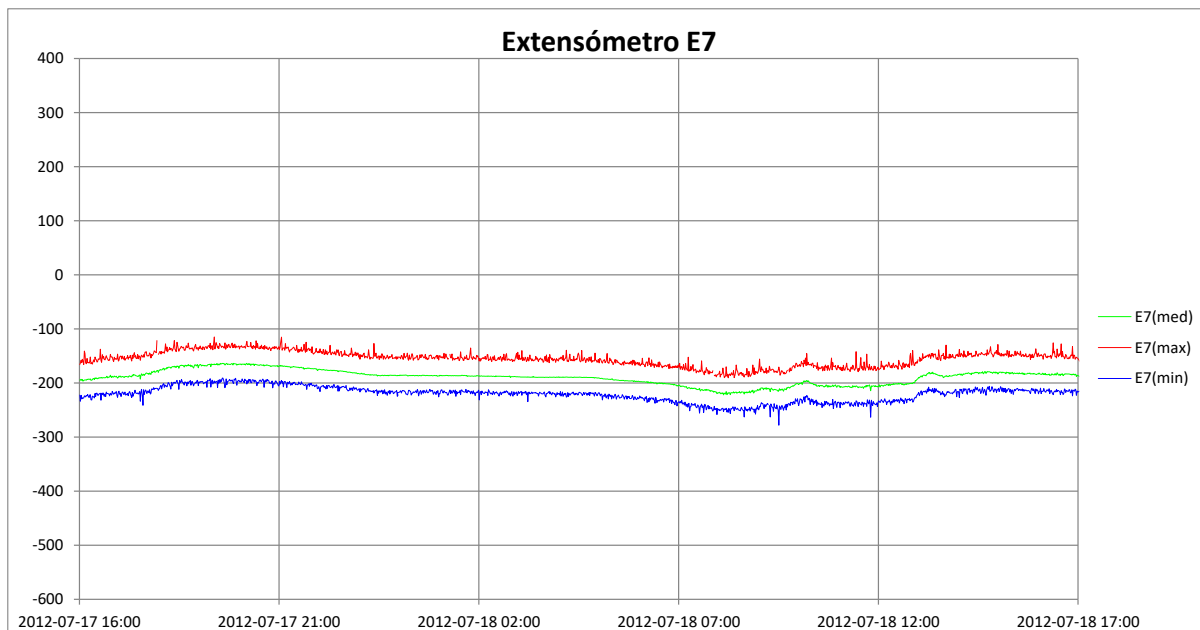


Fig. 15 – Extensômetro E7: medições em 25 horas – Valores Méd., Máx e Min em um minuto

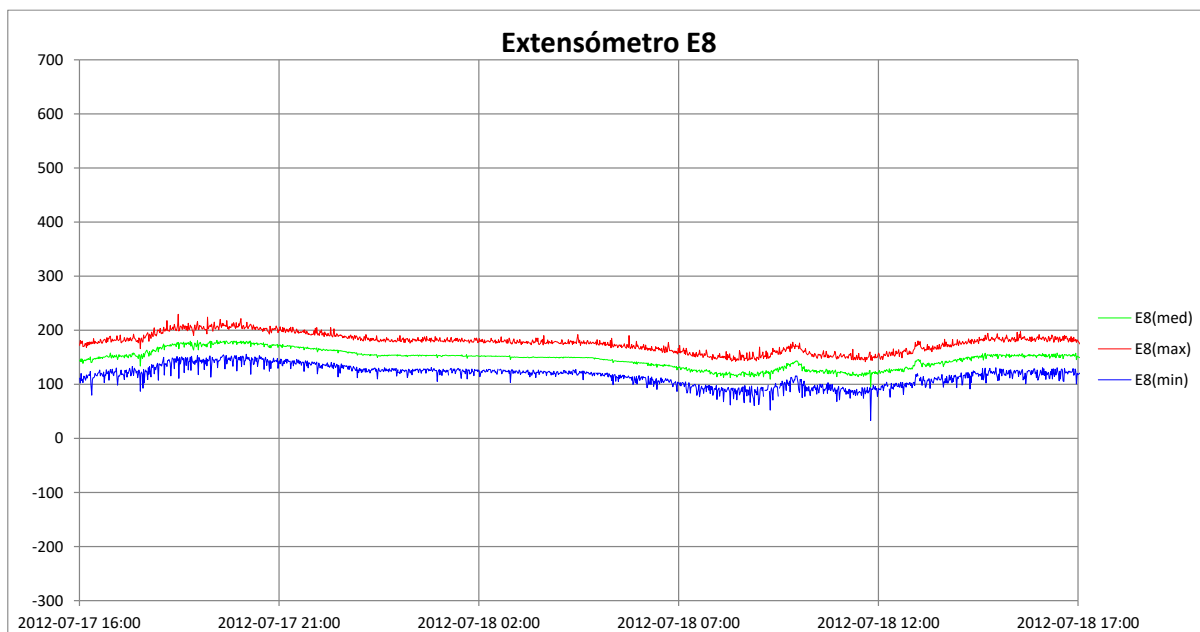


Fig. 16 – Extensômetro E8: medições em 25 horas – Valores Méd., Máx e Min em um minuto

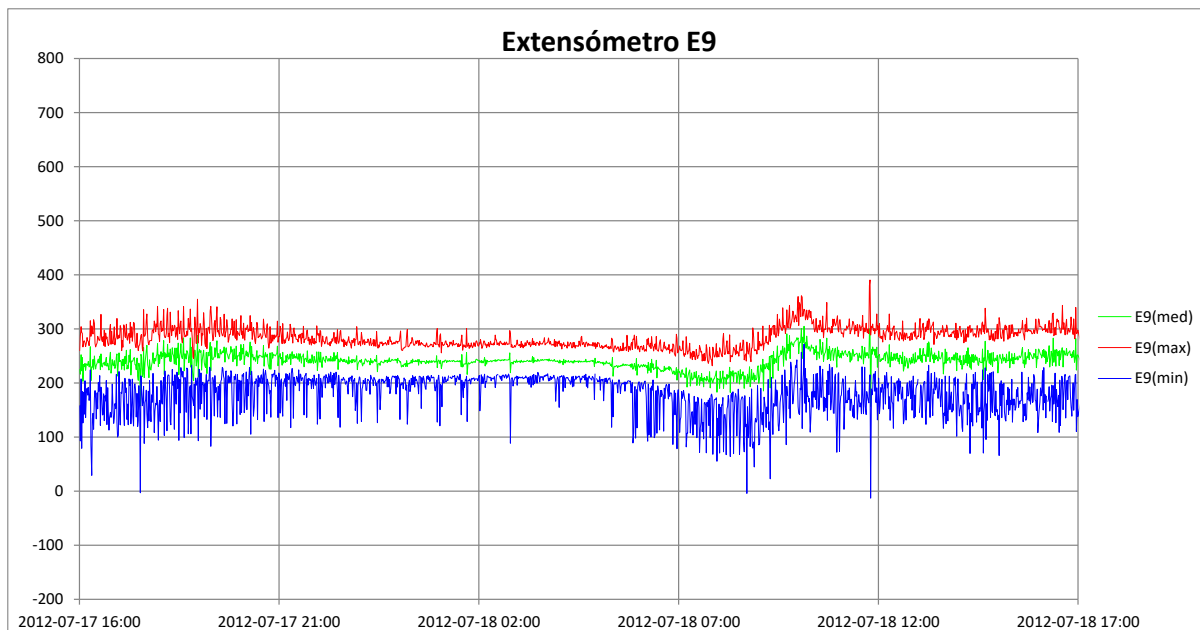


Fig. 17 – Extensómetro E9: medições em 25 horas – Valores Méd., Máx e Min em um minuto

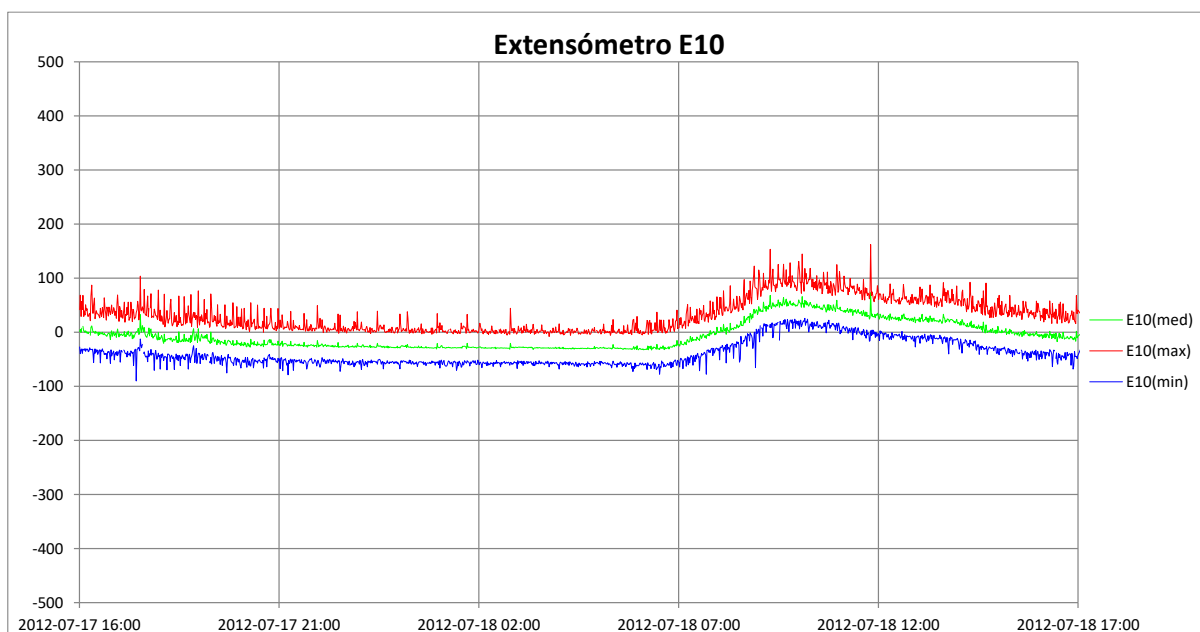


Fig. 18 – Extensómetro E10: medições em 25 horas – Valores Méd., Máx e Min em um minuto

