

## 5 Análise dos Resultados

### 5.1. Desempenho dos eletrônives

- **Seção A**

Os eletrônives de A1 a A17 foram instalados no mês de Outubro de 2008. Como pôde ser observado no Capítulo anterior (itens 4.1.1 e 4.1.3), logo após a primeira etapa de instalação dos eletrônives, se iniciou a construção da berma a montante da barragem, ainda em Outubro de 2008. A velocidade de colocação da berma foi praticamente constante e sem interrupções.

Na Figura 5.1 são apresentadas as leituras dos eletrônives, com a utilização do Mini Data-Logger, em função do tempo desde a instalação, em 11/10/2008, até 28/09/2009. Observa-se que antes do início da construção do aterro os eletrônives indicaram uma pequena variação negativa (em um período de aproximadamente 4 dias após a instalação). Essa variação corresponde a uma deflexão para montante (tração das fibras negativas) da parte inferior da face de concreto, devido a esforços na parte superior da barragem e conseqüente acomodação por peso próprio do enrocamento, como será mostrado na análise das deflexões. Entretanto, em meados do mês de outubro se iniciou efetivamente a obra da berma a montante.

O Eletrônível A3 apresentou uma maior variação positiva nos meses de outubro/08 e novembro/08 seguido de variação negativa nos meses subseqüentes, indicando uma deflexão para jusante mais expressiva nessa região da laje. Houve uma tendência de estabilização das leituras ao final da construção da berma.

Para se ter uma idéia em termos de valores, utilizando o fator de calibração médio dos eletrônives, uma variação de 1000 unidades de leitura representa uma rotação próxima a 24 minutos de grau.

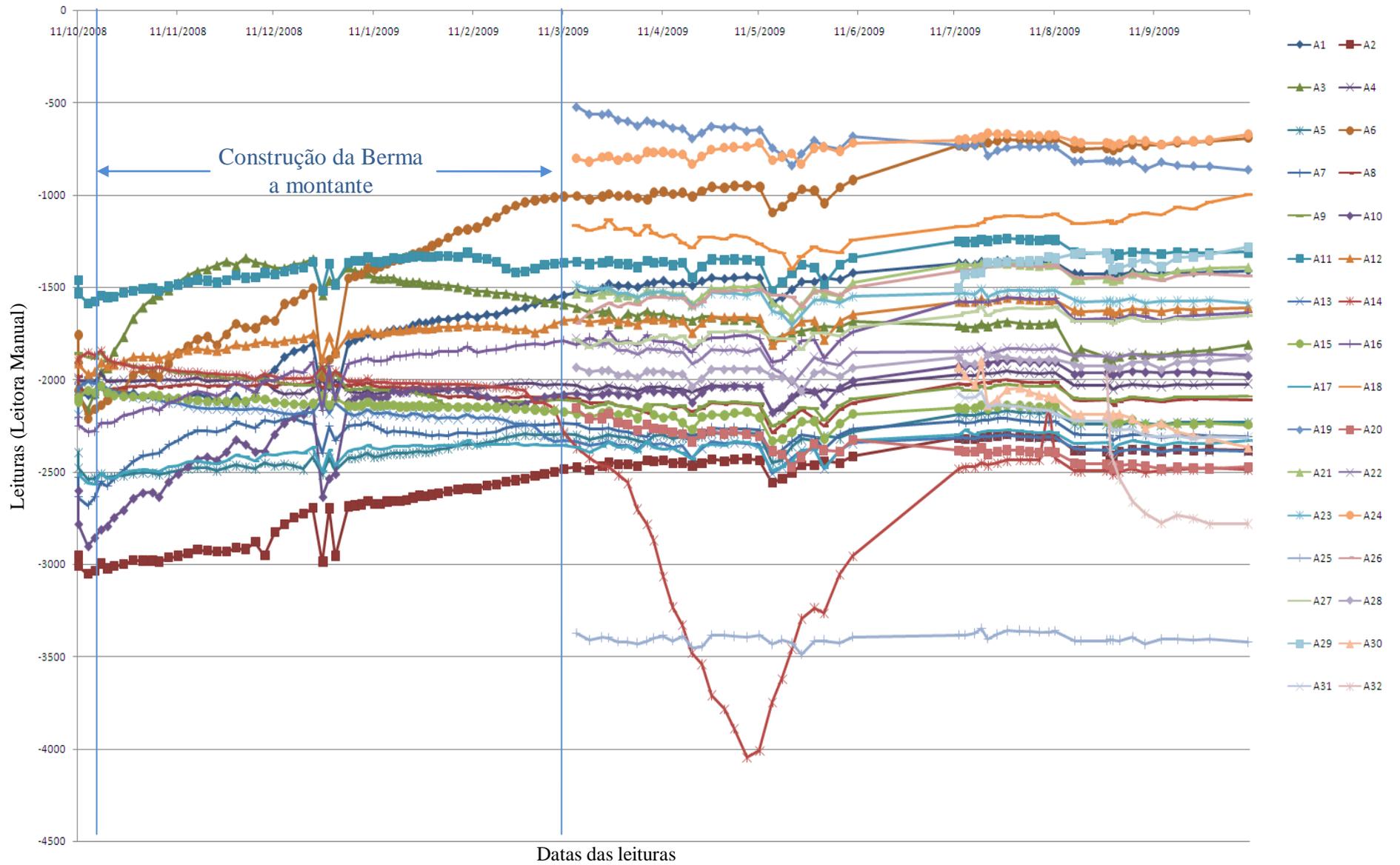


Figura 5.1 – Variação das leituras com o tempo para a Seção A.

A construção da berma a montante da barragem afetou o comportamento dos eletrônives, como pode ser visto na Figura 4.1. Houve uma variação positiva dos eletrônives de A1 a A17, indicando uma deflexão para jusante (tração das fibras positivas), ocasionada pela carga da berma. No item referente à análise das deflexões será abordado o efeito da construção da berma e do corpo da barragem com relação à deformada da face.

No período entre 26/12/2008 e 30/12/2008 houve uma variação negativa em todos os eletrônives instalados, fato possivelmente ligado ao efeito de Poisson devido à colocação de material e compactação no corpo da barragem no período. No entanto essa não é uma situação preocupante, pois não indica distorções angulares, mas sim um movimento de corpo rígido da face.

O eletrônível A14 apresentou um comportamento anômalo, com expressiva variação negativa ( $1^{\circ} 30'$ ) em um curto período de tempo (em torno de 30 dias), seguido de variação positiva e posterior estabilização. Essa variação negativa indica uma rotação significativa, capaz de representar momentos fletores elevados nessa região. Portanto, para uma melhor avaliação dos efeitos dessa variação devem ser avaliados os momentos fletores e deflexões da face, assuntos dos itens subsequentes.

- **Seção C**

Os eletrônives da Seção C foram instalados em período próximo ao término da construção da berma a montante, sendo possível notar certa estabilização das leituras, com sutil variação negativa. Pelo fato de se encontrar próxima à ombreira da barragem, a seção C não apresentou significativa movimentação, sendo que esta se deu para montante.

Na Figura 5.2 podem ser vistas as leituras com o tempo para a seção C no período de 15/03/2009 à 28/09/2009. Os eletrônives indicaram deflexão para montante, destacando-se o comportamento dos eletrônives C16 e C18 pela ampla variação das leituras indicando essa movimentação de jusante para montante na região próxima à crista da barragem, fato a ser avaliado no cálculo das deflexões.

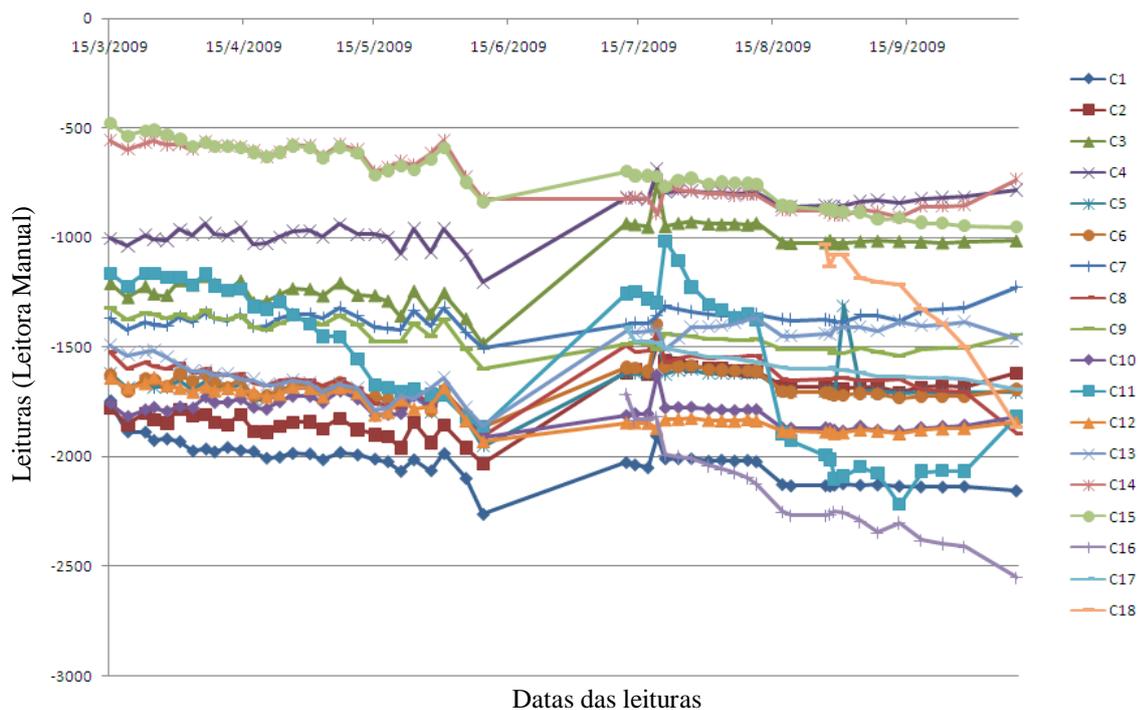


Figura 5.2 – Variação das leituras com o tempo na Seção C.

#### • Seção D

As leituras observadas na Seção D apresentaram comportamento global estável, sendo possível acusar algum tipo de movimentação da face para montante através da pequena variação global negativa das leituras com o tempo (Figura 5.3).

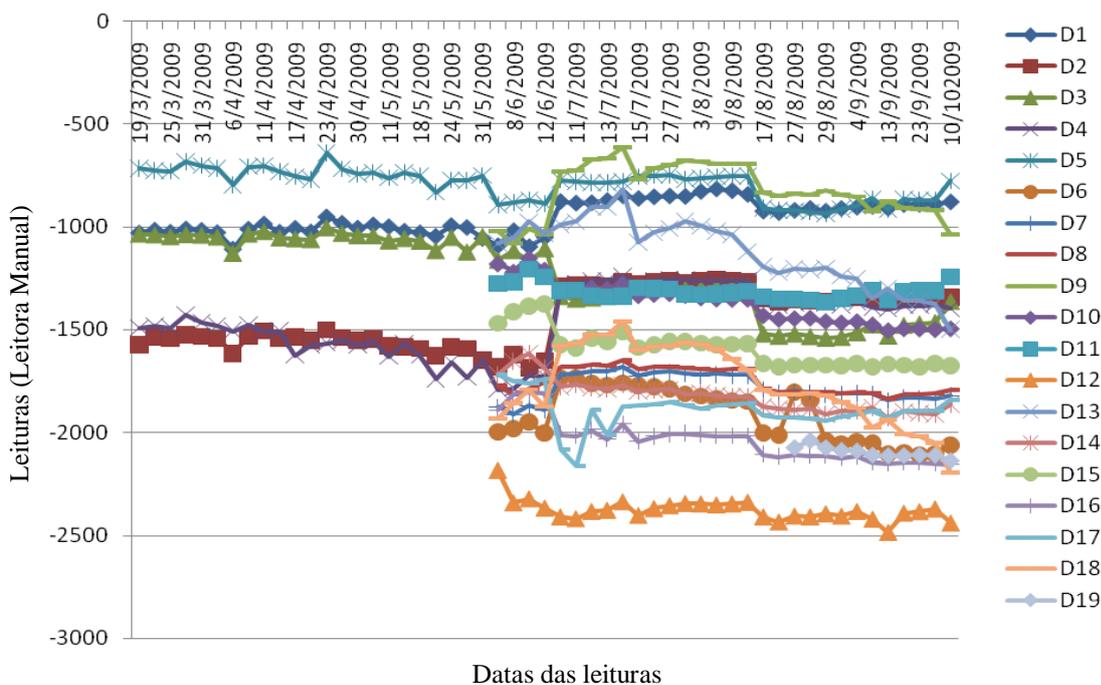


Figura 5.3 – Variação das leituras com o tempo na Seção D.

- **Seção B**

Conforme citado anteriormente, a região da face correspondente à seção B foi a última a ser construída dentre as seções instrumentadas. Sendo assim, a primeira leitura ocorreu em 24/07/2009 (Figura 5.4). Novamente se nota certa estabilização das leituras, com uma pequena variação negativa, onde se destaca o comportamento do eletrônível B2, que apesar de variação inferior a 20 segundos de grau, está localizado em uma região de maior rigidez da face, devido à maior espessura nas proximidades do plinto.

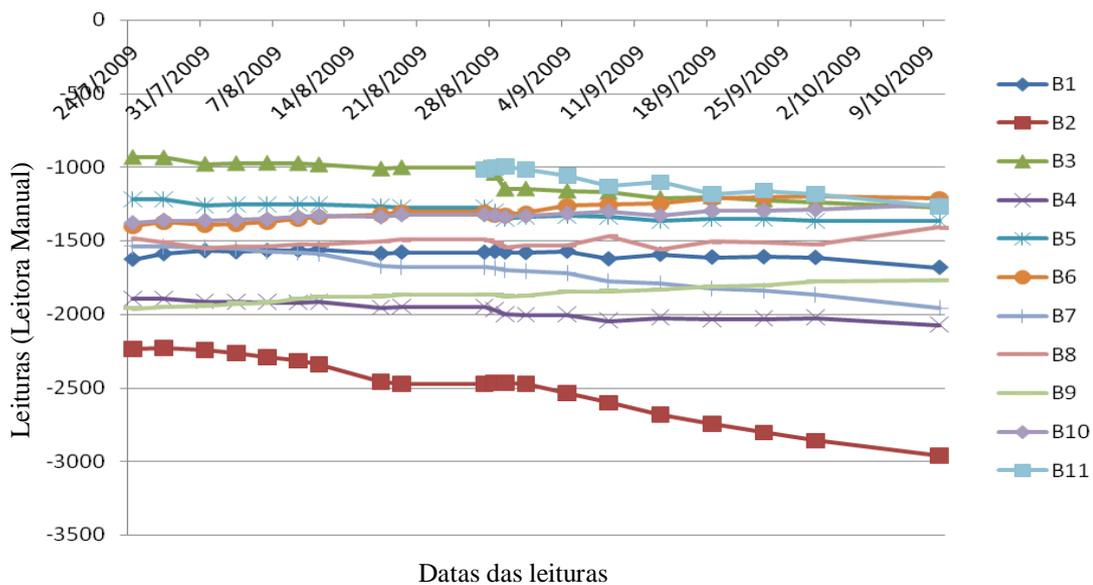


Figura 5.4 – Variação das leituras com o tempo na Seção B

## 5.2. Ajuste das Curvas

A ferramenta utilizada para os cálculos apresentados no Capítulo 2 (itens 2.3.2 e 2.3.3) foi o Microsoft Excel, através de funções escritas em código VBA (*Visual Basic for Applications*).

O Excel já fornece através de uma opção nos gráficos, a equação de regressão no máximo até o sexto grau. No entanto, foi necessária a utilização do código com duas finalidades. A primeira é que a função utilizada com o código em VBA permite a regressão de polinômio de qualquer grau, pois se trata de uma programação do produto matricial  $A = M^{-1} \cdot B$ , descrito anteriormente. A segunda finalidade é a automatização dos cálculos, ou seja, após o lançamento das leituras nas planilhas é possível gerar os coeficientes ajustados pelo método dos mínimos quadrados em células que por sua vez são utilizadas nas equações para os cálculos, já que a quantidade de dados é grande e de geração contínua.