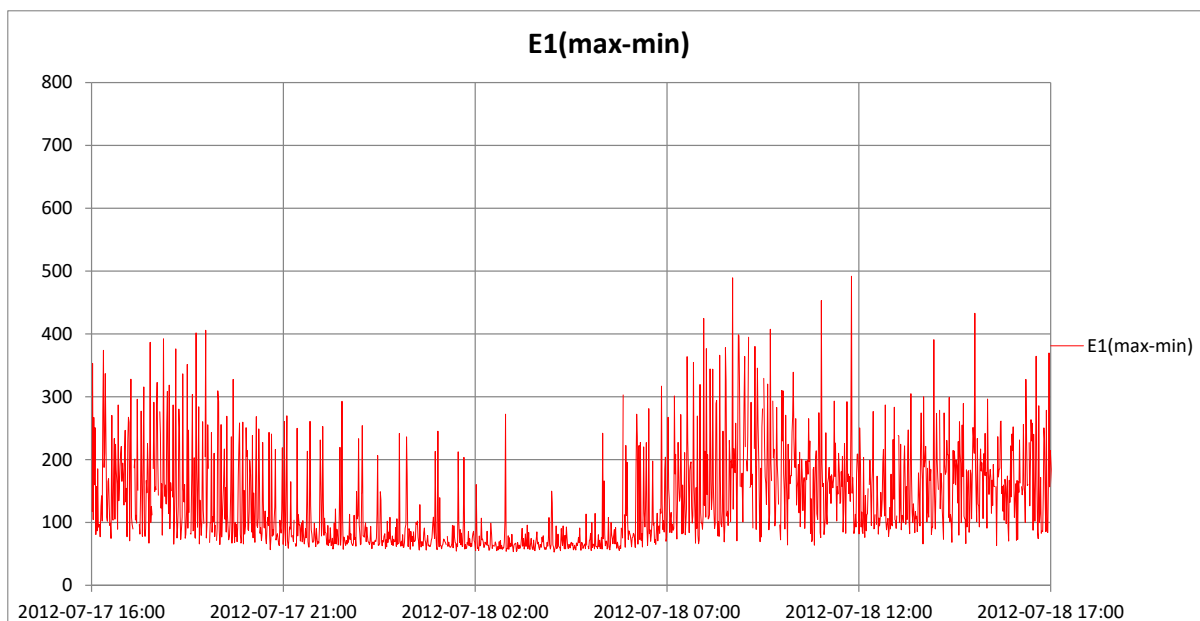


Fig. 19 – Extensómetro E1(Máx-Min) em um minuto: medições em 25 horas – Todo o tráfego

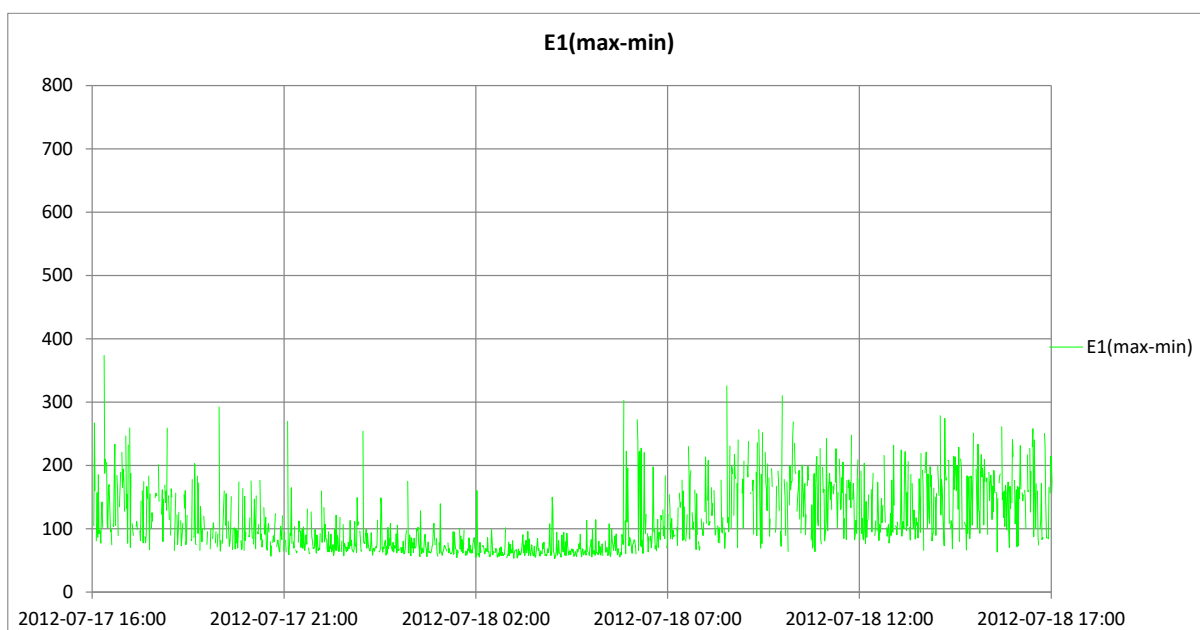


Fig. 20 – Extensómetro E1(Máx-Min) em um minuto: medições em 25 horas – Sem tráfego ferroviário

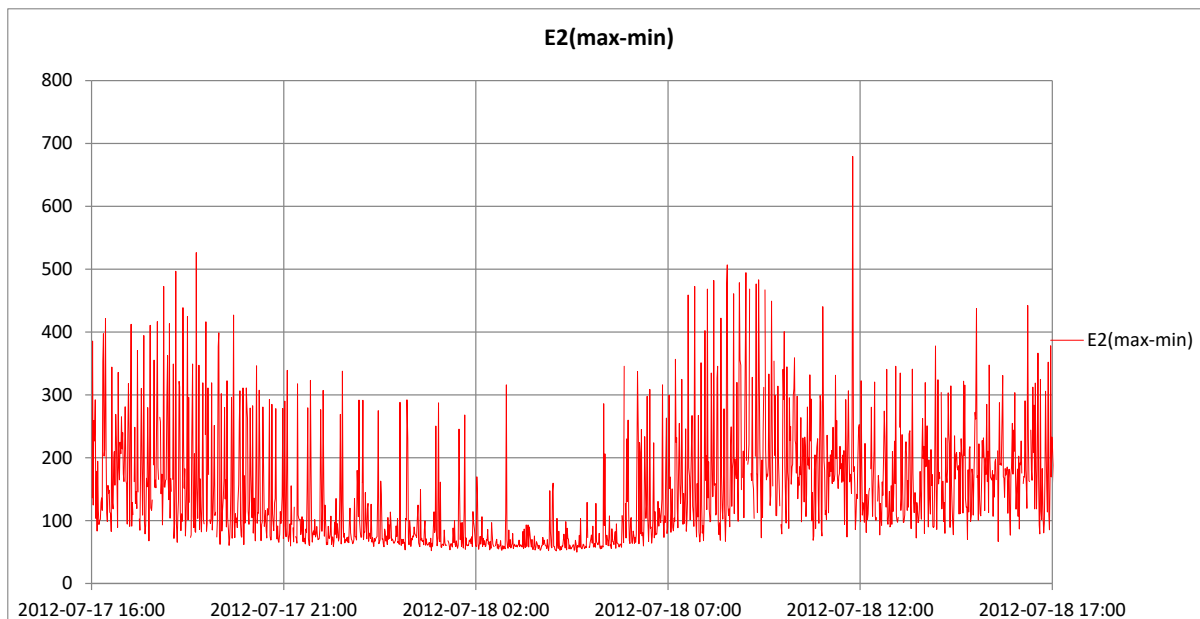


Fig. 21 – Extensómetro E2(Máx-Min) em um minuto: medições em 25 horas – Todo o tráfego

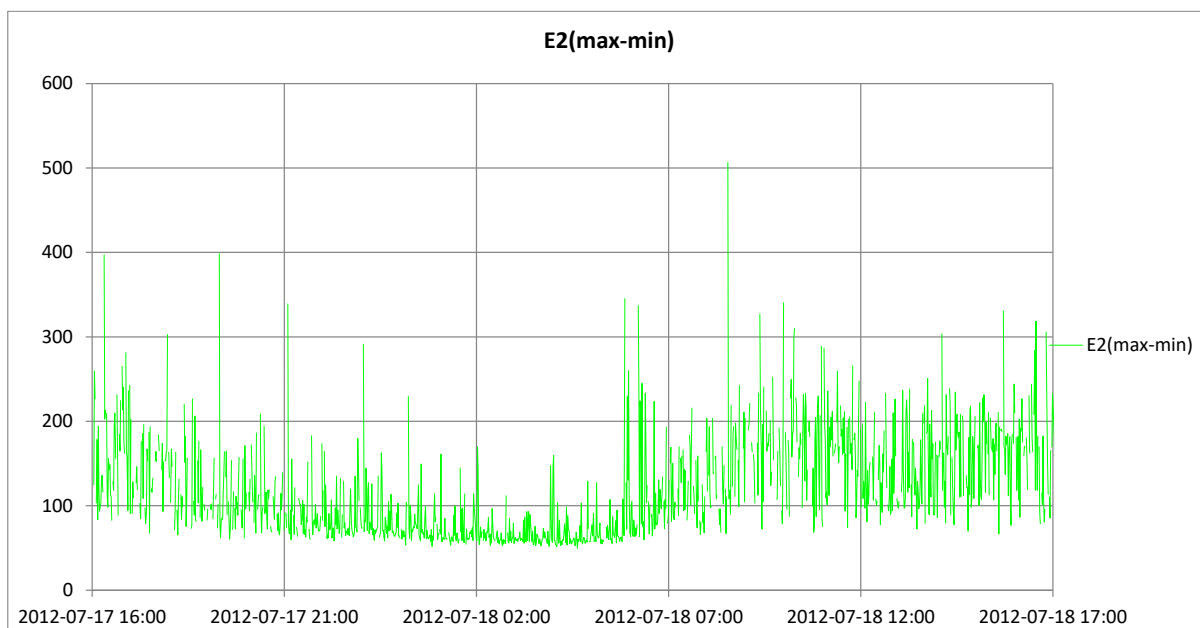


Fig. 22 – Extensómetro E2(Máx-Min) em um minuto: medições em 25 horas – Sem tráfego ferroviário

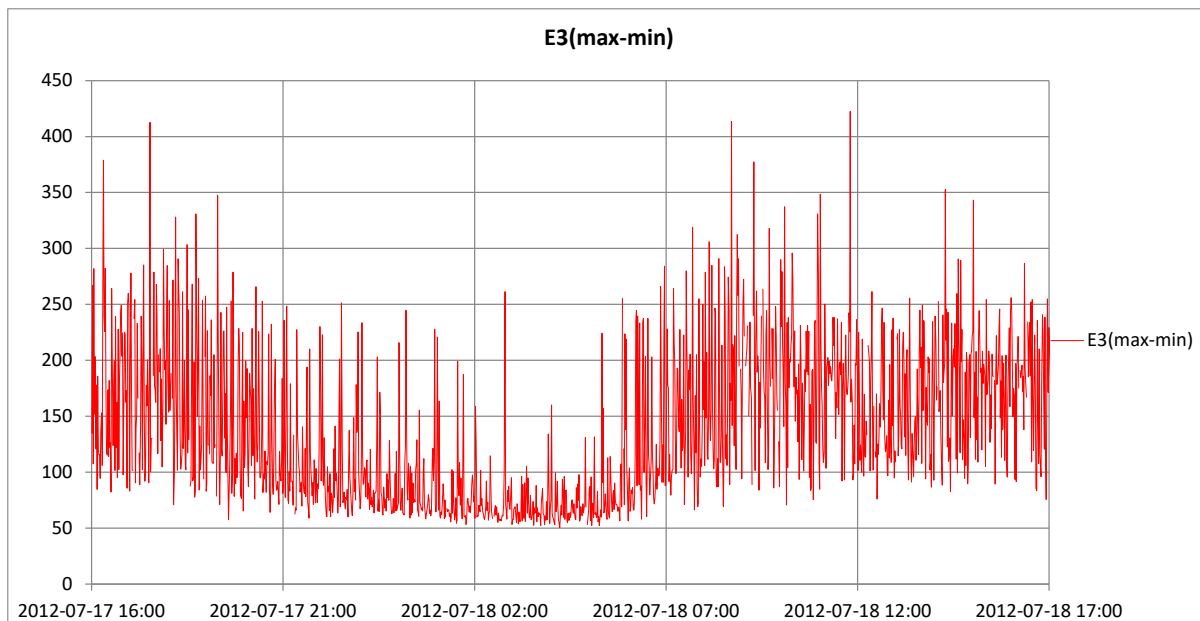


Fig. 23 – Extensómetro E3(Máx-Min) em um minuto: medições em 25 horas – Todo o tráfego

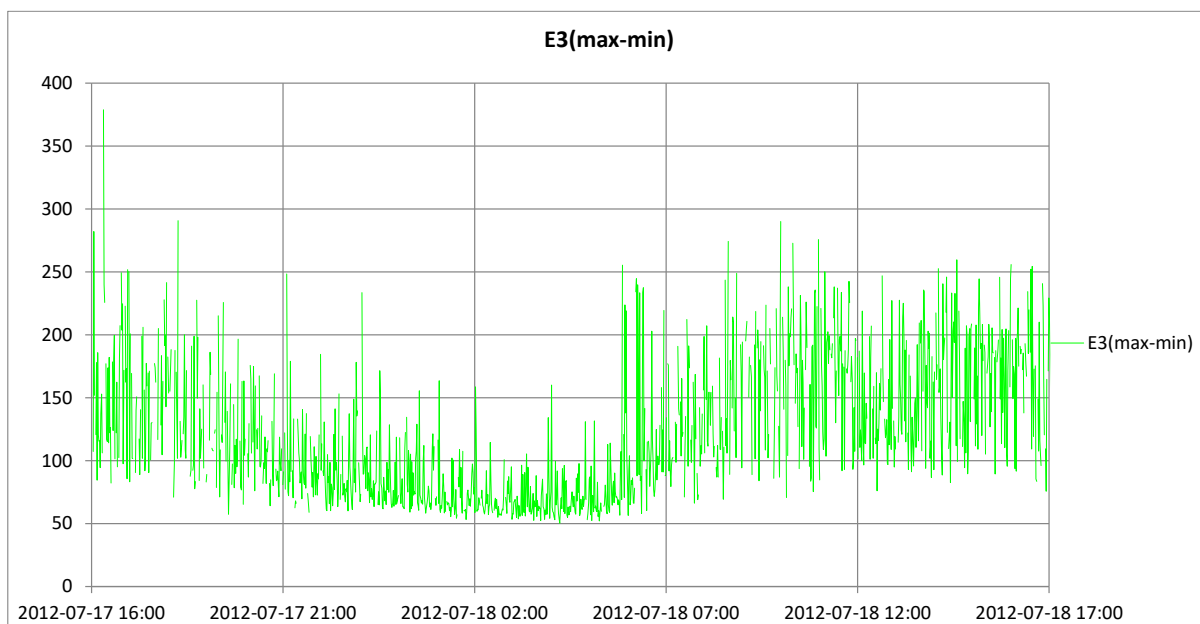


Fig. 24 – Extensómetro E3(Máx-Min) em um minuto: medições em 25 horas – Sem tráfego ferroviário

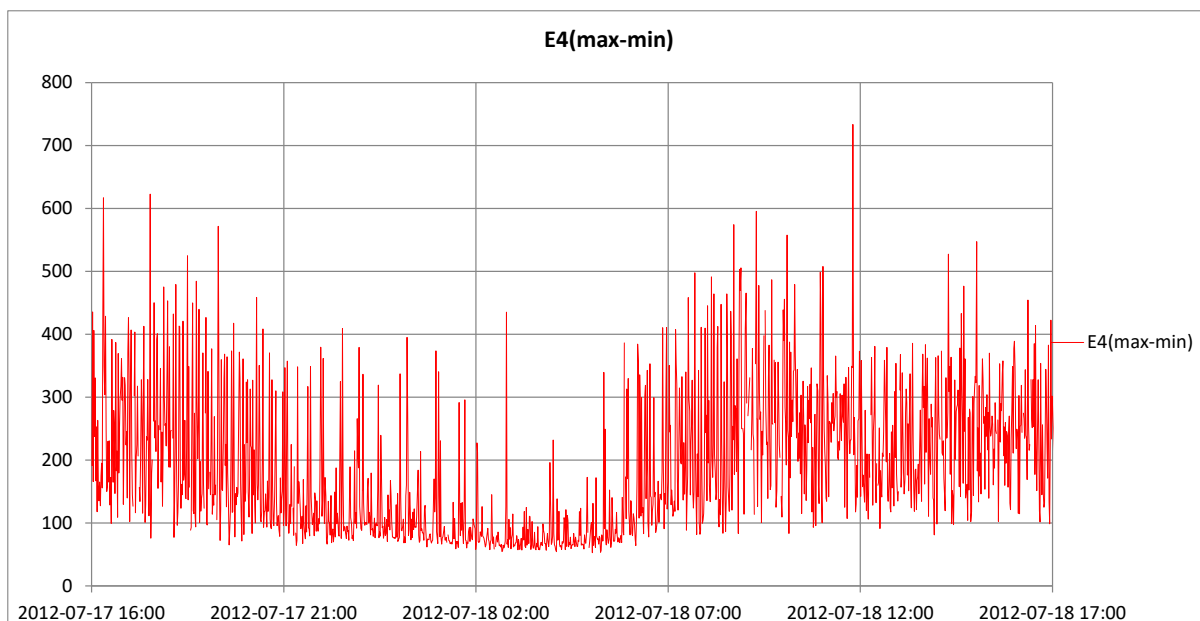


Fig. 25 – Extensómetro E4(Máx-Min) em um minuto: medições em 25 horas – Todo o tráfego

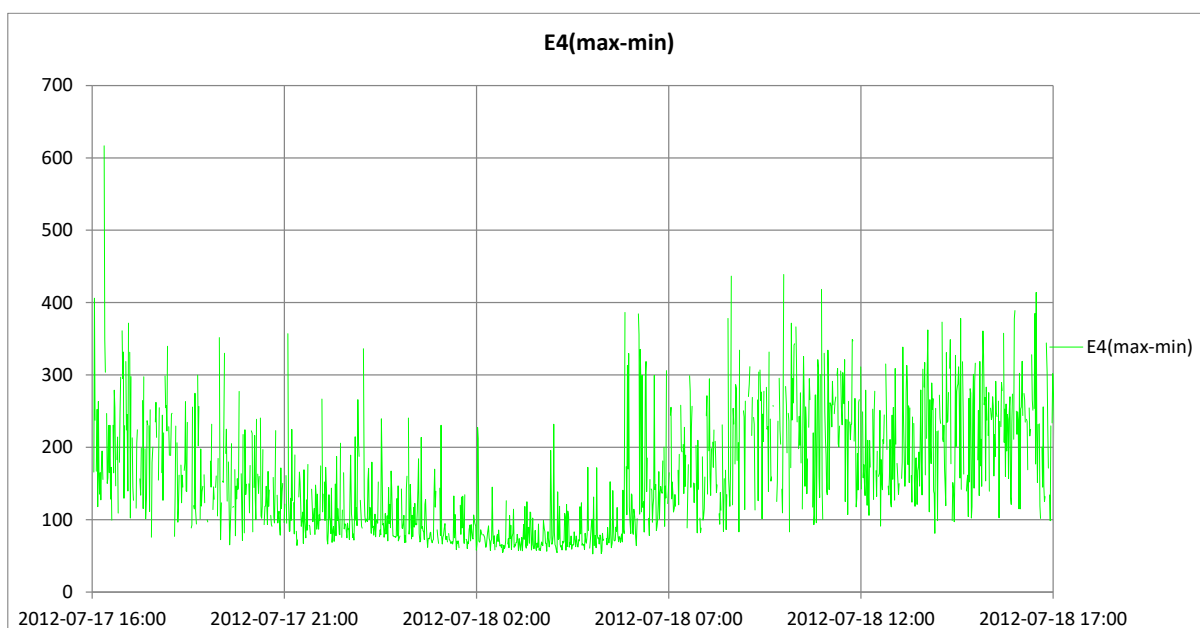


Fig. 26 – Extensómetro E4(Máx-Min) em um minuto: medições em 25 horas – Sem tráfego ferroviário

Da comparação entre os gráficos relativos às diferenças entre máximos e mínimos, com e sem o tráfego ferroviário, pode concluir-se que existe uma redução considerável na amplitude das extensões, quando não se considera o tráfego ferroviário, no entanto continuam a verificar-se variações importantes, tal como se pode observar nos gráficos relativos à passagem exclusiva de tráfego rodoviário (Fig. 39 a Fig. 42).