As rotinas se encontram no Apêndice B. Foi ainda utilizado o Software Maple 11 para verificação dos cálculos.

Com a finalidade de obter a regressão com restrição (item 3.3.3), o código em VBA do Excel apresentado no Apêndice B foi modificado para geração automática das matrizes  $M'$  e  $B'$ .

### 5.2.1. Resultados dos ajustes polinomiais dos pontos de rotação por aproximação (Método dos mínimos quadrados)

O melhor ajuste das curvas depende da quantidade de pontos experimentais (rotações). No início havia apenas 17 eletrônicos instalados na seção A, portanto apenas 17 pontos experimentais (rotações). Foram obtidos os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) para todas as curvas, para vários graus de polinômios. Na Figura 5.5 são apresentadas as curvas das aproximações obtidas para vários graus de polinômios, para uma data qualquer selecionada (no exemplo dia 8 de dezembro de 2008). Já na Figura 5.6 foram eliminadas as curvas com maiores erros para visualização das melhores aproximações.

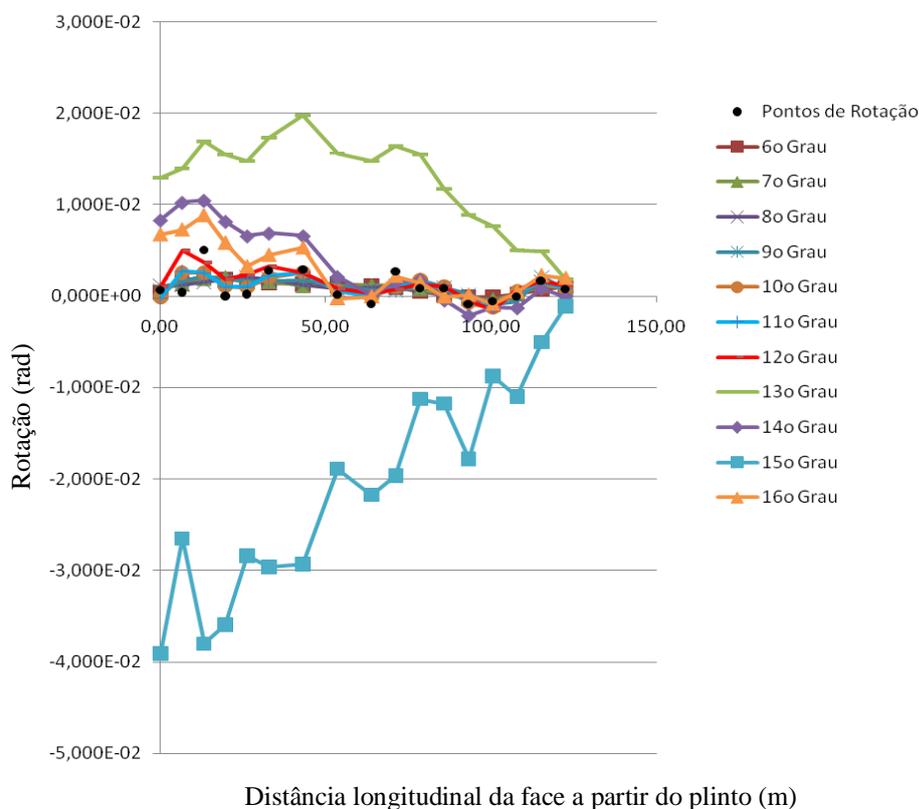


Figura 5.5 – Ajustes polinomiais aos pontos de rotação dos eletrônicos da Seção A (08/12/08).

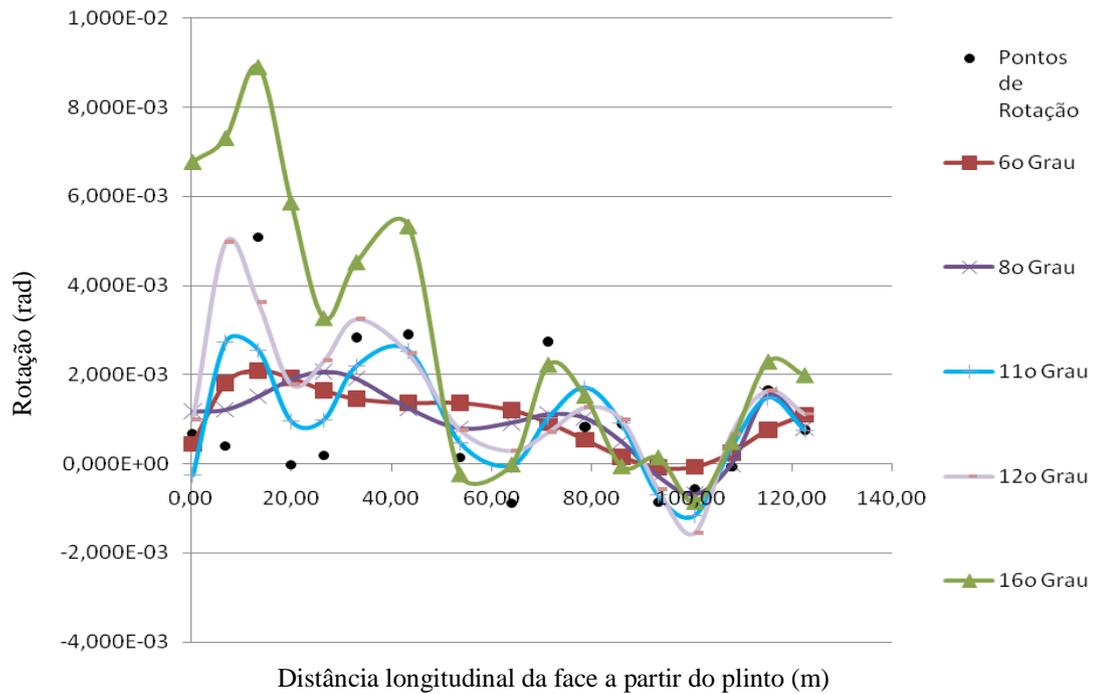


Figura 5.6 – Melhores ajustes polinomiais aos pontos de rotação.

Os polinômios de grau inferior consistem em curvas mais suaves. Na Tabela 5.1 e são apresentados os coeficientes de determinação para as curvas para 6 datas selecionadas.

Tabela 5.1 – Coeficientes de Determinação para os ajustes polinomiais dos eletrônios A1 a A17.

|                          | $R^2$<br>(20/10/08) | $R^2$<br>(11/11/08) | $R^2$<br>(08/12/08) | $R^2$<br>(09/01/09) | $R^2$<br>(12/02/09) | $R^2$<br>(08/03/09) |
|--------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| <b>Polinômio Grau 6</b>  | 0,233               | 0,259               | 0,208               | 0,189               | 0,199               | 0,278               |
| <b>Polinômio Grau 7</b>  | 0,126               | 0,210               | 0,205               | 0,213               | 0,214               | 0,291               |
| <b>Polinômio Grau 8</b>  | 0,177               | 0,210               | 0,240               | 0,357               | 0,460               | 0,596               |
| <b>Polinômio Grau 9</b>  | 0,368               | 0,329               | 0,303               | 0,369               | 0,461               | 0,596               |
| <b>Polinômio Grau 10</b> | 0,516               | 0,547               | 0,544               | 0,574               | 0,634               | 0,743               |
| <b>Polinômio Grau 11</b> | 0,526               | 0,552               | 0,567               | 0,638               | 0,715               | 0,799               |
| <b>Polinômio Grau 12</b> | 0,290               | 0,368               | 0,394               | 0,525               | 0,621               | 0,753               |
| <b>Polinômio Grau 13</b> | 0,607               | 0,186               | 0,193               | 0,137               | 0,105               | 0,252               |
| <b>Polinômio Grau 14</b> | 0,533               | 0,298               | 0,294               | 0,291               | 0,345               | 0,457               |
| <b>Polinômio Grau 15</b> | 0,036               | 0,115               | 0,091               | 0,093               | 0,113               | 0,102               |
| <b>Polinômio Grau 16</b> | 0,733               | 0,433               | 0,415               | 0,397               | 0,428               | 0,523               |

Observa-se que graus polinomiais elevados não representam bem a nuvem de pontos. Isso consiste em uma incoerência matemática, já que o polinômio de grau  $n-1$ , onde  $n$  é o número de pontos, deveria interpolar os dados. A explicação para essa situação é que o procedimento de inversão da matriz para graus muito altos é muito delicado, incorrendo em erros substanciais, principalmente pelo fato de a matriz de Vandermonde (Equações normais) para este caso

possuir difícil inversão, ou seja, grande discrepância na ordem de grandeza dos termos. Por exemplo, no polinômio de 16º grau existem termos com ordem de grandeza  $10^{-8}$  e  $10^{33}$  compondo a mesma matriz. Sendo assim, o Microsoft Excel propaga erros na inversão, impedindo a correta análise com os algoritmos programados neste software.

Diante de tal situação, foi utilizado o Software Maple 11, o qual forneceu resultados também matematicamente incoerentes. Foi realizado um teste após a inversão da matriz ( $M^{-1}$ ), explicada do Capítulo 3, através do produto  $M \cdot M^{-1}$ , o qual deveria fornecer a matriz identidade e, no entanto, forneceu uma matriz onde os termos que deveriam ser nulos eram às vezes superiores a três dezenas.

Um ponto interessante que pode ser facilmente observado e uma peculiaridade, para o caso da primeira etapa de instalação A1 a A17, é a convergência das curvas polinomiais aos pontos experimentais com o passar do tempo. Leituras mais recentes resultaram em melhores aproximações polinomiais nessa etapa construtiva. Para polinômios de grau superior ao 12º, se nota haver inconsistência nos valores, pelos fatores explicados anteriormente.

Na Figura 5.7 se podem observar as variações dos coeficientes de determinação ( $R^2$ ) com o tempo (EN A1 a EN A17), para os graus polinomiais citados. O motivo de tal comportamento é possivelmente o fato da taxa de variação das deflexões diminuir, ou seja, o enrocamento é mais compressível no início, aumentando a dispersão dos pontos de rotação. Com o passar do tempo os taludes do enrocamento tendem a possuir pontos de rotação com menor dispersão, permitindo melhores ajustes polinomiais.

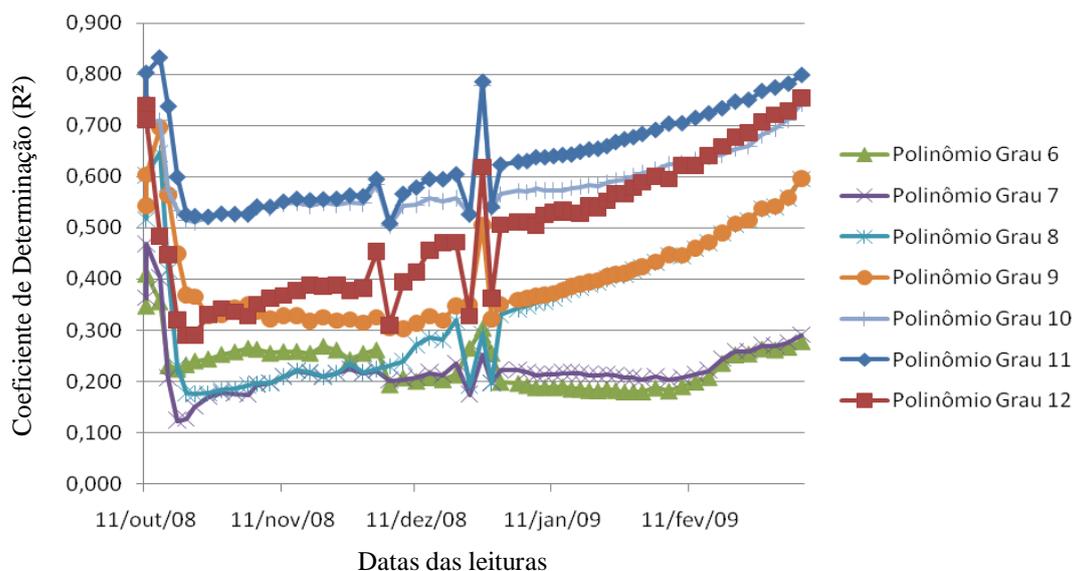


Figura 5.7 – Variação com o tempo dos coeficientes de determinação dos eletrônios de A1 a A17.

Apesar dessa situação, não é desejável trabalhar com polinômios de grande instabilidade numérica (graus elevados). Para conseguir atingir todos os pontos, os polinômios de graus muito altos oscilam muito, não representando a realidade. Como é necessário utilizar o procedimento de derivação, onde cada oscilação representa grandes valores na função derivada, polinômios de graus elevados iriam conduzir a erros substanciais.

Outro aspecto relevante que justifica a não utilização de polinômios de alta instabilidade numérica é o fato de que no caso de ajustes de baixo coeficiente de determinação, as derivações e integrações conduzem a valores muito altos, apresentando variações de ordens de grandeza entre os resultados. Sendo assim, pelo comportamento dos dados analisados, um polinômio de no máximo 6º grau pode ser utilizado para se ter oscilações que não gerem derivadas muito elevadas entre pontos adjacentes, como será mostrado no item referente ao cálculo dos momentos fletores.

### 5.2.2.

#### **Comparação entre a deformada obtida por Análise Sequencial (regressão polinomial) e Incremental**

A análise incremental, além de poder ser utilizada para a obtenção da deformada da face de concreto, serve também como um parâmetro de comparação e validação das curvas obtidas para os pontos de rotação. Na Figura 5.8 são mostrados os resultados obtidos para uma determinada data (8/12/2008), correspondendo à primeira etapa de instalação, dos eletrônives A1 a A17, utilizando um polinômio de 6º grau para o ajuste das rotações, além da curva incremental. O ajuste de um polinômio do 6º grau faz com que a curva representativa das deflexões seja do 7º grau, por ser resultado do processo de integração. Nas Figuras 5.9 e 5.10 as mesmas curvas são apresentadas nas datas de 05/01/2009 e 11/03/2009, respectivamente.

Na Figura 5.11 se pode observar a deformada da seção B obtida pelos dois métodos, para o dia 16/08/2009. Nas Figuras 5.12 e 5.13 são apresentadas as curvas de deflexão obtidas pelos dois métodos para as Seções C e D, respectivamente, nas datas de 17/04/2009 e 15/07/2009.

A comparação foi feita para todas as datas e em todas as seções. Como foi constatada coerência entre as curvas incrementais e seqüenciais (polinomiais), o modelo de polinômio do 6º grau se mostrou eficiente para a determinação das deflexões.

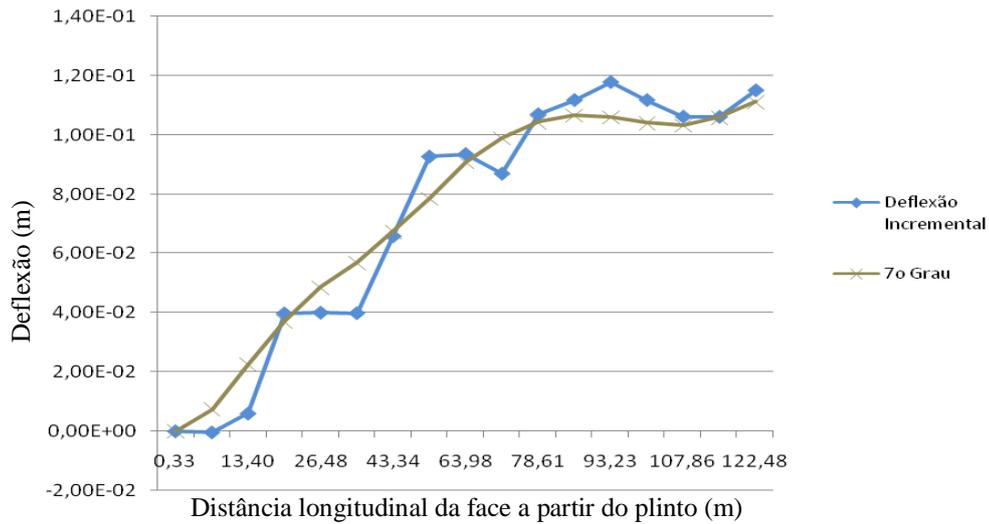


Figura 5.8 – Comparação entre as curvas incremental e polinomial (Seção A - 08/12/2008).