4.2 Valores medidos durante a passagem de um comboio de passageiros, no sentido Sul-Norte

Neste ponto apresentam-se os valores medidos durante a passagem de um comboio de passageiros, das 8:01h, do dia 18 de julho de 2012.

Os valores medidos foram sujeitos a um filtro de média móvel com 20 valores.

Este comboio circulou no sentido Sul-Norte e consequentemente sobre a via de jusante.

Optou-se por apresentar, da Fig. 27 à Fig. 29, os gráficos referentes aos extensómetros E1 e E2, E3 e E4, e E13 e E14, por serem os mais significativos para esta passagem.

Para evidenciar a ocorrência da passagem do comboio, é apresentada, nestes gráficos, a curva referente ao extensómetro superior da longarina não carregada (E11).

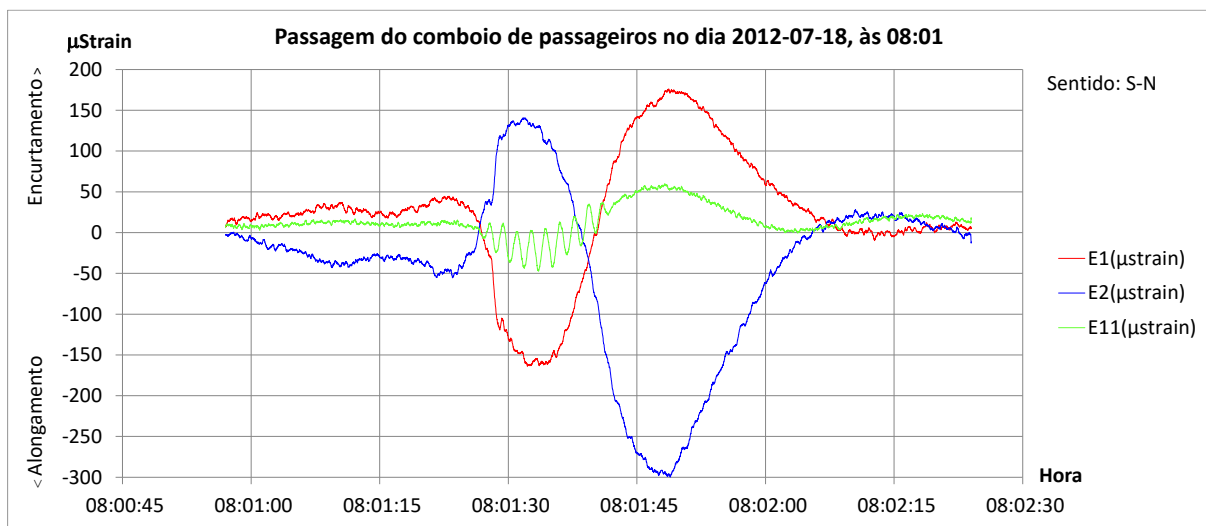


Fig. 27 – Extensómetros E1 e E2 - médias móveis com 20 valores: Comboio das 8:01h, do dia 18 de julho

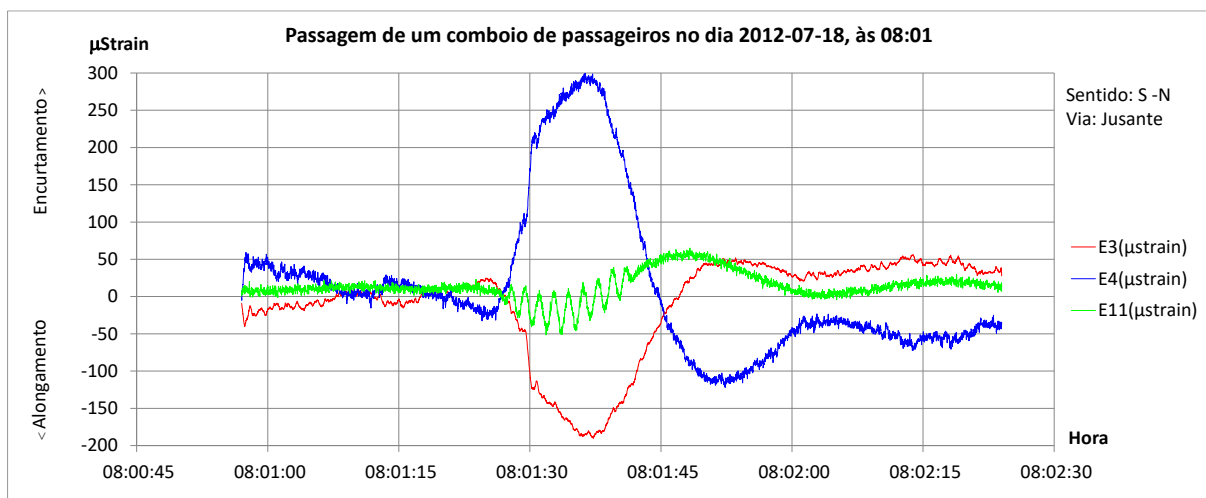


Fig. 28 – Extensómetros E3 e E4 - médias móveis com 20 valores: Comboio das 8:01h, do dia 18 de julho

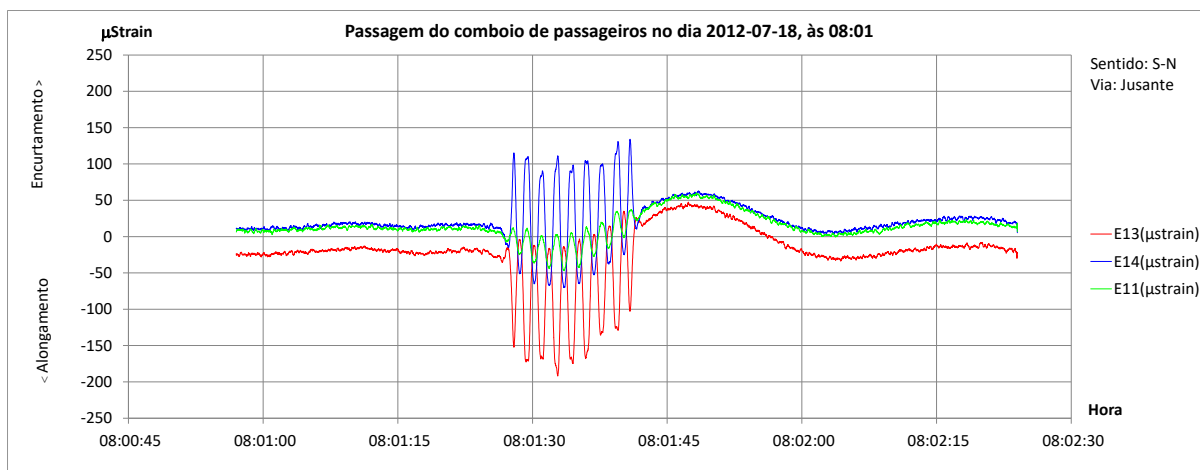


Fig. 29 – Extensómetros E13 e E14 - médias móveis com 20 valores: Comboio das 8:01h, do dia 18 de julho

4.3 Valores medidos durante a passagem de um comboio de passageiros, no sentido Norte-Sul

Neste ponto apresentam-se os valores medidos durante a passagem de um comboio de passageiros, das 8:07h, do dia 18 de julho de 2012.

Os valores medidos foram sujeitos a um filtro de média móvel com 20 valores.

Este comboio circulou no sentido Norte-Sul e conseqüentemente sobre a via de montante.

Optou-se por apresentar, da Fig. 30 à Fig. 32, os gráficos referentes aos extensómetros E1 e E2, E3 e E4, e E11 e E12, por serem os mais significativos para esta passagem.

Para evidenciar a simultaneidade da passagem do comboio, é apresentada, nestes gráficos, a curva referente ao extensómetro superior da longarina não carregada (E13).

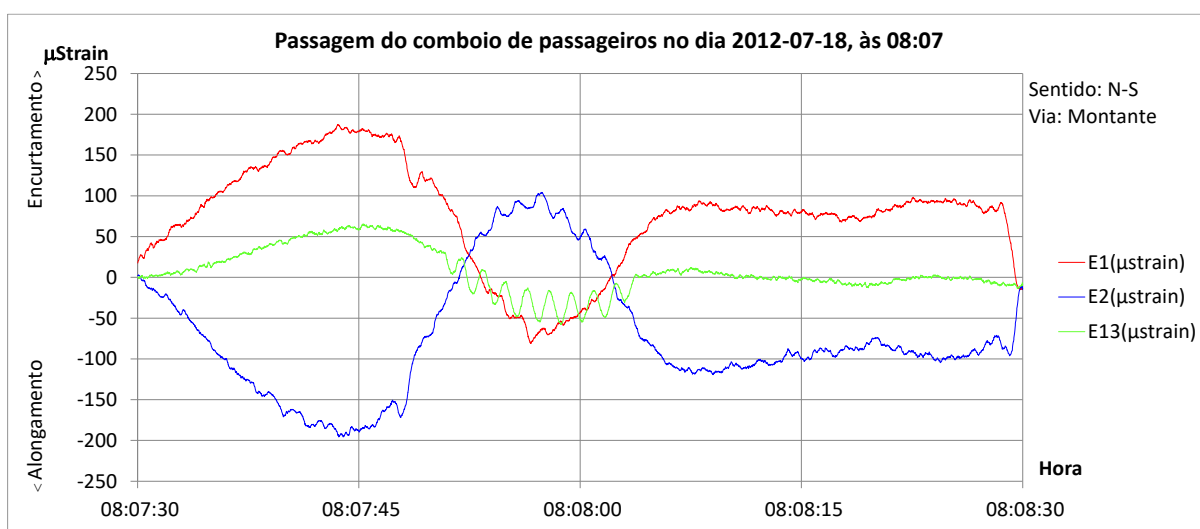


Fig. 30 – Extensómetros E1 e E2 - médias móveis com 20 valores: Comboio das 8:07h, do dia 18 de julho

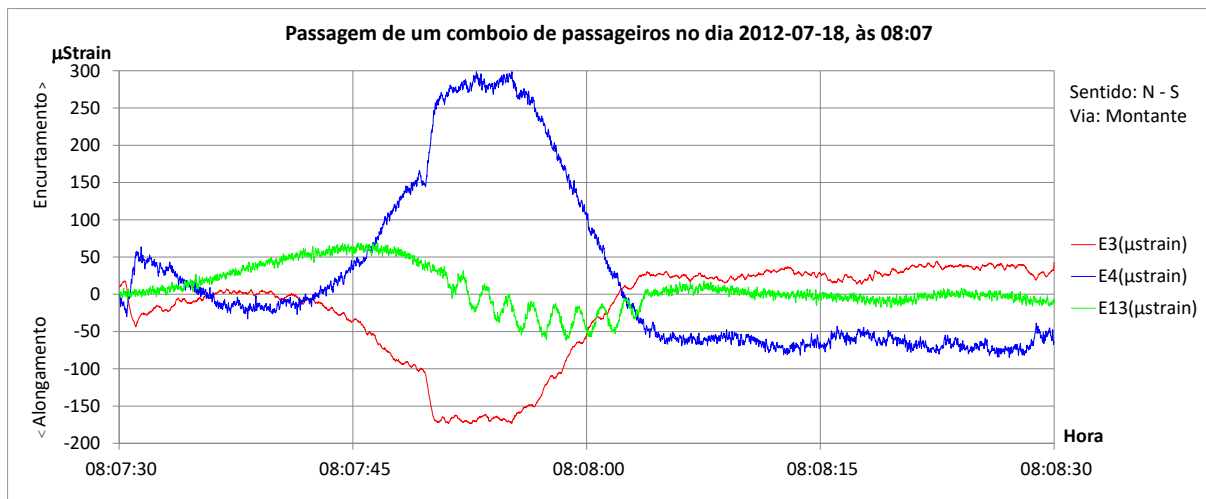


Fig. 31 – Extensómetros E3 e E4 - médias móveis com 20 valores: Comboio das 8:07h, do dia 18 de julho

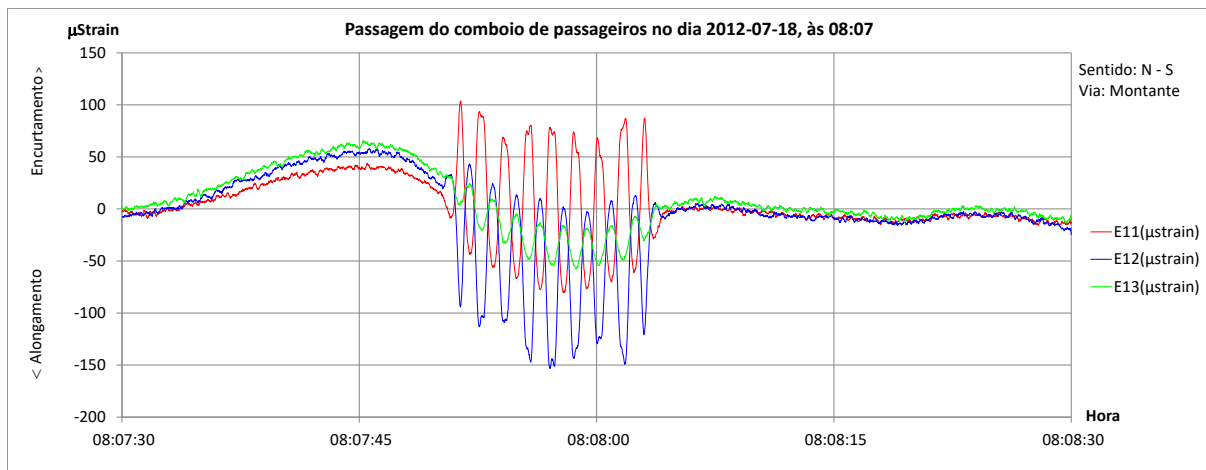


Fig. 32 – Extensómetros E11 e E12- médias móveis com 20 valores: Comboio das 8:07h, do dia 18 de julho

4.4 Resultados obtidos durante o cruzamento de dois comboios de passageiros

Neste ponto apresentam-se os valores medidos durante o cruzamento de dois comboios de passageiros, entre os painéis 79 e 81, às 19:17 do dia 17 de julho de 2012.

Os valores medidos foram sujeitos a um filtro de média móvel com 20 valores.

Optou-se por apresentar, da Fig. 33 à Fig. 35, os gráficos referentes aos extensómetros E1 e E2, E3 e E4, e E11 a E14, por serem os mais significativos para esta passagem.

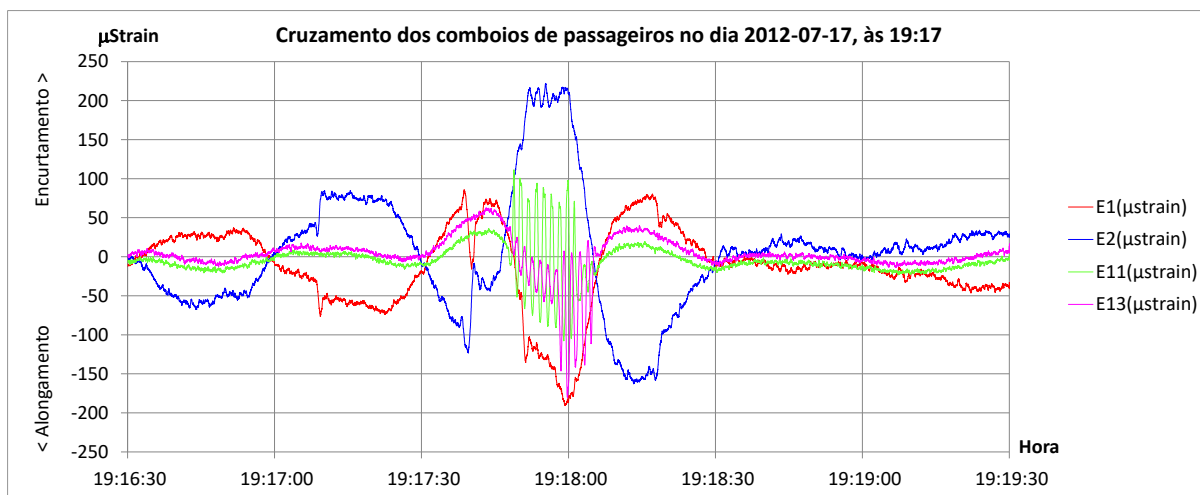


Fig. 33 – Extensómetros E1 e E2 - médias móveis com 20 valores: Comboio das 19:17h, do dia 17 de julho

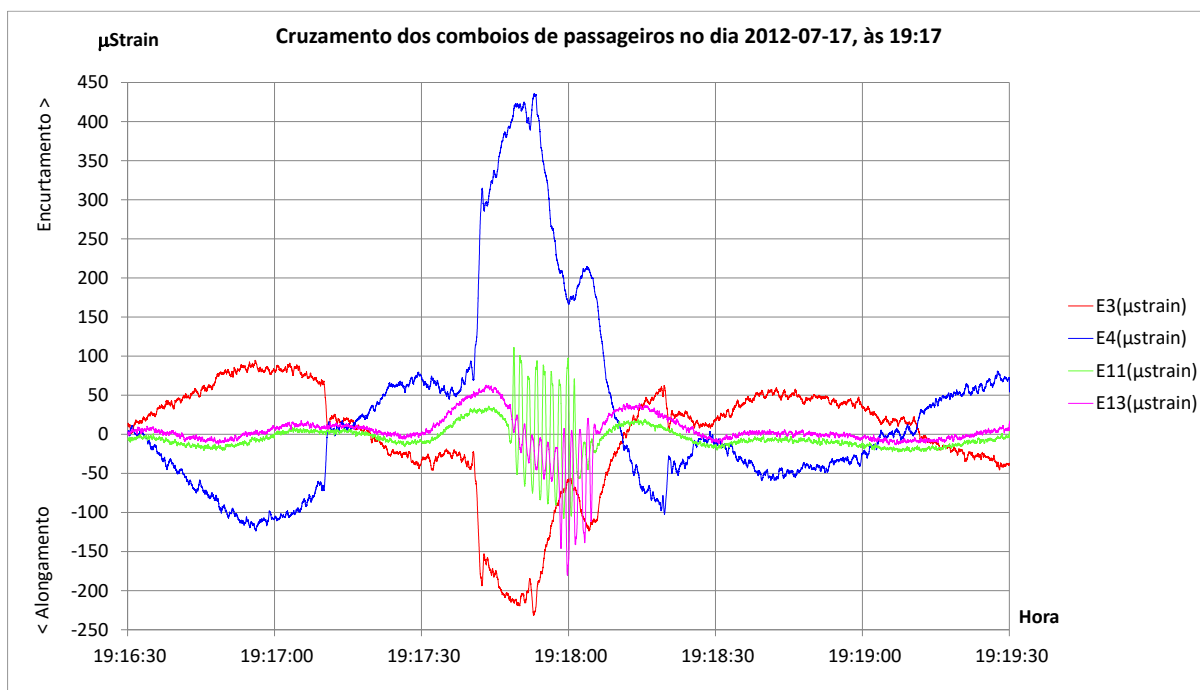


Fig. 34 – Extensómetros E3 e E4 - médias móveis com 20 valores: Comboio das 19:17h, do dia 17 de julho