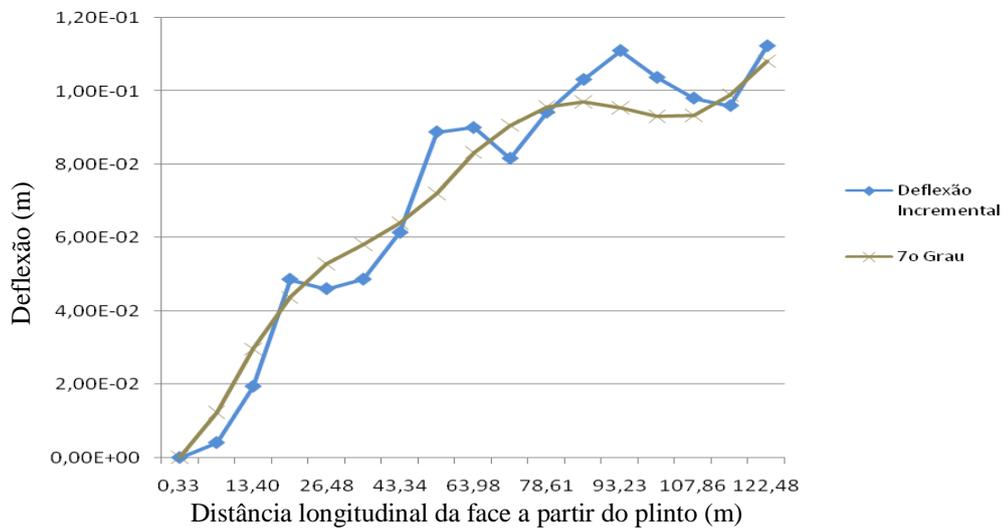


Figura 5.9 - Comparação entre as curvas incremental e polinomial (Seção A - 05/01/2009).

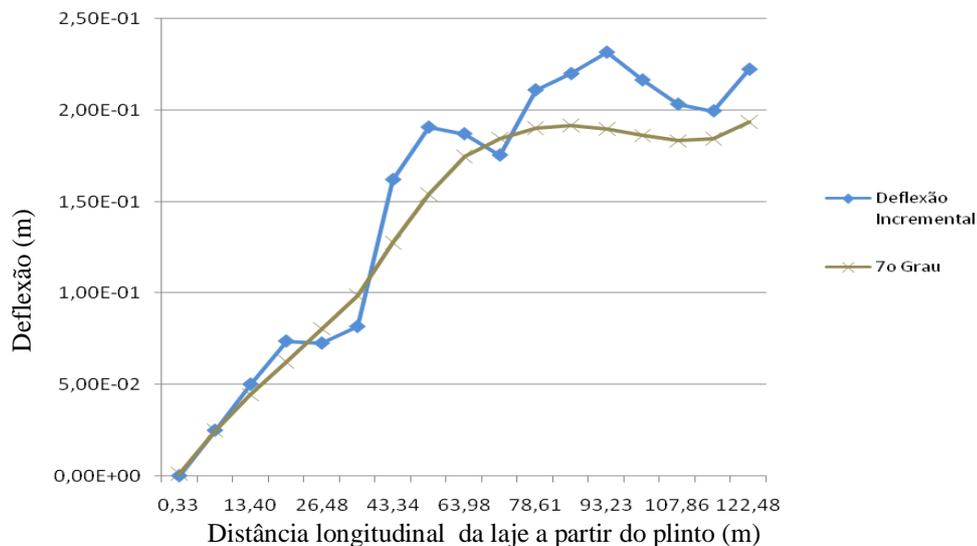


Figura 5.10 - Comparação entre as curvas incremental e polinomial – (Seção A -11/03/2009).

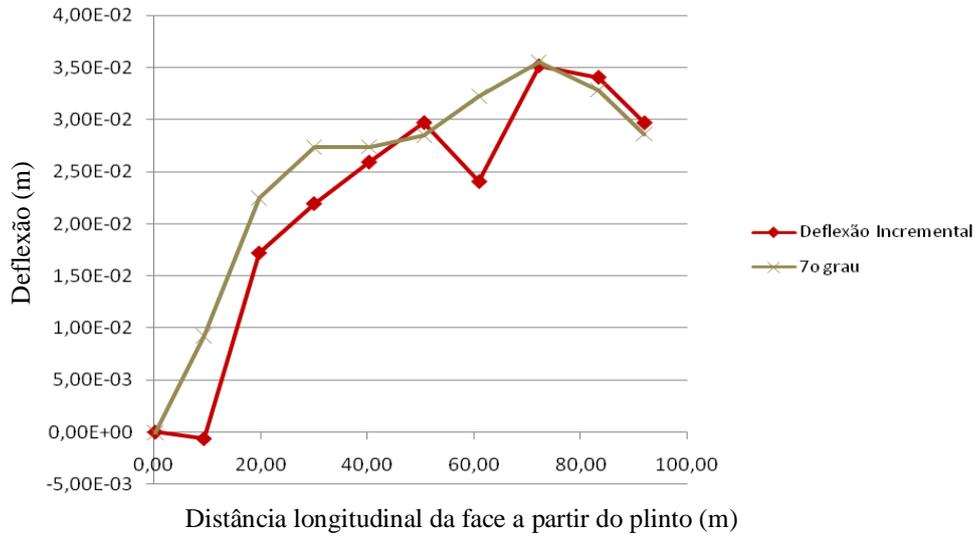


Figura 5.11 – Comparação entre as curvas incremental e polinomial – (Seção B -16/08/2009).

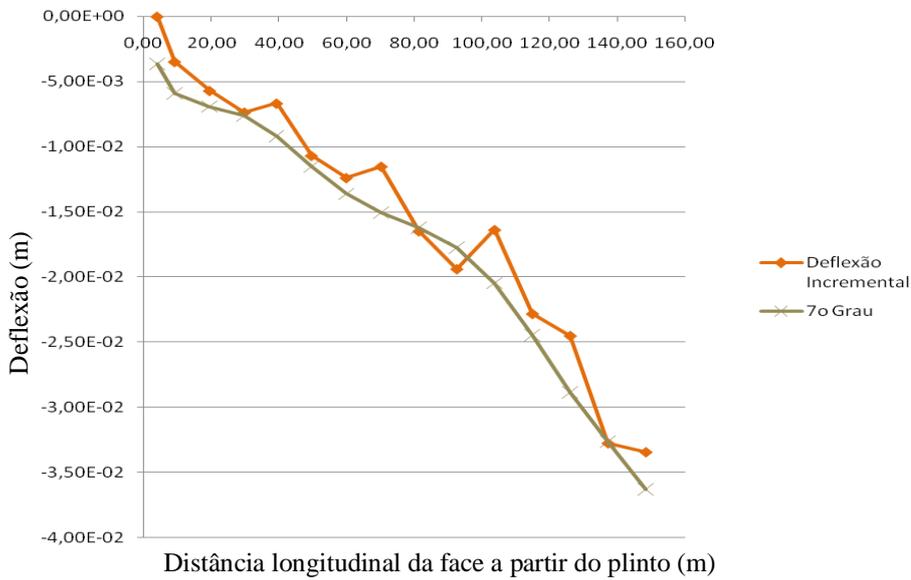


Figura 5.12 – Comparação entre as curvas incremental e polinomial – (Seção C -17/04/2009).

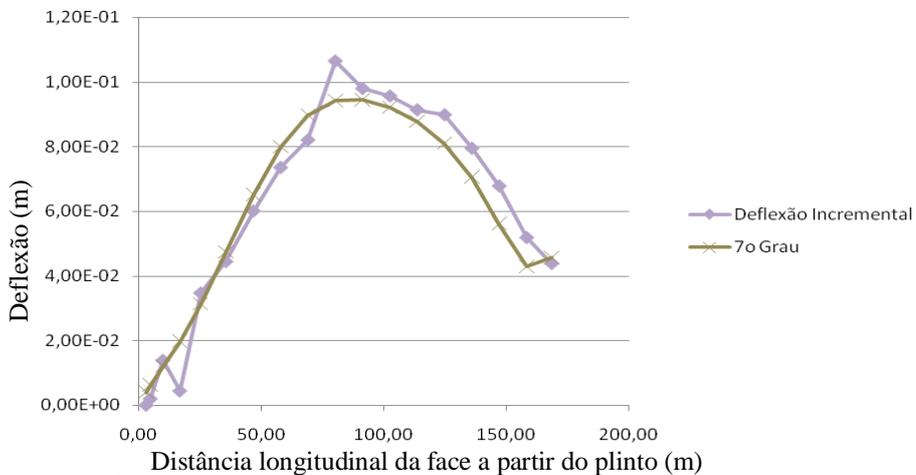


Figura 5.13 – Comparação entre as curvas incremental e polinomial – (Seção D -15/07/2009).

### 5.3. Análise das deflexões da face de concreto da Barragem de Mazar

- **Seção A (1º Estágio de instalação – A1 a A17)**

O 1º Estágio de instalação permitiu a avaliação da variação da deformada da face de concreto na Seção A em função da construção do corpo do enrocamento e da berma a montante. Utilizando um polinômio de 7º grau, oriundo da integração da curva representativa das rotações, se obtiveram as deformadas para as datas de tomada de leitura. Na Figura 5.14 são apresentados, em escala, os resultados das deformadas obtidas pela primeira etapa de instalação dos eletróníveis (A1 a A17).

O procedimento dos cálculos, como descrito anteriormente, foi a integração da função de regressão escrita em código VBA, que possibilitou a automatização dos cálculos.

Como pode ser visto na Figura 5.14, no início havia um movimento para montante, de tração das fibras negativas da laje, devido ao efeito de Poisson pela colocação de material no corpo do enrocamento. Logo que se iniciou a construção da berma a montante, houve um deslocamento da laje no outro sentido, para jusante.

Nota-se haver maior compressibilidade do enrocamento no início da colocação da carga do aterro, através da distância entre as deformadas, ou seja, entre as datas de 14/10/2008 e 08/11/2008 houve um deslocamento máximo da laje superior a 10 cm, entre 08/11/2008 e 02/12/2008 um deslocamento inferior a 10 cm e entre 02/12/2008 e 11/03/2009 um deslocamento inferior a 5 cm. Isso justifica a maior dispersão dos dados, que gerou dificuldades de ajuste polinomial na regressão dos dados iniciais, discutidos no item 5.2.1 (Resultado dos ajustes polinomiais).

Nas Figuras de 5.15 a 5.21 são apresentadas as deflexões calculadas na laje de acordo com as cotas construtivas do corpo do enrocamento e berma a montante, em escala.

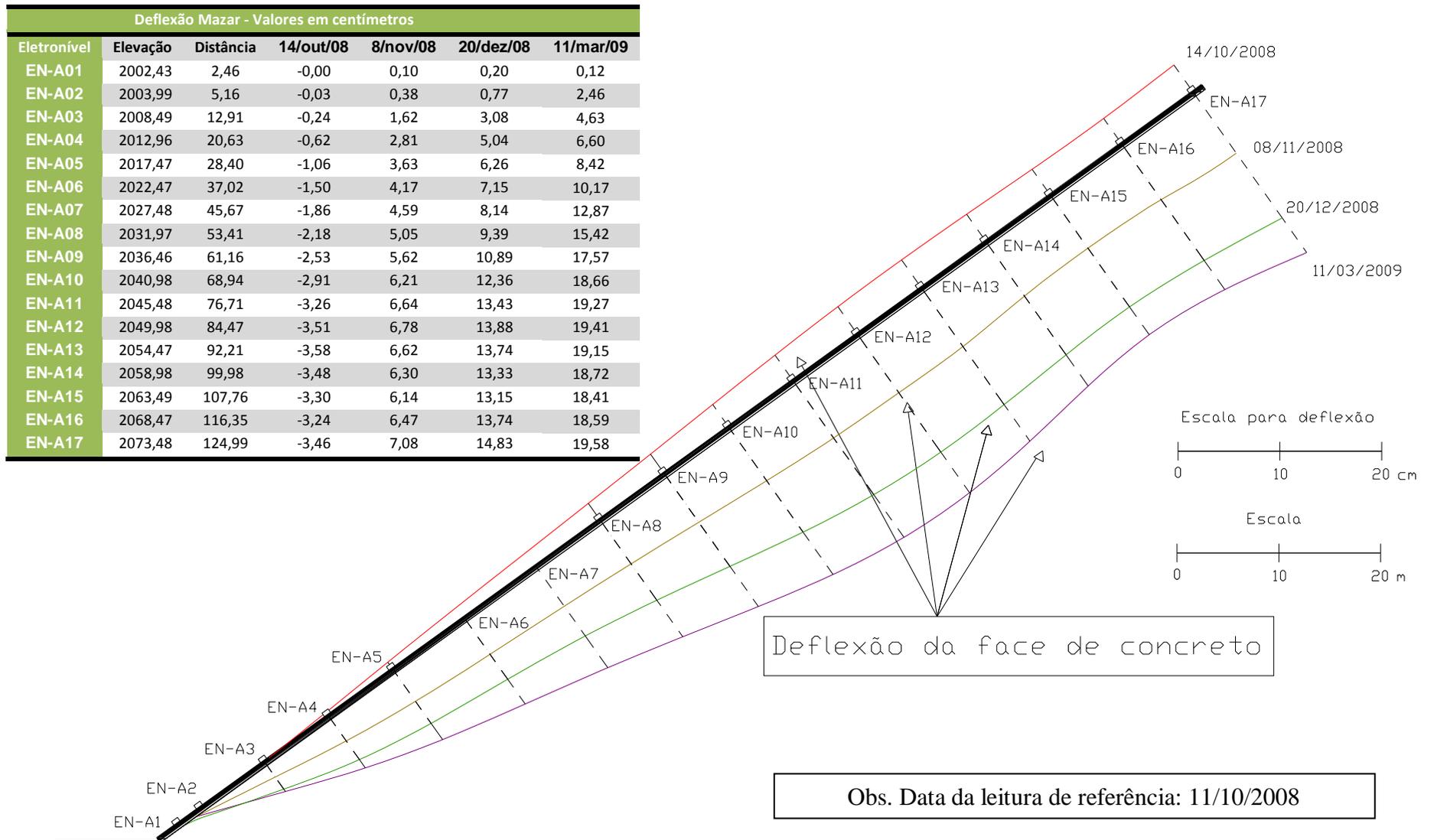


Figura 5.14 – Deflexões observadas na face de concreto durante a construção do corpo do enrocamento e aterro a montante (1º Estágio de Instalação).

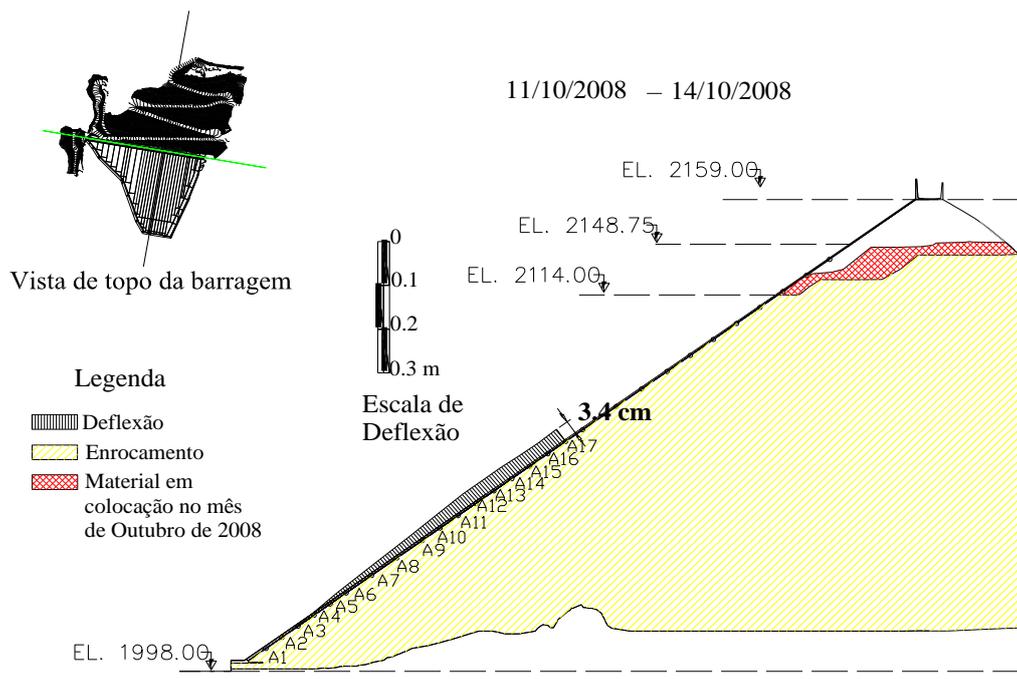


Figura 5.15 – Deflexão calculada na Seção A durante a construção do corpo da barragem (14/10/2008).

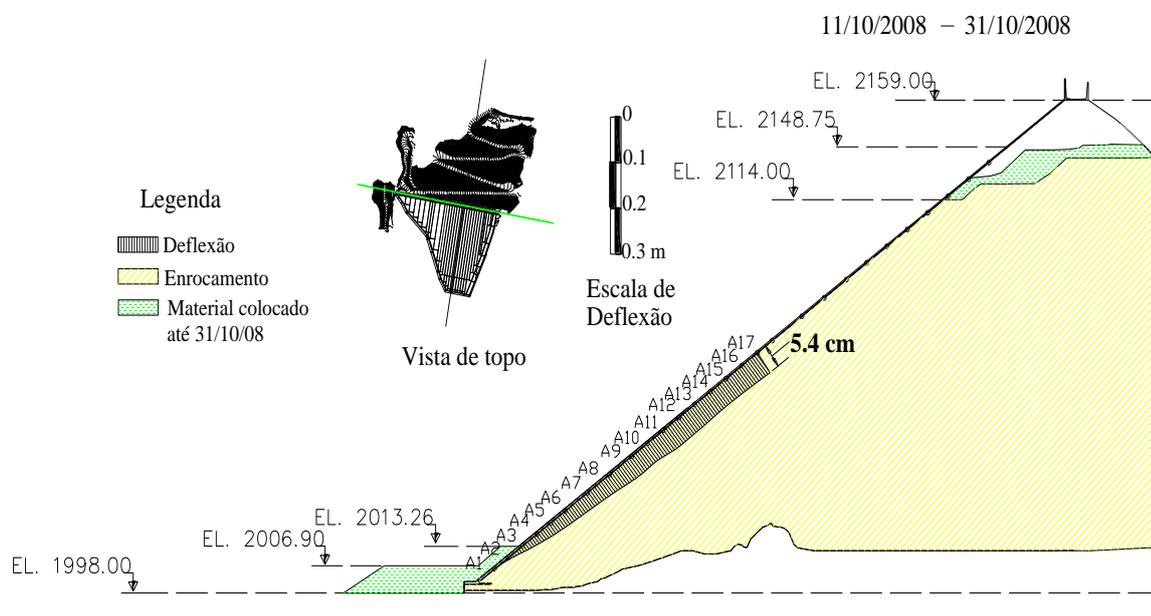


Figura 5.16 – Deflexão calculada na Seção A durante a construção do corpo da barragem e início da construção da berma a montante (31/10/2008).

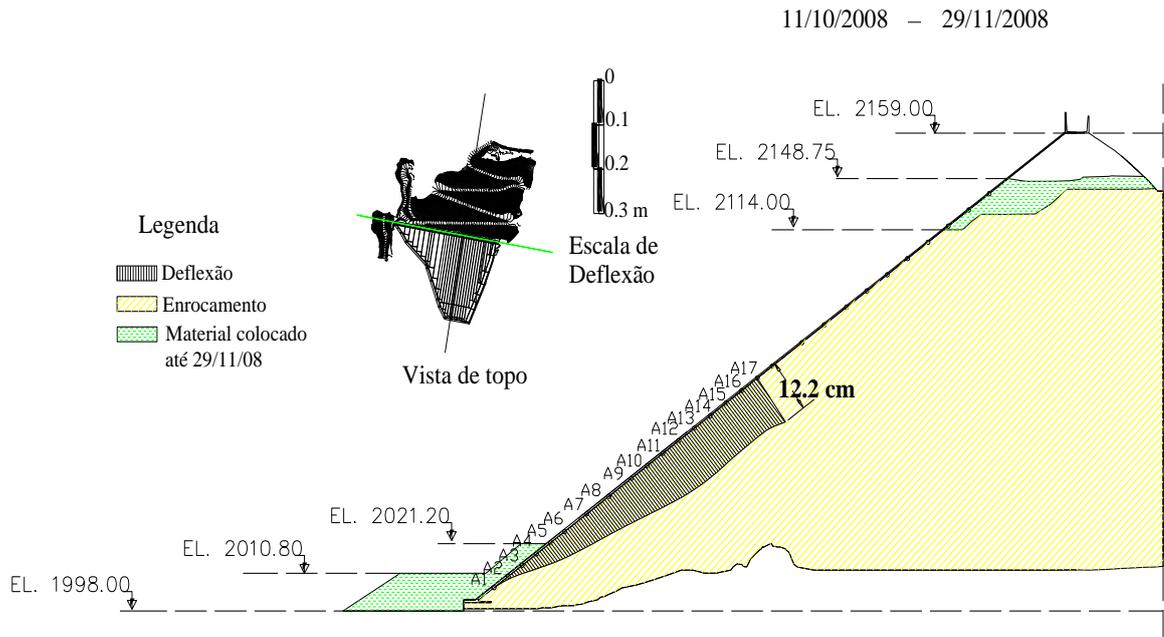


Figura 5.17 – Deflexão calculada na Seção A durante a construção do corpo da barragem e da berma a montante (29/11/2008).

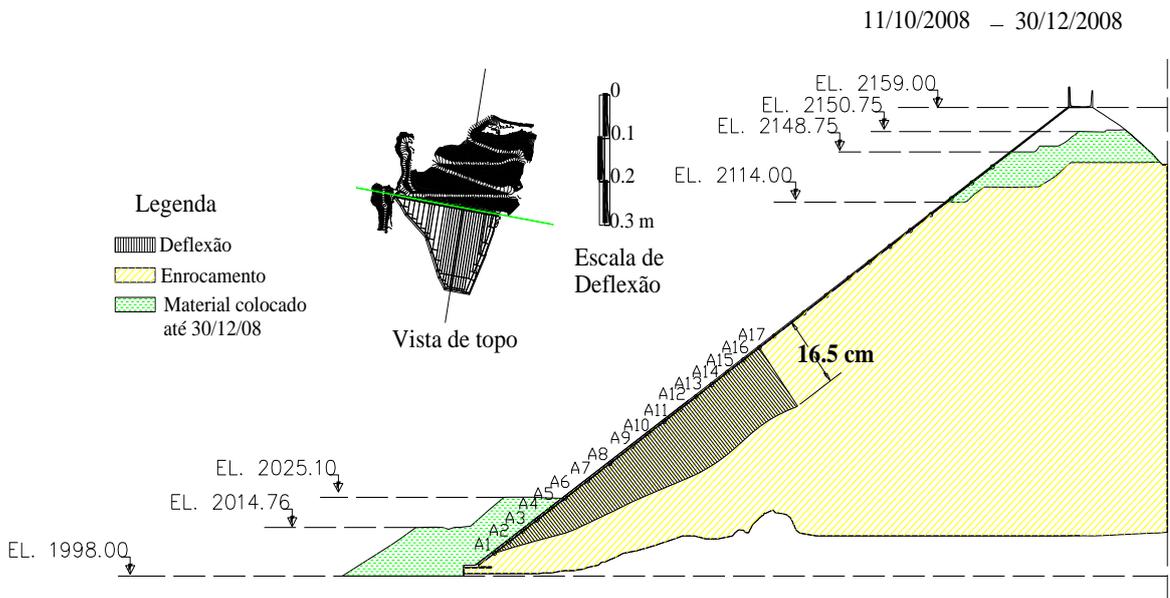


Figura 5.18 – Deflexão calculada na Seção A durante a construção do corpo da barragem e da berma a montante (30/12/2008).

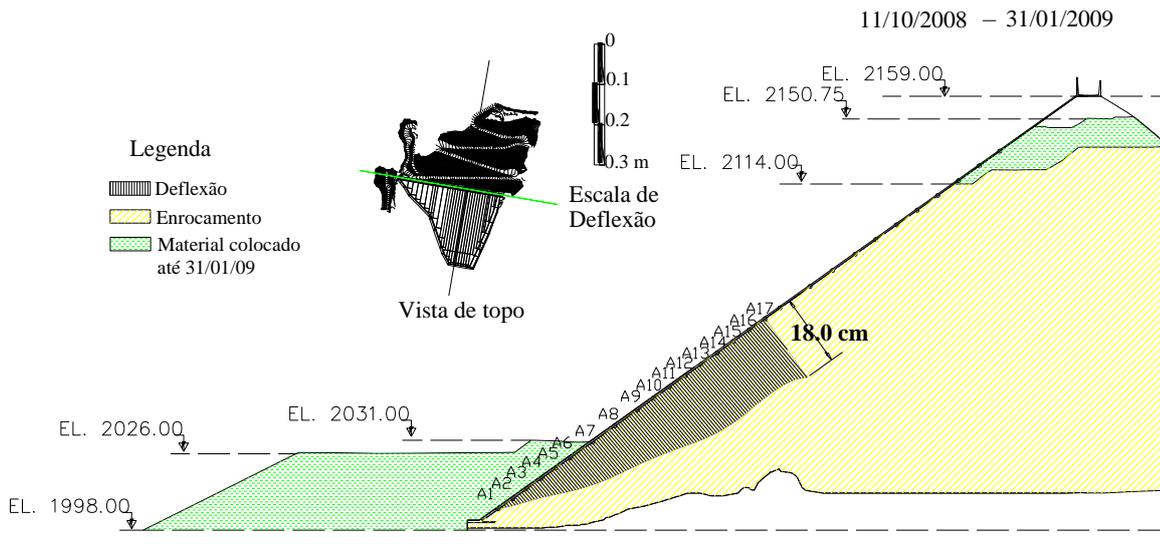


Figura 5.19 – Deflexão calculada na Seção A durante a construção do corpo da barragem e da berma a montante (31/01/2009).

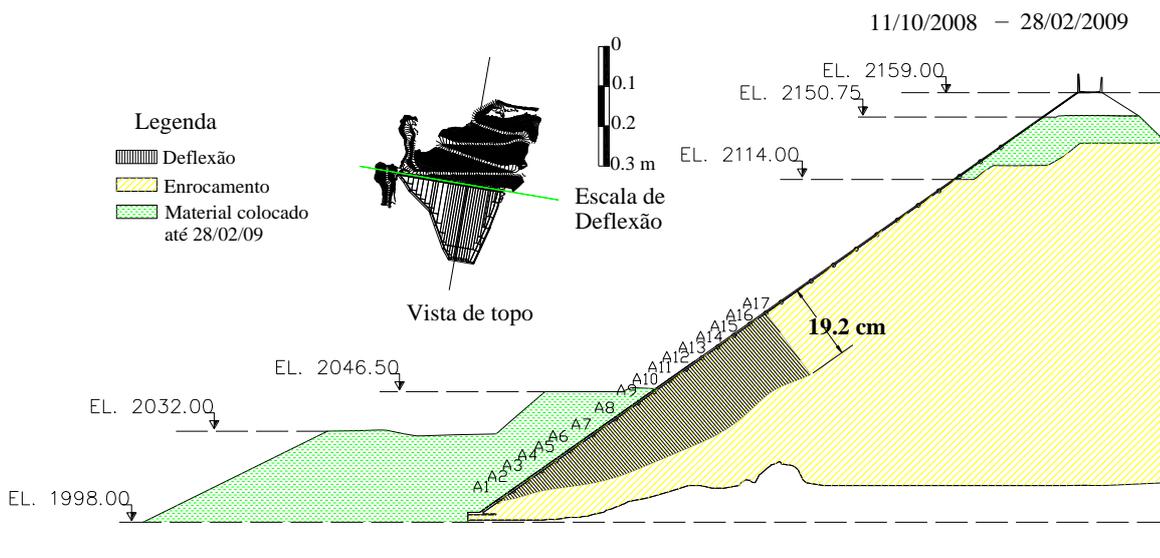


Figura 5.20 – Deflexão calculada na Seção A durante a construção do corpo da barragem e da berma a montante (28/02/2009).

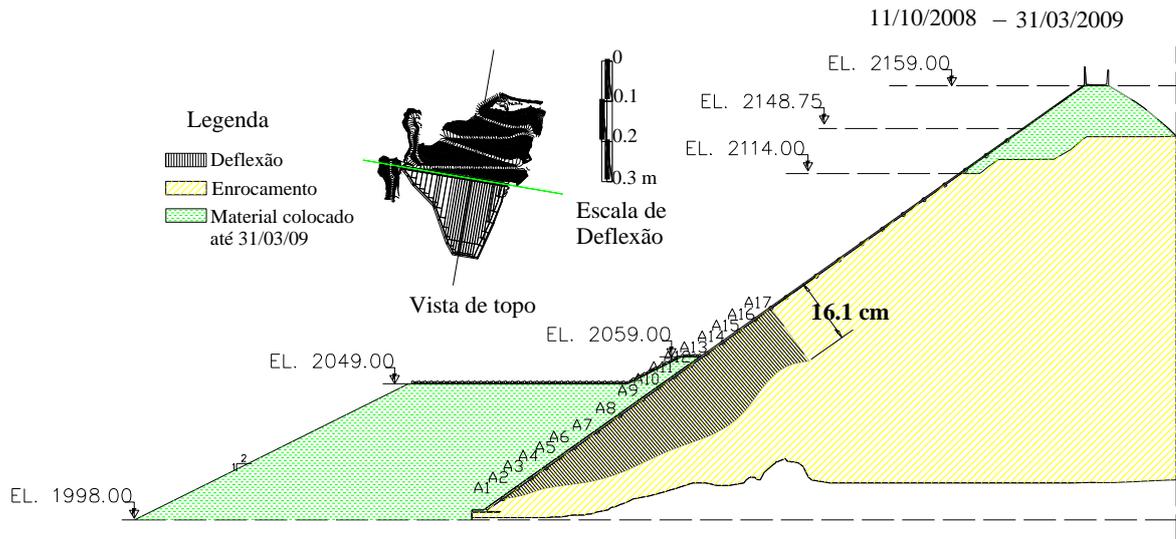


Figura 5.21 – Deflexão calculada na Seção A imediatamente após o término da construção do corpo da barragem e da berma a montante (31/03/2009).

Um fato que chama a atenção, discutido por Rocha Filho e Saboya (2008), é a influência das características topográficas da fundação no comportamento da face de concreto. Na Figura 5.21 se nota que a deformada da face, afetada pela carga da berma a montante, acompanha a geometria da fundação da Seção A. A protuberância existente na fundação se reflete na laje, correspondendo a uma região de momentos fletores significativos, como será discutido no item 5.4 (Análise dos Momentos Fletores).