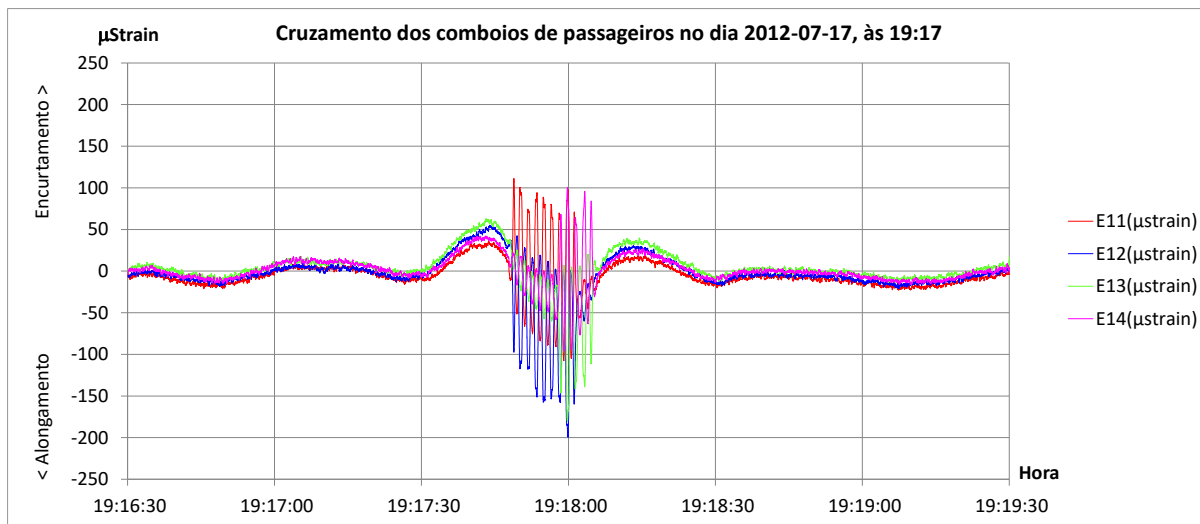


Fig. 35 – Extensómetros E11 a E14 - médias móveis com 20 valores: Comboio das 19:17h, do dia 17 de julho

4.5 Valores medidos durante a passagem de um comboio de mercadorias, no sentido Norte-Sul

Neste ponto apresentam-se os valores medidos durante a passagem do comboio das 11:48h, do dia 18 de julho de 2012.

Os valores medidos foram sujeitos a um filtro de média móvel com 20 valores.

Este comboio circulou no sentido Norte-Sul e conseqüentemente sobre a via de montante.

Optou-se por apresentar, da Fig. 36 à Fig. 38, os gráficos referentes aos extensómetros E1 e E2, E3 e E4, e E11 e E12, por serem os mais significativos para esta passagem.

Para evidenciar a simultaneidade da passagem do comboio, é apresentada, nestes gráficos, a curva referente ao extensómetro superior da longarina não carregada (E13).

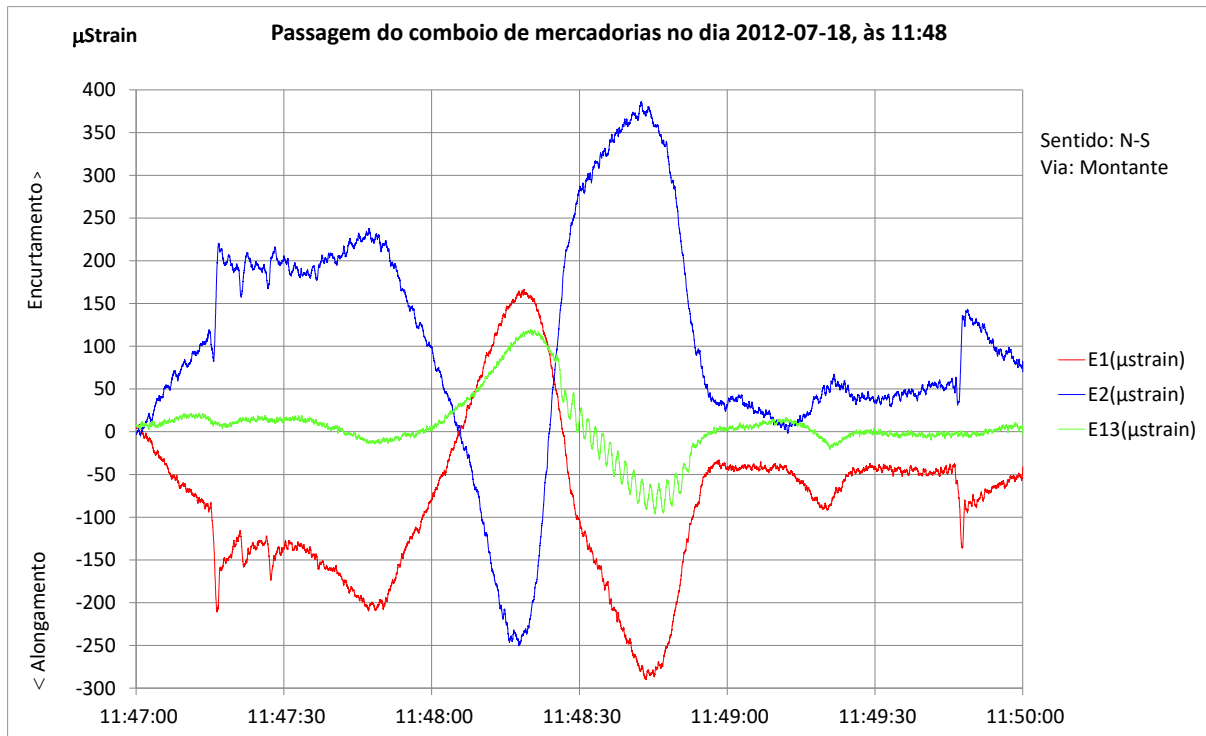


Fig. 36 – Extensómetros E1 e E2 - médias móveis com 20 valores: Comboio das 11:48h, do dia 18 de julho

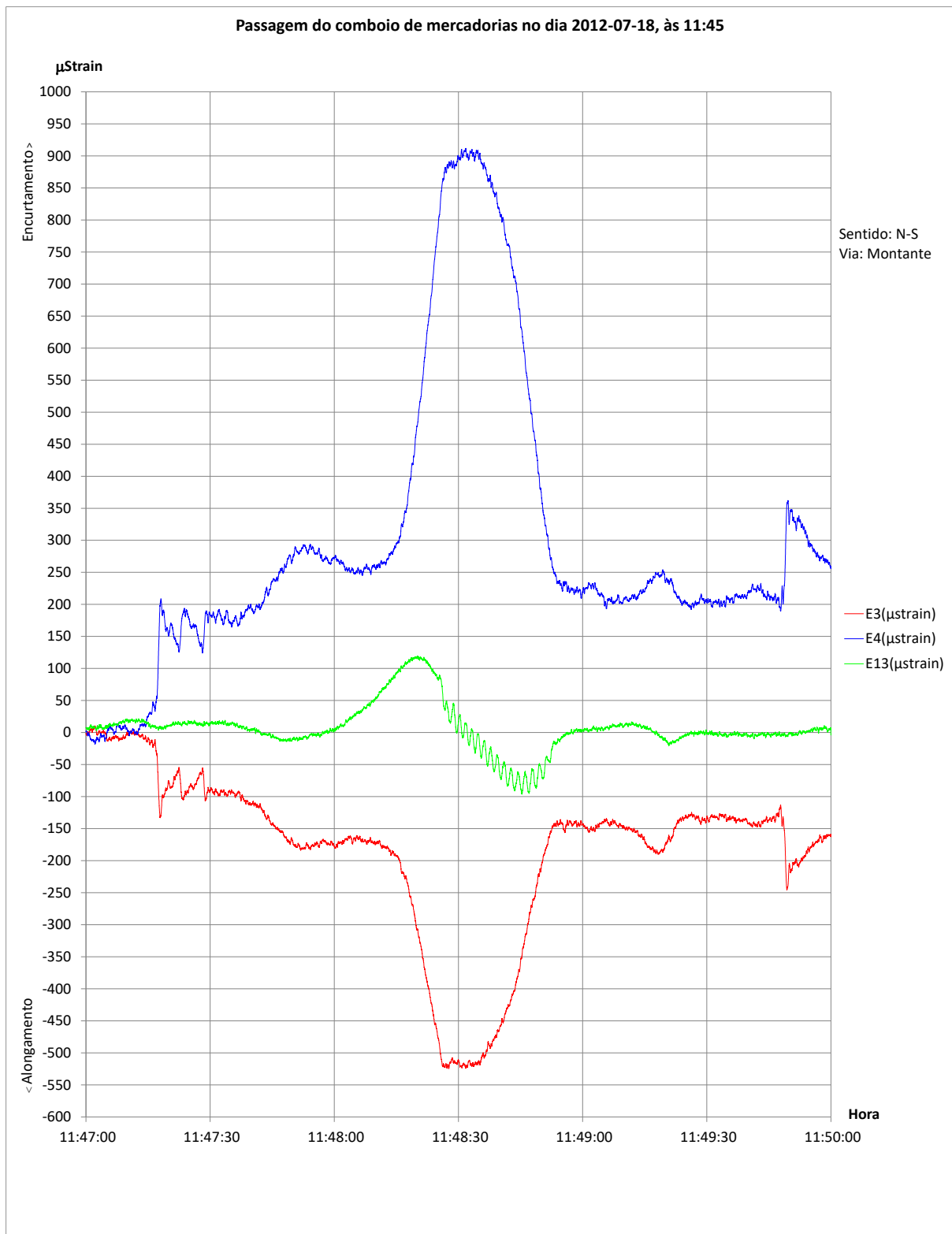


Fig. 37 – Extensómetros E3 e E4 - médias móveis com 20 valores: Comboio das 11:48h, do dia 18 de julho