- **Seção A (2º Estágio de instalação – A17 a A28)**

Para a compatibilização das leituras nas segunda e terceira etapas de instalação, foi considerada a hipótese de rotação nula nos novos trechos instrumentados, já que a face ainda não havia sido construída. Dessa forma o deslocamento do eletrônível A17 foi tomado como o deslocamento inicial do trecho das novas instalações dos eletrôníveis.

Na Figura 5.22 podem ser vistas as curvas antes e após a compatibilização, onde a deformada correspondente ao período de 14/10/2008 (instalação da primeira etapa) a 11/03/2009 (instalação da segunda etapa) foi somada à deformada correspondente à segunda etapa de instalação (11/03/2009 a 03/05/2009), seguindo a hipótese mencionada.

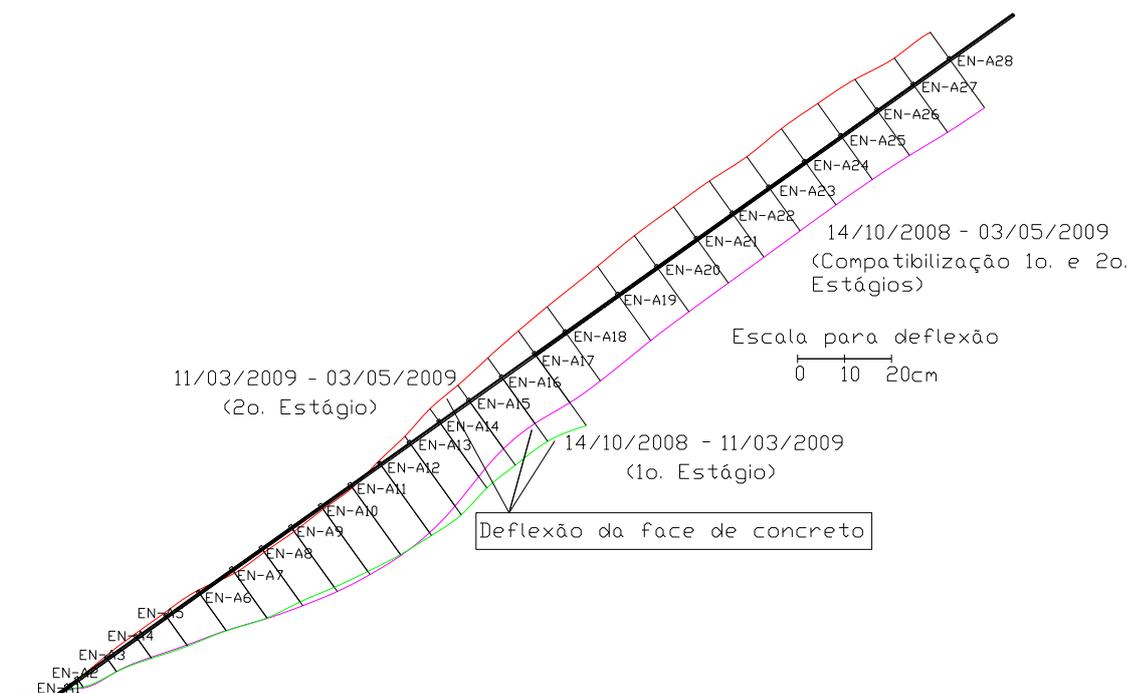


Figura 5.22 – Deflexões da face de concreto e compatibilização de leituras de diferentes estágios de instalação dos eletrônives.

Na Figura 5.23 são apresentadas as deformadas calculadas em diferentes datas até a instalação do 3º estágio de instalação (12/07/2009) para os eletrônives de A1 a A28. Nota-se que os eletrônives indicaram uma pequena variação nas deflexões da face entre os meses de maio e junho, que no mês seguinte apresentou deslocamento em torno de 20 cm.

Nas Figuras 5.22 e 5.23 pode ser observada a deformada correspondente à maior variação das leituras do eletrônível A14 (03/05/2009 – Figura 5.1), onde se nota que a sua rotação gera inflexões na face de concreto nas suas adjacências, que correspondem à tração das fibras positivas (em cota inferior) e negativas (em cota superior).

Essa inclinação elevada representa um ponto de máximo da curva de rotações (1ª derivada), e um ponto de inflexão na curva representativa dos momentos fletores (segunda derivada), como será analisado no item subsequente.

- **Seção A (3º Estágio de instalação - A28 a A31)**

Através da Figura 5.24 fica claro que nos meses seguintes há uma diminuição na deflexão para jusante (Julho) e posterior deflexão para montante (mês de Agosto), de onde se pode inferir que os esforços construtivos após o término da execução da berma a montante não agravam as deflexões impostas pelo seu carregamento. Além disso, a partir de meados do mês de Agosto até o final do mês de Setembro as deflexões variaram muito pouco (em torno de 0,5%).

| Deflexões da Seção A (unidade das deflexões - cm) |          |           |          |          |           |
|---|----------|-----------|----------|----------|-----------|
| Inst.   | Cota (m) | Dist. (m) | 3/mai/09 | 5/jun/09 | 12/jul/09 |
| EN-A01  | 2001,00  | 0,33      | 0,12     | 0,12     | 0,15      |
| EN-A02  | 2004,80  | 6,86      | 2,57     | 2,52     | 3,04      |
| EN-A03  | 2008,60  | 13,40     | 4,85     | 4,71     | 5,72      |
| EN-A04  | 2012,40  | 19,94     | 6,95     | 6,65     | 8,14      |
| EN-A05  | 2016,20  | 26,48     | 8,91     | 8,42     | 10,38     |
| EN-A06  | 2020,00  | 33,02     | 10,79    | 10,08    | 12,52     |
| EN-A07  | 2026,00  | 43,34     | 13,64    | 12,59    | 15,83     |
| EN-A08  | 2032,00  | 53,66     | 16,20    | 14,93    | 19,05     |
| EN-A09  | 2038,00  | 63,98     | 18,12    | 16,82    | 21,94     |
| EN-A10  | 2042,25  | 71,30     | 18,86    | 17,67    | 23,56     |
| EN-A11  | 2046,50  | 78,61     | 18,94    | 17,99    | 24,70     |
| EN-A12  | 2050,75  | 85,92     | 18,36    | 17,72    | 25,29     |
| EN-A13  | 2055,00  | 93,23     | 17,22    | 16,95    | 25,41     |
| EN-A14  | 2059,25  | 100,54    | 15,74    | 15,87    | 25,22     |
| EN-A15  | 2063,50  | 107,86    | 14,29    | 14,81    | 25,04     |
| EN-A16  | 2067,75  | 115,17    | 13,31    | 14,16    | 25,22     |
| EN-A17  | 2072,00  | 122,48    | 13,24    | 14,31    | 26,16     |
| EN-A18  | 2076,00  | 129,36    | 13,24    | 14,31    | 26,16     |
| EN-A19  | 2084,00  | 143,13    | 12,40    | 13,58    | 26,09     |
| EN-A20  | 2090,00  | 153,45    | 11,05    | 12,05    | 25,68     |
| EN-A21  | 2096,00  | 163,77    | 10,41    | 10,94    | 25,20     |
| EN-A22  | 2101,50  | 173,23    | 10,12    | 9,96     | 24,70     |
| EN-A23  | 2107,00  | 182,70    | 10,13    | 9,26     | 24,35     |
| EN-A24  | 2112,50  | 192,16    | 10,33    | 8,81     | 24,22     |
| EN-A25  | 2118,00  | 201,62    | 10,64    | 8,63     | 24,40     |
| EN-A26  | 2123,50  | 211,08    | 10,97    | 8,73     | 24,95     |
| EN-A27  | 2129,00  | 220,55    | 11,23    | 9,03     | 25,82     |
| EN-A28  | 2134,50  | 230,01    | 11,41    | 9,33     | 26,82     |

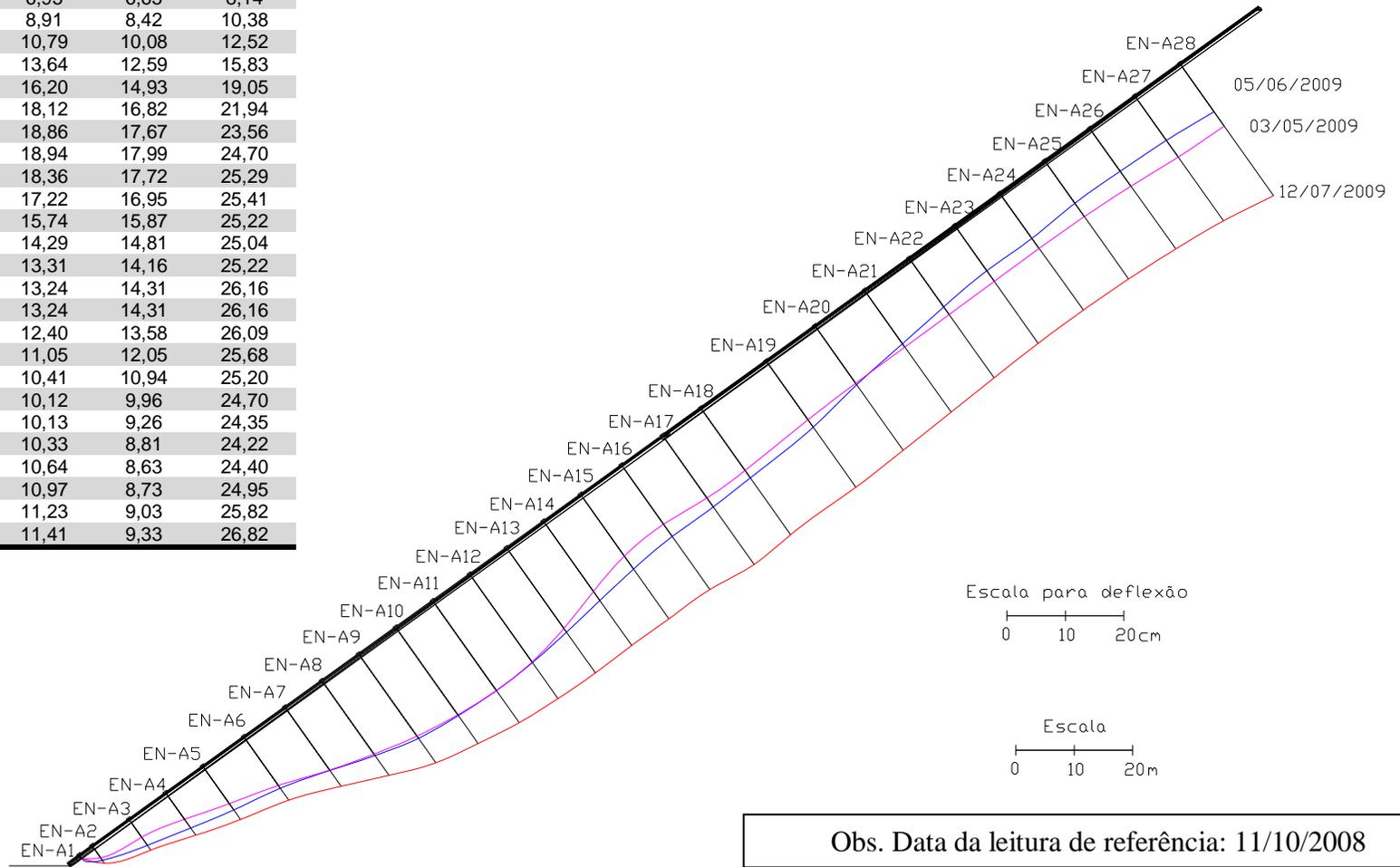


Figura 5.23 – Deflexões observadas na face de concreto no 2º estágio de instalação (Seção A).

| Deflexões da Seção A (unidade das deflexões - cm) |          |           |           |           |           |
|---|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Inst.   | Cota (m) | Dist. (m) | 14/jul/09 | 31/jul/09 | 27/ago/09 |
| EN-A01  | 2001,00  | 0,33      | 0,15      | 0,15      | 0,13      |
| EN-A02  | 2004,80  | 6,86      | 3,02      | 3,11      | 2,64      |
| EN-A03  | 2008,60  | 13,40     | 5,68      | 5,84      | 4,93      |
| EN-A04  | 2012,40  | 19,94     | 8,08      | 8,33      | 6,98      |
| EN-A05  | 2016,20  | 26,48     | 10,29     | 10,61     | 8,85      |
| EN-A06  | 2020,00  | 33,02     | 12,39     | 12,80     | 10,64     |
| EN-A07  | 2026,00  | 43,34     | 15,64     | 16,19     | 13,41     |
| EN-A08  | 2032,00  | 53,66     | 18,81     | 19,50     | 16,15     |
| EN-A09  | 2038,00  | 63,98     | 21,65     | 22,49     | 18,60     |
| EN-A10  | 2042,25  | 71,30     | 23,25     | 24,20     | 19,94     |
| EN-A11  | 2046,50  | 78,61     | 24,37     | 25,43     | 20,80     |
| EN-A12  | 2050,75  | 85,92     | 24,96     | 26,13     | 21,15     |
| EN-A13  | 2055,00  | 93,23     | 25,08     | 26,36     | 21,02     |
| EN-A14  | 2059,25  | 100,54    | 24,90     | 26,29     | 20,59     |
| EN-A15  | 2063,50  | 107,86    | 24,73     | 26,21     | 20,15     |
| EN-A16  | 2067,75  | 115,17    | 24,93     | 26,50     | 20,09     |
| EN-A17  | 2072,00  | 122,48    | 25,89     | 27,54     | 20,77     |
| EN-A18  | 2076,00  | 129,36    | 25,91     | 27,62     | 20,52     |
| EN-A19  | 2084,00  | 143,13    | 25,87     | 27,69     | 19,92     |
| EN-A20  | 2090,00  | 153,45    | 25,46     | 27,35     | 19,10     |
| EN-A21  | 2096,00  | 163,77    | 24,98     | 26,94     | 18,22     |
| EN-A22  | 2101,50  | 173,23    | 24,48     | 26,50     | 17,39     |
| EN-A23  | 2107,00  | 182,70    | 24,13     | 26,23     | 16,74     |
| EN-A24  | 2112,50  | 192,16    | 24,00     | 26,20     | 16,38     |
| EN-A25  | 2118,00  | 201,62    | 24,19     | 26,53     | 16,41     |
| EN-A26  | 2123,50  | 211,08    | 24,77     | 27,27     | 16,89     |
| EN-A27  | 2129,00  | 220,55    | 25,69     | 28,37     | 17,74     |
| EN-A28  | 2134,50  | 230,01    | 26,74     | 29,61     | 18,74     |
| EN-A29  | 2140,50  | 240,33    | 26,80     | 29,82     | 18,65     |
| EN-A30  | 2146,50  | 250,65    | 26,81     | 29,85     | 18,28     |
| EN-A31  | 2152,50  | 260,98    | 26,68     | 29,49     | 17,36     |