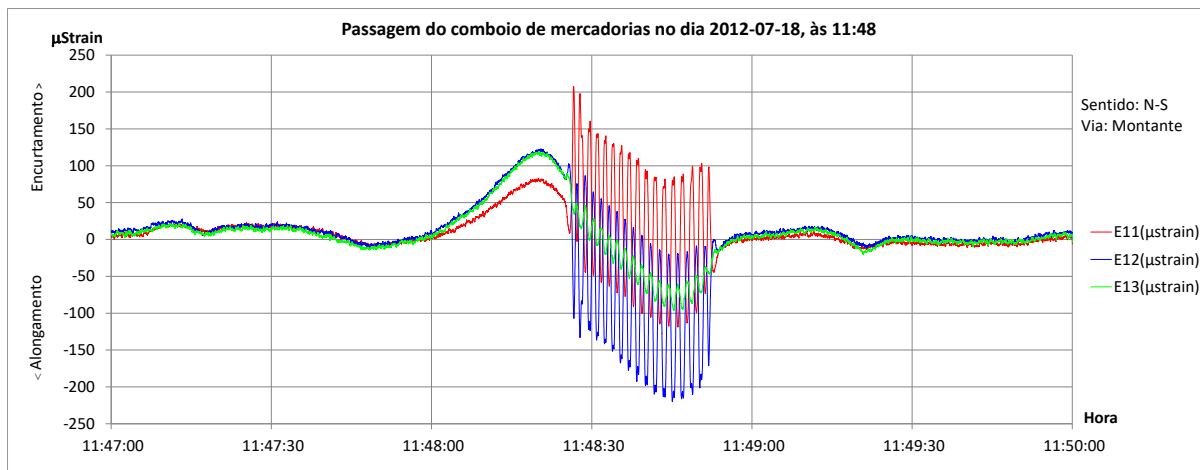


Fig. 38 – Extensómetros E11 e E12 - médias móveis com 20 valores: Comboio das 11:48h, do dia 18 de julho

4.6 Valores medidos sem a passagem de tráfego ferroviário

Neste ponto apresentam-se os valores medidos nalguns dos períodos de dez minutos, durante os quais não se verificou a passagem de tráfego ferroviário.

Optou-se por apresentar, da Fig. 39 à Fig. 41, os gráficos referentes aos extensómetros E1 e E2, e E3 e E4, por serem os mais significativos para estas passagens.

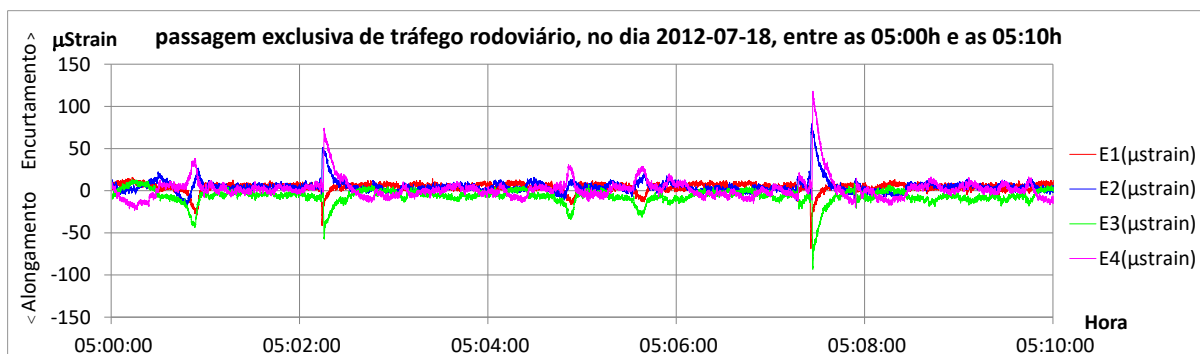


Fig. 39 – Extensões medidas durante o período de dez minutos, entre as 5:00h e as 5:10h, do dia 18 de julho

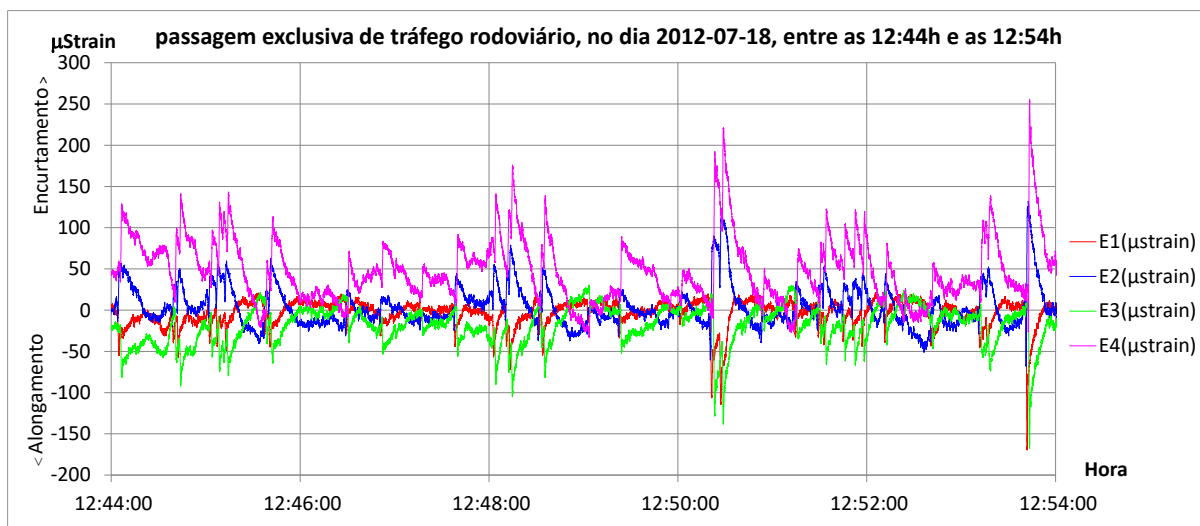


Fig. 40 – Extensões medidas durante o período de dez minutos, entre as 12:44h e as 12:54h, do dia 18 de julho

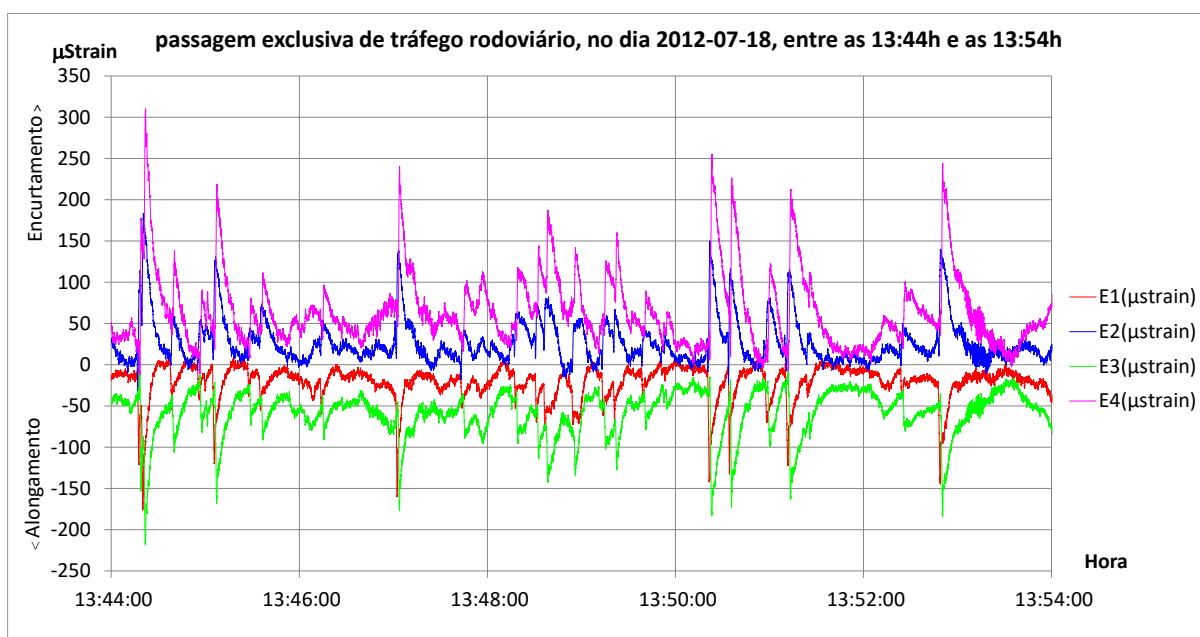


Fig. 41 – Extensões medidas durante o período de dez minutos, entre as 13:44h e as 13:54h, do dia 18 de julho

Apresenta-se na Fig. 42 uma ampliação da parte inicial do gráfico apresentado na Fig. 41.