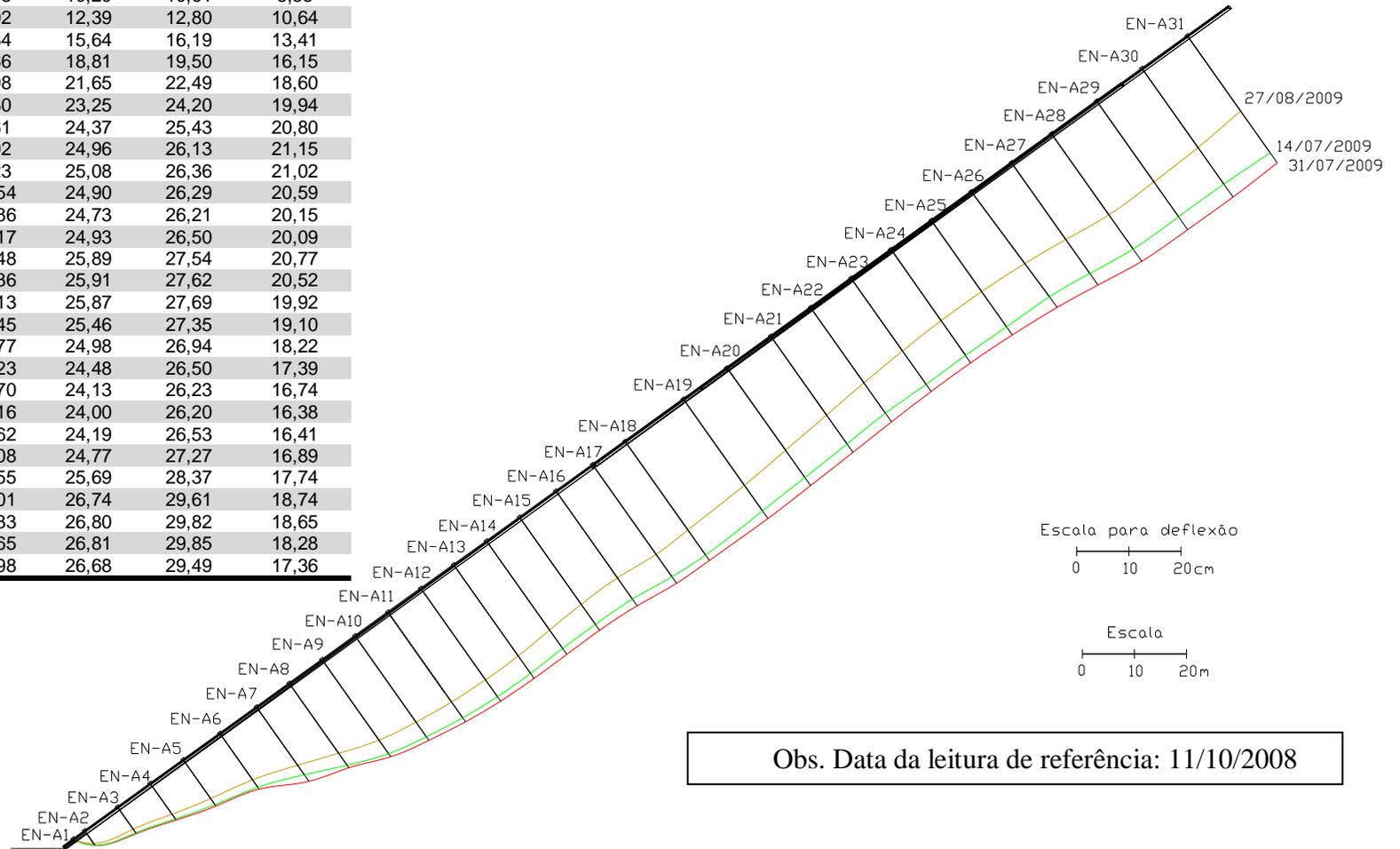


Figura 5.24 – Deflexões observadas na face de concreto no 3º estágio de instalação (Seção A).

- **Seção A (4º Estágio de instalação - A32 – Seção Completa)**

Na Figura 5.25 é apresentado o corte da seção da barragem com as deflexões obtidas pela última leitura, do dia 28/09/2009. Já na Figura 5.26 é mostrado o corte da face da Seção A com a deformada compatibilizada para todas as etapas de instalação, portanto contendo informações dos eletrônives de A1 a A32 (seção completa), desde a instalação inicial do dia 11/10/2008 até os dias 28/08/2009 (data da instalação do EN-A32), 08/09/2009 e 28/09/2009.

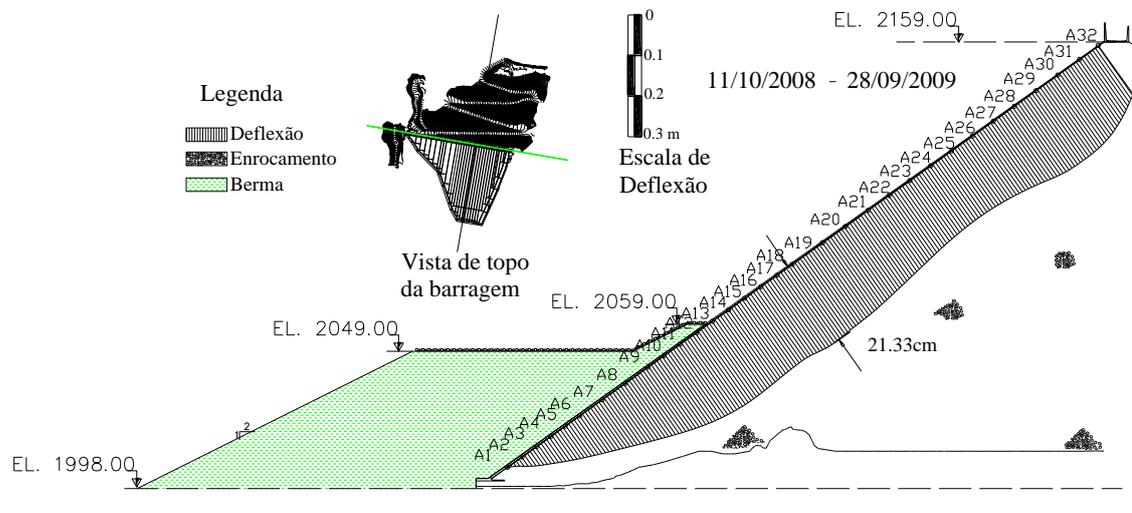


Figura 5.25 – Deflexões calculadas na Seção A em 28/09/2009.

Finalmente, na Figura 5.26 podem ser vistas as deflexões em todos os estágios de instalação dos eletrônives até a leitura mais recente. Nota-se haver uma clara movimentação para jusante devido à construção da berma a montante, seguido de uma movimentação para montante após o seu término e posterior estabilização das deflexões, como esperado pela análise do desempenho dos eletrônives em função do tempo, com clara tendência de estabilização das leituras.

No Apêndice C são apresentados os resultados das leituras, sem compatibilização, dos eletrônives de A1 a A28, desde a sua instalação, do dia 15/03/2009 à última leitura, do dia 28/09/2009.

| Deflexões da Seção A (unidade das deflexões - cm) |          |           |           |          |           |
|---|----------|-----------|-----------|----------|-----------|
| Inst.   | Cota (m) | Dist. (m) | 28/ago/09 | 8/set/09 | 28/set/09 |
| EN-A01  | 2001,00  | 0,33      | 0,13      | 0,14     | 0,14      |
| EN-A02  | 2004,80  | 6,86      | 2,63      | 2,78     | 2,84      |
| EN-A03  | 2008,60  | 13,40     | 4,91      | 5,19     | 5,29      |
| EN-A04  | 2012,40  | 19,94     | 6,92      | 7,30     | 7,44      |
| EN-A05  | 2016,20  | 26,48     | 8,73      | 9,18     | 9,36      |
| EN-A06  | 2020,00  | 33,02     | 10,44     | 10,92    | 11,14     |
| EN-A07  | 2026,00  | 43,34     | 13,08     | 13,58    | 13,85     |
| EN-A08  | 2032,00  | 53,66     | 15,68     | 16,18    | 16,48     |
| EN-A09  | 2038,00  | 63,98     | 18,02     | 18,50    | 18,84     |
| EN-A10  | 2042,25  | 71,30     | 19,31     | 19,79    | 20,14     |
| EN-A11  | 2046,50  | 78,61     | 20,15     | 20,64    | 21,02     |
| EN-A12  | 2050,75  | 85,92     | 20,50     | 21,01    | 21,42     |
| EN-A13  | 2055,00  | 93,23     | 20,40     | 20,95    | 21,38     |
| EN-A14  | 2059,25  | 100,54    | 20,01     | 20,61    | 21,08     |
| EN-A15  | 2063,50  | 107,86    | 19,63     | 20,29    | 20,79     |
| EN-A16  | 2067,75  | 115,17    | 19,62     | 20,33    | 20,88     |
| EN-A17  | 2072,00  | 122,48    | 20,35     | 21,11    | 21,71     |
| EN-A18  | 2076,00  | 129,36    | 20,13     | 20,92    | 21,58     |
| EN-A19  | 2084,00  | 143,13    | 19,53     | 20,35    | 21,14     |
| EN-A20  | 2090,00  | 153,45    | 18,65     | 19,44    | 20,33     |
| EN-A21  | 2096,00  | 163,77    | 17,66     | 18,38    | 19,39     |
| EN-A22  | 2101,50  | 173,23    | 16,70     | 17,33    | 18,46     |
| EN-A23  | 2107,00  | 182,70    | 15,93     | 16,46    | 17,72     |
| EN-A24  | 2112,50  | 192,16    | 15,47     | 15,92    | 17,30     |
| EN-A25  | 2118,00  | 201,62    | 15,45     | 15,87    | 17,38     |
| EN-A26  | 2123,50  | 211,08    | 15,95     | 16,40    | 18,02     |
| EN-A27  | 2129,00  | 220,55    | 16,92     | 17,45    | 19,16     |
| EN-A28  | 2134,50  | 230,01    | 18,08     | 18,75    | 20,53     |
| EN-A29  | 2140,50  | 240,33    | 18,15     | 18,93    | 20,74     |
| EN-A30  | 2146,50  | 250,65    | 17,75     | 18,45    | 20,21     |
| EN-A31  | 2152,50  | 260,98    | 16,28     | 16,44    | 18,06     |
| EN-A32  | 2158,50  | 271,30    | 14,74     | 13,47    | 14,80     |

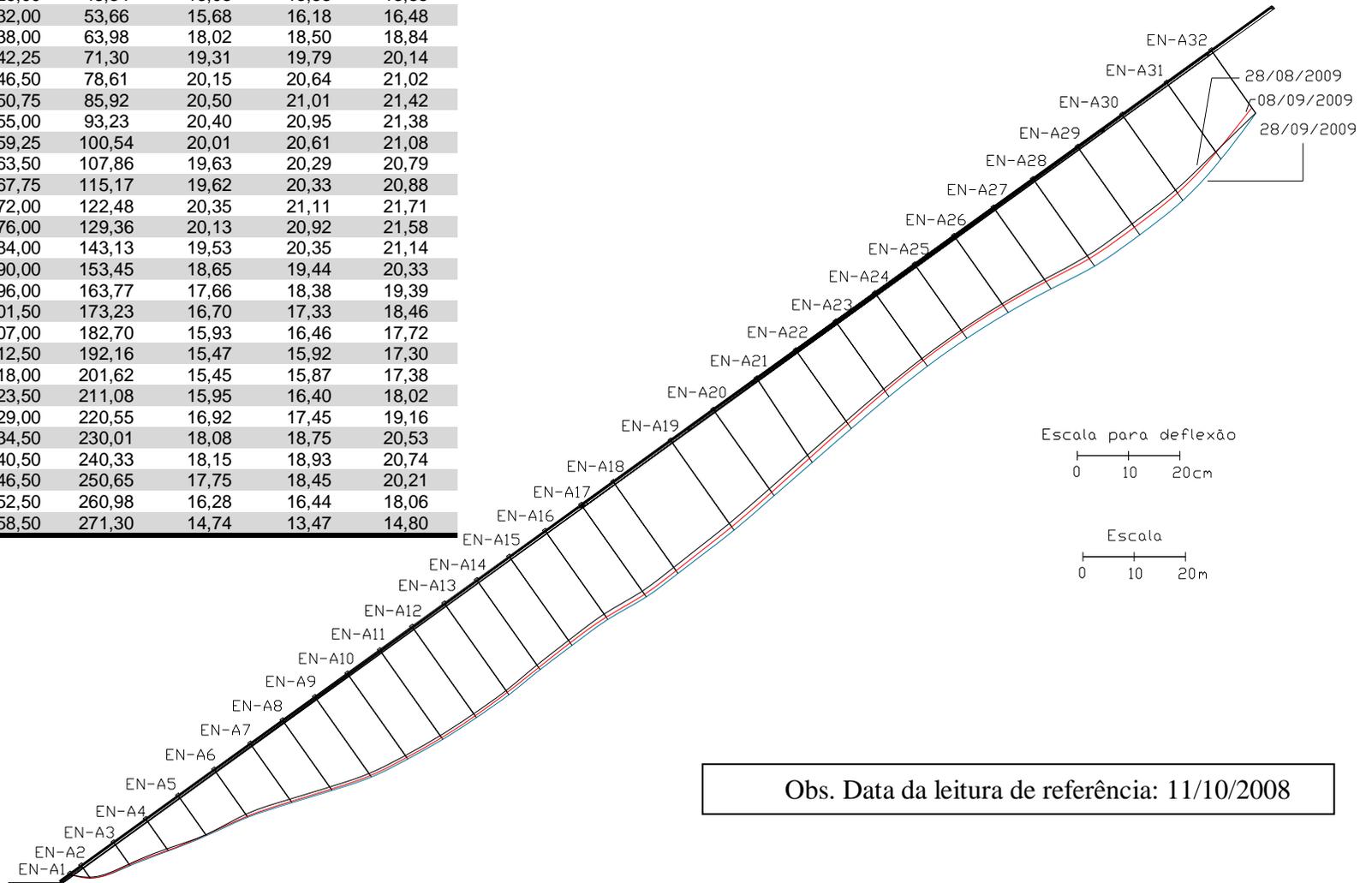


Figura 5.26 – Deflexões observadas na face de concreto no 4º estágio de instalação (Seção A).

| Deflexões da Seção A (unidade das deflexões - cm) |          |           |           |          |           |           |
|---|----------|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|
| Inst.   | Cota (m) | Dist. (m) | 11/mar/09 | 3/mai/09 | 27/ago/09 | 28/set/09 |
| EN-A01  | 2001,00  | 0,33      | 0,12      | 0,12     | 0,13      | 0,14      |
| EN-A02  | 2004,80  | 6,86      | 2,46      | 2,57     | 2,64      | 2,84      |
| EN-A03  | 2008,60  | 13,40     | 4,63      | 4,85     | 4,93      | 5,29      |
| EN-A04  | 2012,40  | 19,94     | 6,60      | 6,95     | 6,98      | 7,44      |
| EN-A05  | 2016,20  | 26,48     | 8,42      | 8,91     | 8,85      | 9,36      |
| EN-A06  | 2020,00  | 33,02     | 10,17     | 10,79    | 10,64     | 11,14     |
| EN-A07  | 2026,00  | 43,34     | 12,87     | 13,64    | 13,41     | 13,85     |
| EN-A08  | 2032,00  | 53,66     | 15,42     | 16,20    | 16,15     | 16,48     |
| EN-A09  | 2038,00  | 63,98     | 17,57     | 18,12    | 18,60     | 18,84     |
| EN-A10  | 2042,25  | 71,30     | 18,66     | 18,86    | 19,94     | 20,14     |
| EN-A11  | 2046,50  | 78,61     | 19,27     | 18,94    | 20,80     | 21,02     |
| EN-A12  | 2050,75  | 85,92     | 19,41     | 18,36    | 21,15     | 21,42     |
| EN-A13  | 2055,00  | 93,23     | 19,15     | 17,22    | 21,02     | 21,38     |
| EN-A14  | 2059,25  | 100,54    | 18,72     | 15,74    | 20,59     | 21,08     |
| EN-A15  | 2063,50  | 107,86    | 18,41     | 14,29    | 20,15     | 20,79     |
| EN-A16  | 2067,75  | 115,17    | 18,59     | 13,31    | 20,09     | 20,88     |
| EN-A17  | 2072,00  | 122,48    | 19,58     | 13,24    | 20,77     | 21,71     |
| EN-A18  | 2076,00  | 129,36    |           | 13,24    | 20,52     | 21,58     |
| EN-A19  | 2084,00  | 143,13    |           | 12,40    | 19,92     | 21,14     |
| EN-A20  | 2090,00  | 153,45    |           | 11,05    | 19,10     | 20,33     |
| EN-A21  | 2096,00  | 163,77    |           | 10,41    | 18,22     | 19,39     |
| EN-A22  | 2101,50  | 173,23    |           | 10,12    | 17,39     | 18,46     |
| EN-A23  | 2107,00  | 182,70    |           | 10,13    | 16,74     | 17,72     |
| EN-A24  | 2112,50  | 192,16    |           | 10,33    | 16,38     | 17,30     |
| EN-A25  | 2118,00  | 201,62    |           | 10,64    | 16,41     | 17,38     |
| EN-A26  | 2123,50  | 211,08    |           | 10,97    | 16,89     | 18,02     |
| EN-A27  | 2129,00  | 220,55    |           | 11,23    | 17,74     | 19,16     |
| EN-A28  | 2134,50  | 230,01    |           | 11,41    | 18,74     | 20,53     |
| EN-A29  | 2140,50  | 240,33    |           |          | 18,65     | 20,74     |
| EN-A30  | 2146,50  | 250,65    |           |          | 18,28     | 20,21     |
| EN-A31  | 2152,50  | 260,98    |           |          | 17,36     | 18,06     |
| EN-A32  | 2158,50  | 271,30    |           |          |           | 14,80     |

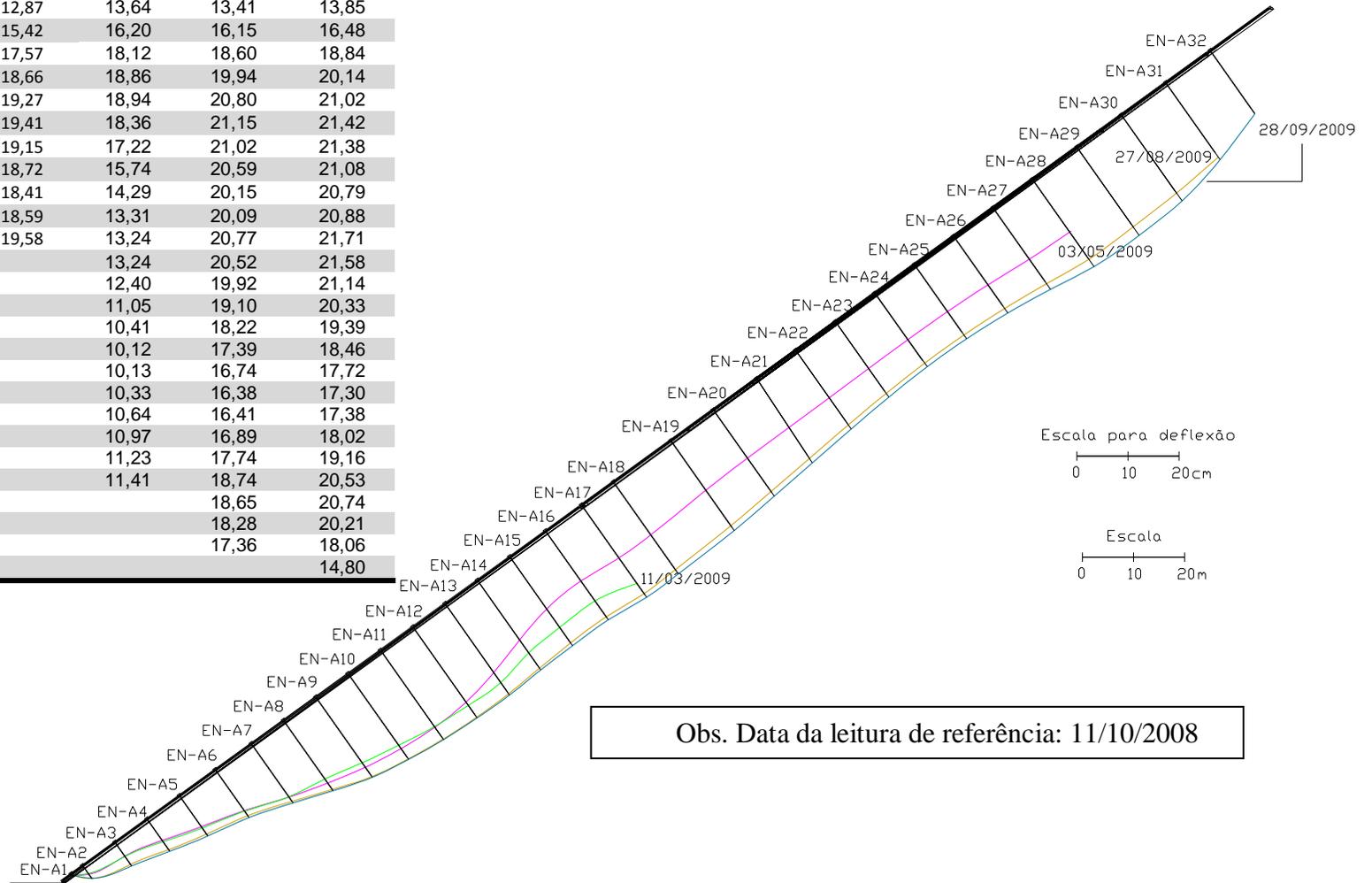


Figura 5.27 – Deflexões observadas na Seção A da face de concreto em todos os estágios de instalação.

- **Seção C (1º Estágio de Instalação – C1 a C15)**

As deflexões obtidas na Seção C não foram acentuadas nas proximidades do plinto, em função da sua proximidade com a ombreira da barragem e conseqüente geometria de fundação, em corte, com inclinação acentuada. Sendo assim, existe um menor volume de enrocamento entre a face de concreto e a fundação, portanto menores efeitos de acomodação.

Na Figura 5.28 é apresentada a vista em corte da seção C e a correspondente deflexão na data de 03/05/2009.

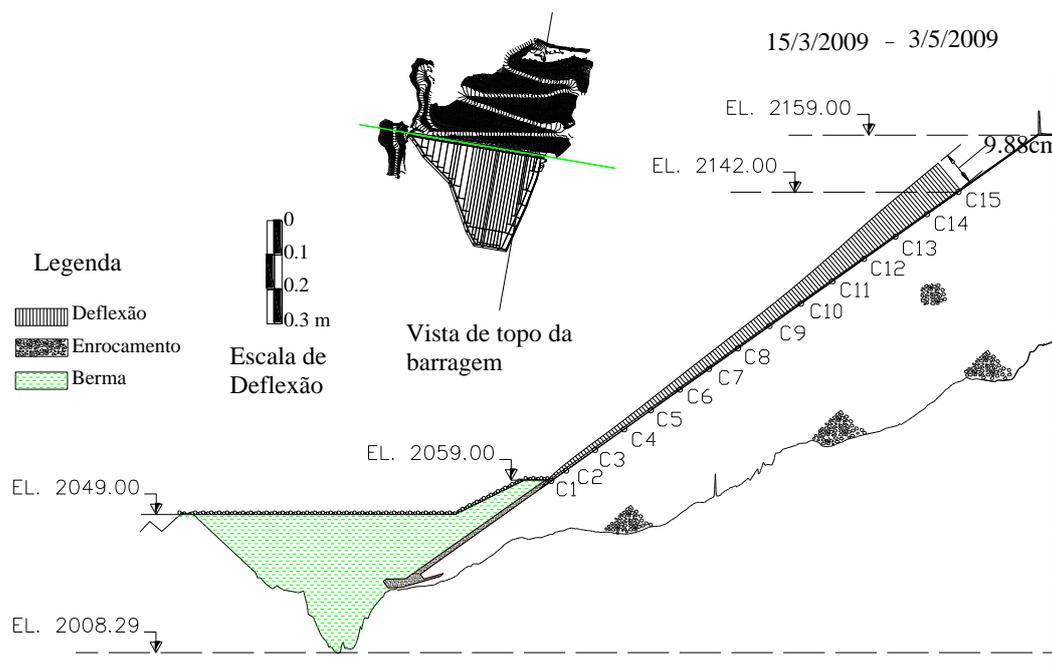


Figura 5.28 – Deflexões calculadas na Seção C da face de concreto da Barragem de Mazar em 03/05/2009.

- **Seção C (2º Estágio de Instalação – C15 a C17)**

Na Figura 5.29 novamente se nota a influência das características topográficas da fundação no comportamento da deformada da face de concreto. As deflexões, entretanto, ocorrem no sentido para montante.

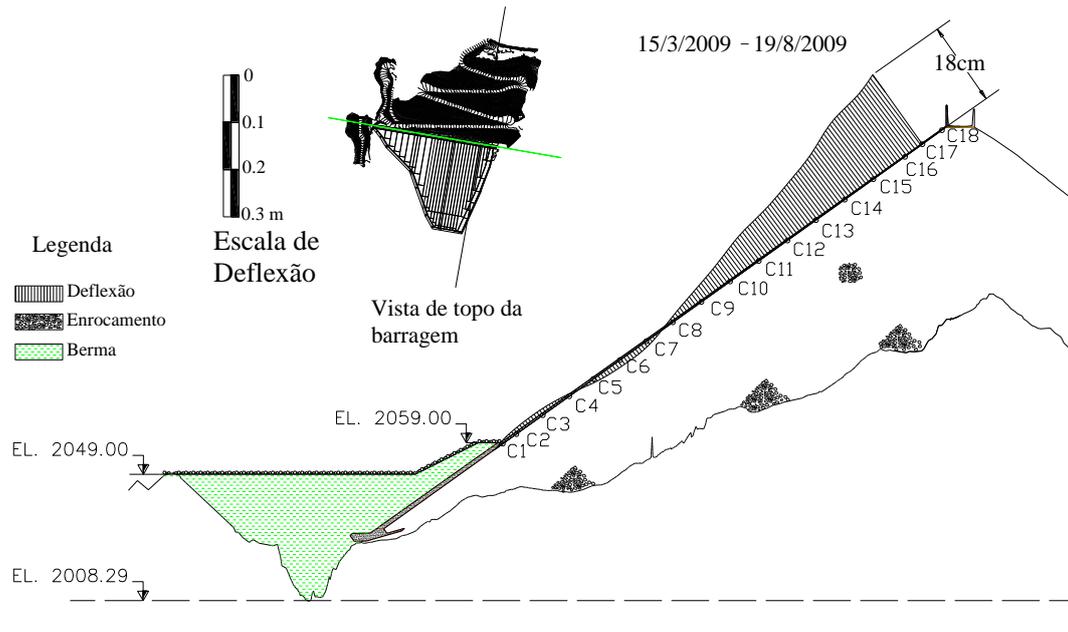


Figura 5.29 – Deflexões calculadas na Seção C da face de concreto da Barragem de Mazar em 19/08/2009.

- **Seção C (3º Estágio de Instalação – C18 – Seção Completa)**

Na Figura 5.30 se pode ver a deflexão correspondente à compatibilização de todas as etapas de instalação, portanto contendo os dados dos eletrônives de C1 a C18 (seção completa) desde a instalação inicial no dia 15/03/2009 até o dia 28/09/2009. Já na Figura 5.31 são apresentadas as deflexões em todas as etapas de instalação.

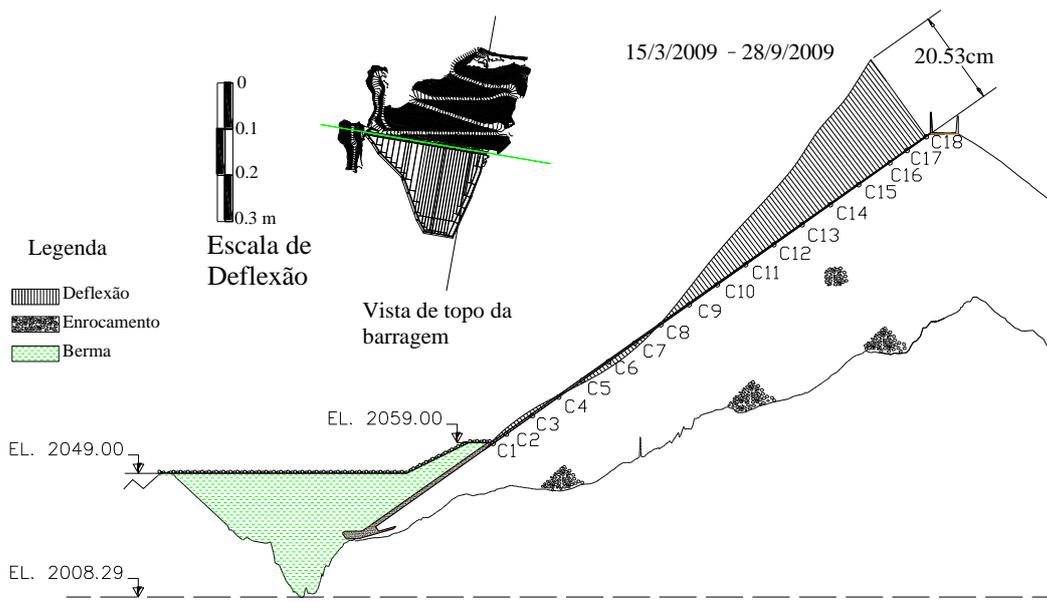


Figura 5.30 – Deflexões calculadas na Seção C da face de concreto da Barragem de Mazar em 28/09/2009.

| Deflexões da Seção C (unidade das deflexões - cm) |          |           |           |           |           |
|---|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Inst.   | Cota (m) | Dist. (m) | 12/jul/09 | 19/ago/09 | 28/set/09 |
| EN-C01  | 2058,00  | 3,94      | -0,17     | -0,52     | -0,50     |
| EN-C02  | 2061,00  | 9,10      | -0,28     | -1,04     | -1,00     |
| EN-C03  | 2067,00  | 19,42     | 0,12      | -1,23     | -1,15     |
| EN-C04  | 2073,00  | 29,75     | 1,16      | -0,49     | -0,36     |
| EN-C05  | 2078,50  | 39,21     | 2,24      | 0,42      | 0,59      |
| EN-C06  | 2084,50  | 49,53     | 3,06      | 0,98      | 1,20      |
| EN-C07  | 2090,50  | 59,85     | 3,25      | 0,67      | 0,94      |
| EN-C08  | 2096,50  | 70,18     | 2,83      | -0,54     | -0,25     |
| EN-C09  | 2103,00  | 81,36     | 1,96      | -2,52     | -2,27     |
| EN-C10  | 2109,50  | 92,54     | 1,07      | -4,68     | -4,50     |
| EN-C11  | 2116,00  | 103,73    | 0,44      | -6,56     | -6,49     |
| EN-C12  | 2122,50  | 114,91    | 0,03      | -8,10     | -8,11     |
| EN-C13  | 2129,00  | 126,09    | -0,54     | -9,66     | -9,68     |
| EN-C14  | 2135,50  | 137,28    | -1,72     | -11,83    | -11,78    |
| EN-C15  | 2142,00  | 148,46    | -3,44     | -14,79    | -14,67    |
| EN-C16  | 2148,50  | 141,96    |           | -16,53    | -16,64    |
| EN-C17  | 2152,50  | 137,96    |           | -17,90    | -18,55    |
| EN-C18  | 2158,50  | 131,96    |           |           | -20,53    |