Em todos os gráficos, da Fig. 39 à Fig. 41, pode observar-se que o sentido de flexão, no plano horizontal, é o mesmo, sendo que, o primeiro foi registado às 5:00 h, altura em que a ponte se encontrava a arrefecer, e os dois últimos foram registados próximo das 13:00 h ou 14:00 h, altura em que a ponte estaria a aquecer.

No gráfico da Fig. 42 pode observar-se que as variações bruscas de extensão ocorrem primeiro nos extensómetros E1 e E2 (painel 81) e só depois nos extensómetros E3 e E4

(painel 79), observação que se encontra em concordância com o sentido de circulação do tráfego.

Note-se que quando um veículo entra num painel de tabuleiro, exerce-se nas longarinas, não só uma ação vertical, correspondente ao peso, mas também uma ação horizontal, correspondente a uma das forças que compõem o binário das rodas.

Não deve, no entanto, ser descartada a hipótese de algumas das variações bruscas se poderem dever à libertação de forças de atrito, ou de bloqueio, mobilizadas nos apoios extremos das longarinas do tabuleiro rodoviário.

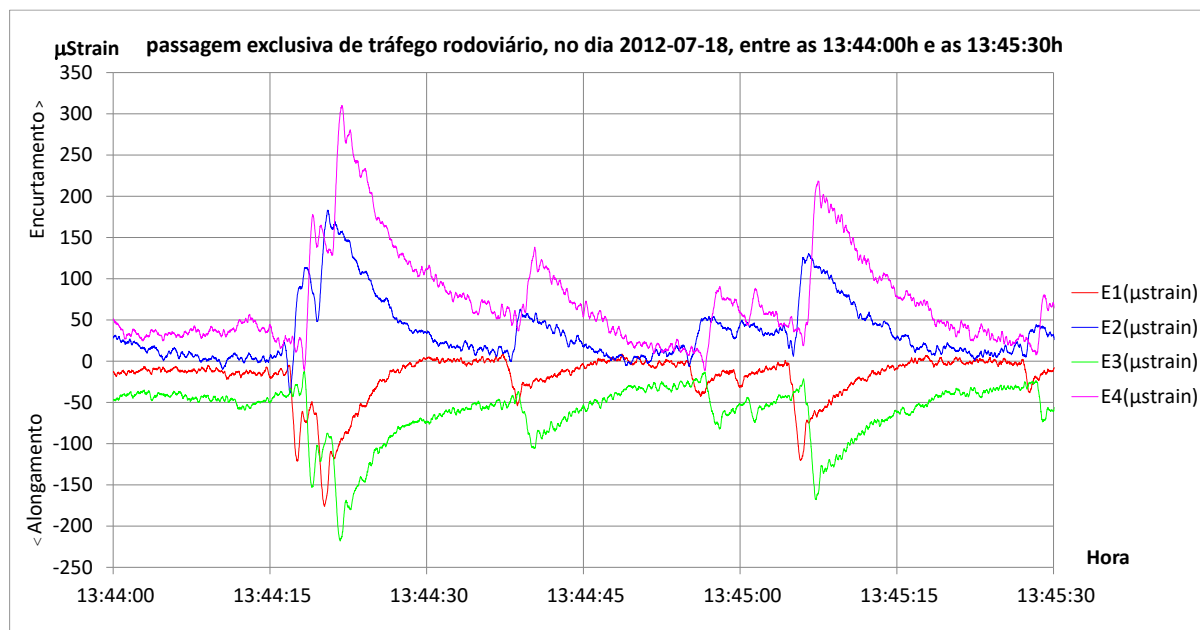


Fig. 42 – Extensões medidas durante o período de um minutos e trinta segundos, entre as 13:44:00h e as 13:45:30h, do dia 18 de julho

4.7 Resumo dos resultados obtidos

No Quadro I apresenta-se um resumo das variações de extensão, após filtragem, que se verificaram durante a passagem de diferentes tipos de comboios.

Quadro I – Resumo das variações de extensão medidas durante a passagem de comboios

Comboio	Tipo	Sentido	Variações de extensão (10^{-6})			
			E1	E2	E3	E4
2012-07-18; 08:01h	Passageiros	Sul-Norte	339	440	246	422
2012-07-18; 08:07h	Passageiros	Norte-Sul	268	300	218	383
2012-07-18; 11:48h	Mercadorias	Norte-Sul	456	637	535	931
2012-07-17; 19:17h	Passageiros	Ambos	276	384	326	560

Note-se que os comboios das 8:01h e das 8:07h são idênticos, sendo que, o das 8:01h terá de transportar mais passageiros, por se tratar da hora de entrada em Lisboa. Por este motivo as variações de extensão por ele provocadas são maiores, apesar de circular pela via de jusante e os extensómetros se encontrarem do lado montante da treliça do painel transversal.

O comboio das 11:48h, juntamente com o tráfego rodoviário, provocaram variações de extensão muito superiores às dos restantes, devendo ter-se em conta que o valor máximo detetado, para a variação de extensão, foi de 931×10^{-6} , o que corresponde a uma variação de tensão de 186MPa, se se considerar um módulo de elasticidade do aço igual a 200GPa. Chama-se a atenção para o facto de variações tensão desta magnitude provocarem danos por fadiga.

O cruzamento de comboios, que se verificou às 19:17h, provocou uma maior variação de extensão, no painel 79, do que a originada pela passagem dos comboios das 8:01h e 8:07h. É provável que se as locomotivas dos comboios se cruzarem exatamente em cima dos painéis, este efeito seja ainda agravado, embora seja necessária uma sincronização particularmente desfavorável para que os efeitos dos dois combóis se somem na totalidade.

No Quadro II apresentam-se os valores médios, máximos e mínimos das amplitudes máximas de extensão, medidas nos extensómetros E1 a E4, referidas a períodos de um minuto, para o intervalo de tempo de 25 horas, iniciado às 16:00h do dia 17 de julho de 2012.

Apresentam-se valores correspondentes à totalidade do intervalo de tempo, aos períodos em que se verifica apenas tráfego rodoviário e aos períodos em que se verificou a circulação de comboios.

Quadro II – Resumo das variações de extensão, num minuto

Tráfego	Variações de extensão (10^{-6}), num minuto											
	E1			E2			E3			E4		
	Med	Max	Min	Med	Max	Min	Med	Max	Min	Med	Max	Min
Ferr. ou rodo.	131	492	45	144	679	36	137	423	45	186	734	44
Rodoviário	112	397	45	119	507	36	122	379	45	159	617	44
Ferrovário	275	492	107	326	679	106	245	423	102	383	734	126

Dado que a duração da passagem, sobre a zona instrumentada, dos veículos que circulam sobre o tabuleiro rodoviário é bastante inferior à duração da passagem dos comboios, as variações de extensão devem ser referidas a um período mais curto do que um minuto. Neste caso, em função dos registos obtidos, considerou-se adequado efetuar as médias e determinar valores máximos e mínimos para períodos de dez segundos. No Quadro III apresentam-se os valores assim obtidos para a circulação rodoviária.

Quadro III – Resumo das variações médias de extensão para o tráfego rodoviário, em 10 s

Tráfego	Variações de extensão (10^{-6}), em 10 s											
	E1			E2			E3			E4		
	Med	Max	Min	Med	Max	Min	Med	Max	Min	Med	Max	Min
Rodoviário	67	359	40	71	375	39	69	286	36	83	393	39

5. CONCLUSÕES

A existência de fendas, nas chapas de ligação dos perfis “U” das treliças dos painéis transversais da viga de rigidez da ponte 25 de Abril, pode atribuir-se ao facto destes perfis se encontrarem sujeitos, para além das forças que atuam no plano vertical, para as quais foram essencialmente concebidos, também a forças que atuam no plano horizontal, que provocam a torção e flexão desviada.

Podem atribuir-se como causas desta situação os atritos ou os bloqueios que se verificam entre as extremidades das longarinas de suporte do tabuleiro rodoviário e as vigas dos painéis transversais onde se apoiam. O impedimento do livre movimento longitudinal das extremidades destas longarinas gera forças horizontais perpendiculares aos painéis transversais da viga de rigidez, durante a passagem do tráfego rodoviário e ferroviário.

Deve salientar-se que o comboio de carga que passou na zona das secções instrumentadas, cerca das 11:48h, do dia 18 de julho de 2012, juntamente com o tráfego rodoviário, provocou variações de extensão máximas de cerca 931×10^{-6} , o que corresponde uma variação de tensão de cerca de 186MPa, considerando que o módulo de elasticidade do aço é igual a 200GPa. Chama-se a atenção para o facto de variações tensão desta magnitude provocarem danos por fadiga.

Nos registos, com duração de dez minutos, onde se verifica a passagem exclusiva de tráfego rodoviário observa-se que, o sentido de flexão, no plano horizontal, é sempre o mesmo, sendo que o primeiro foi obtido às cinco horas da manhã, altura em que a ponte se encontrava a arrefecer, e que os dois últimos foram obtidos próximo da uma ou duas horas da tarde, altura em que a ponte estaria a aquecer.

Na ausência de tráfego ferroviário, as variações de extensão ocorrem primeiro nos extensómetros E1 e E2 e só depois nos extensómetros E3 e E4, o que está em concordância com o sentido de circulação do tráfego rodoviário.

O valor médio, das amplitudes de extensão provocadas pelo tráfego rodoviário, é cerca de 25% do valor médio, das amplitudes extensão provocadas pelo tráfego ferroviário. No entanto, os valores máximos das variações extensão provocadas pelo tráfego de pesados são idênticos aos provocados passagem de comboios de passageiros.

AGRADECIMENTOS

Agradece-se toda a colaboração prestada, quer pelo ISQ, quer pela EP, durante os trabalhos realizados pelo LNEC.

REFERÊNCIAS

- [1] Silveira, Paulo; Santos, João Pedro; Oliveira, André – *Medição de Extensões entre os Painéis 79 e 81, do Tramo Lateral Sul da Ponte 25 de Abril. 17 a 18 de julho de 2012. Relatório 186/2012 – DE/NOE, LNEC, 2012, 35 p.*