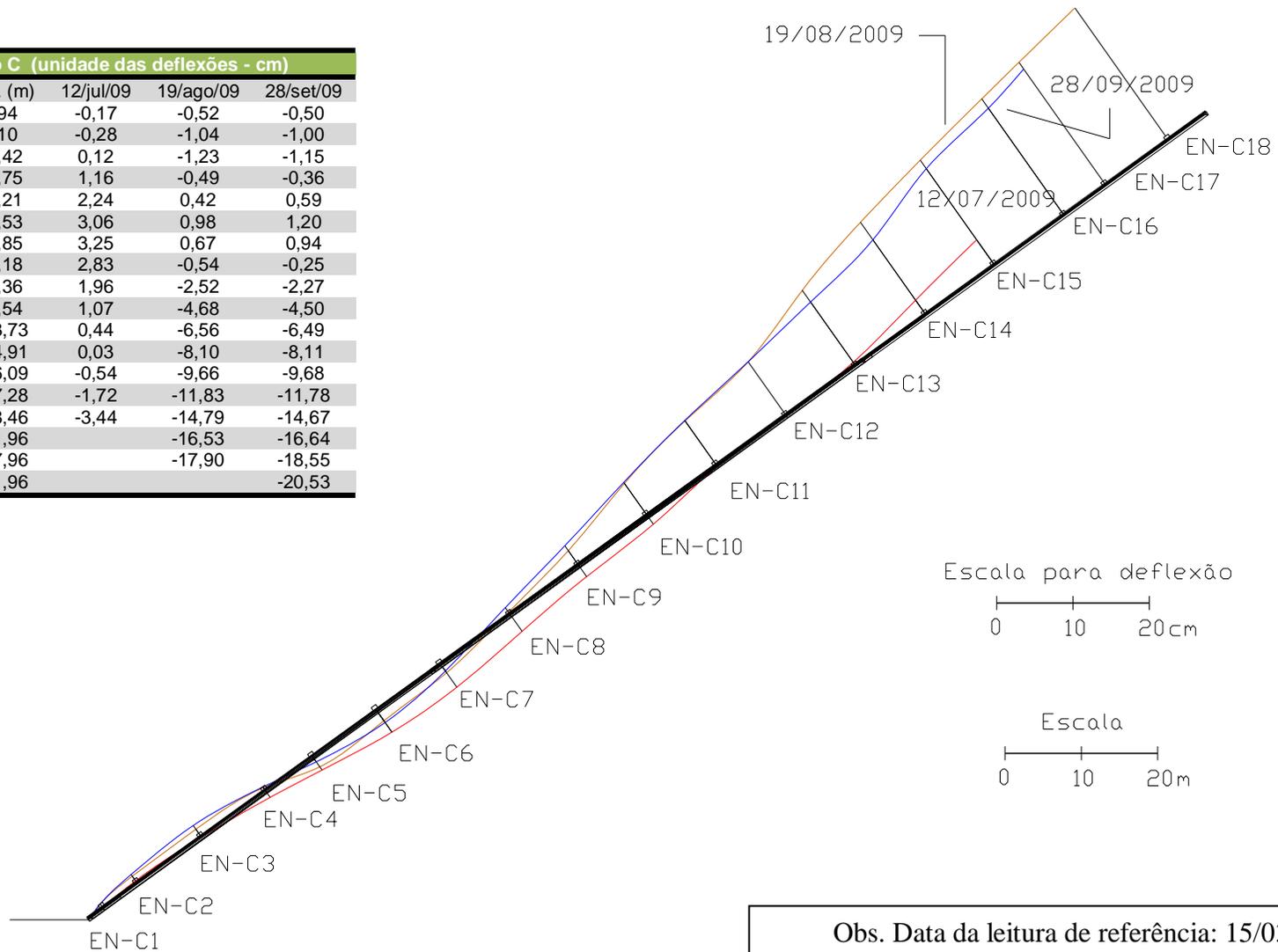


Figura 5.31 – Deflexões observadas na Seção C da face de concreto em todos os estágios de instalação.

- **Seção D (1º Estágio de Instalação – D1 a D5)**

Dentre as seções instrumentadas, a Seção D é a que apresenta maior irregularidade topográfica, por essa razão deve ser investigada quanto a momentos fletores atuantes na região. Na Figura 5.32 é mostrada a deformada da Seção D após a primeira etapa de instalação dos eletrônicos na seção (EN-D1 a EN-D5).

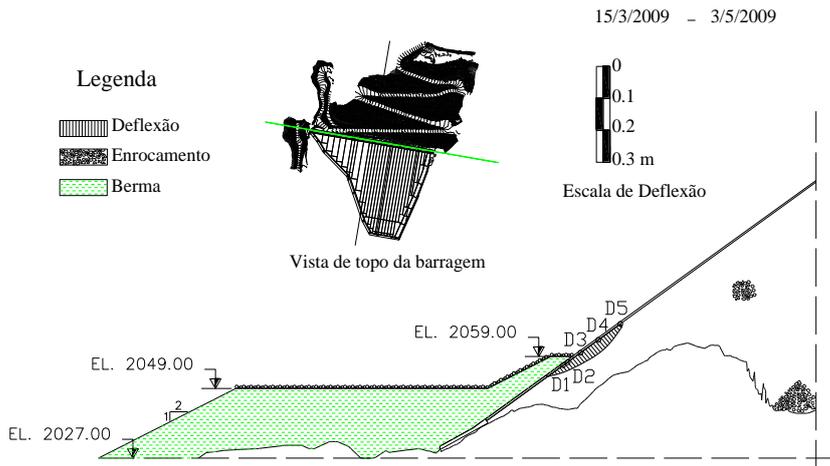


Figura 5.32 – Deflexões calculadas na Seção D da face de concreto da Barragem de Mazar em 03/05/2009.

- **Seção D (2º Estágio de Instalação – D6 a D18)**

Na Figura 5.33 é apresentada a deformada da face na Seção D, contendo os eletrônicos de D1 a D18 desde a instalação inicial no dia 15/03/2009 até o dia 27/08/2009.

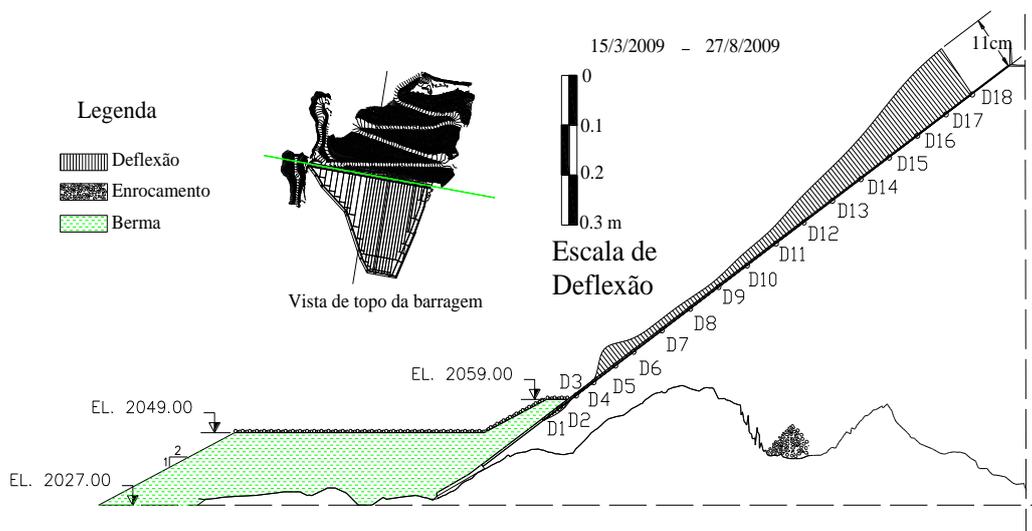


Figura 5.33 – Deflexões calculadas na Seção D da face de concreto da Barragem de Mazar em 27/08/2009.

### • Seção D (1º Estágio de Instalação – D1 a D5)

Na Figura 5.34 se pode ver a deformada resultante da compatibilização de todas as leituras, até a mais recente.

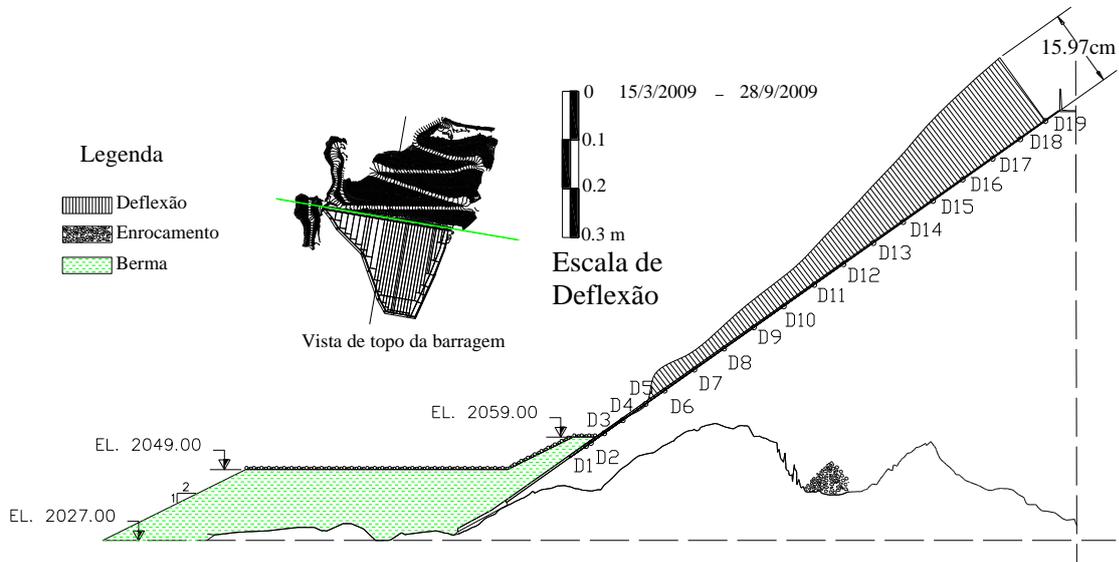


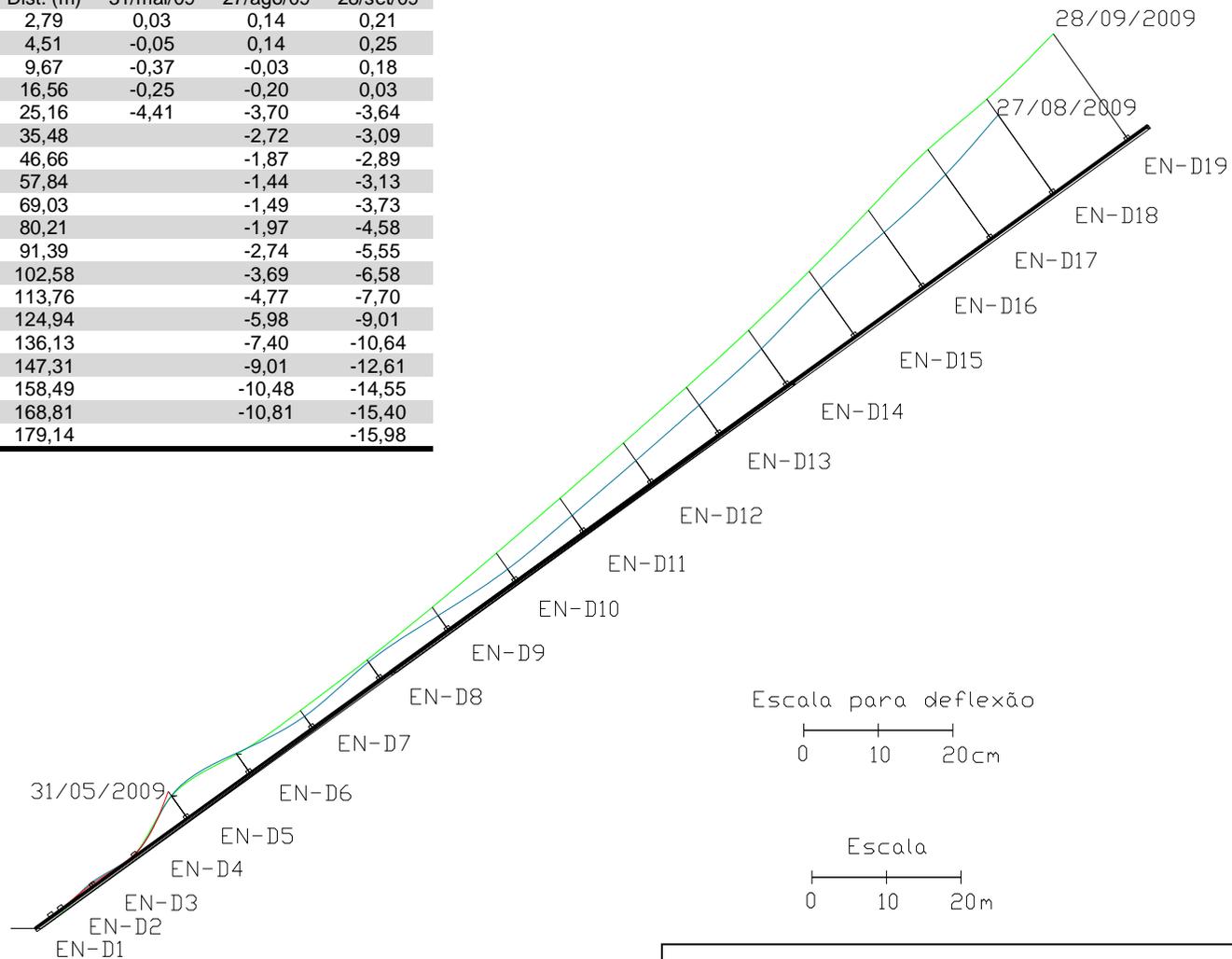
Figura 5.34 - Deflexões calculadas na Seção D da face de concreto da Barragem de Mazar em 28/09/2009

Na região do eletrônível D5 ocorre uma mudança abrupta na deformada da face, fato que pode estar ligado à mudança geométrica da fundação e construção da berma a montante, que atinge os eletrôníveis de D1 a D3, em esforço contrário ao do enrocamento. Essa região deve ser, portanto, analisada com muito detalhe quanto aos momentos fletores atuantes, já que a deflexão provoca uma tração nas fibras negativas da face de concreto.

Durante a fase de enchimento do reservatório, diante das características geométricas da fundação existentes nessa seção, é possível se notar que a compressão do enrocamento causada pela carga hidráulica poderá causar deflexões diferenciais no trecho entre D5 e D10.

Na Figura 5.35 podem ser vistas as deformadas nos diferentes estágios de instalação dos eletrôníveis.

| Deflexões da Seção D (unidade das deflexões - cm) |          |           |           |           |           |
|---|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Inst.   | Cota (m) | Dist. (m) | 31/mai/09 | 27/ago/09 | 28/set/09 |
| EN-D01  | 2056,00  | 2,79      | 0,03      | 0,14      | 0,21      |
| EN-D02  | 2057,00  | 4,51      | -0,05     | 0,14      | 0,25      |
| EN-D03  | 2060,00  | 9,67      | -0,37     | -0,03     | 0,18      |
| EN-D04  | 2064,00  | 16,56     | -0,25     | -0,20     | 0,03      |
| EN-D05  | 2069,00  | 25,16     | -4,41     | -3,70     | -3,64     |
| EN-D06  | 2075,00  | 35,48     |           | -2,72     | -3,09     |
| EN-D07  | 2081,50  | 46,66     |           | -1,87     | -2,89     |
| EN-D08  | 2088,00  | 57,84     |           | -1,44     | -3,13     |
| EN-D09  | 2094,50  | 69,03     |           | -1,49     | -3,73     |
| EN-D10  | 2101,00  | 80,21     |           | -1,97     | -4,58     |
| EN-D11  | 2107,50  | 91,39     |           | -2,74     | -5,55     |
| EN-D12  | 2114,00  | 102,58    |           | -3,69     | -6,58     |
| EN-D13  | 2120,50  | 113,76    |           | -4,77     | -7,70     |
| EN-D14  | 2127,00  | 124,94    |           | -5,98     | -9,01     |
| EN-D15  | 2133,50  | 136,13    |           | -7,40     | -10,64    |
| EN-D16  | 2140,00  | 147,31    |           | -9,01     | -12,61    |
| EN-D17  | 2146,50  | 158,49    |           | -10,48    | -14,55    |
| EN-D18  | 2152,50  | 168,81    |           | -10,81    | -15,40    |
| EN-D19  | 2158,50  | 179,14    |           |           | -15,98    |



Obs. Data da leitura de referência: 19/03/2009

Figura 5.35 – Deflexões observadas na face de concreto em todos os estágios de instalação (Seção D).

- **Seção B (1º Estágio – B1 a B10)**

A Seção B foi a última a ser instrumentada e se localiza próxima à ombreira da barragem. As deflexões ocorreram para montante, como pode ser visto na Figura 5.36.

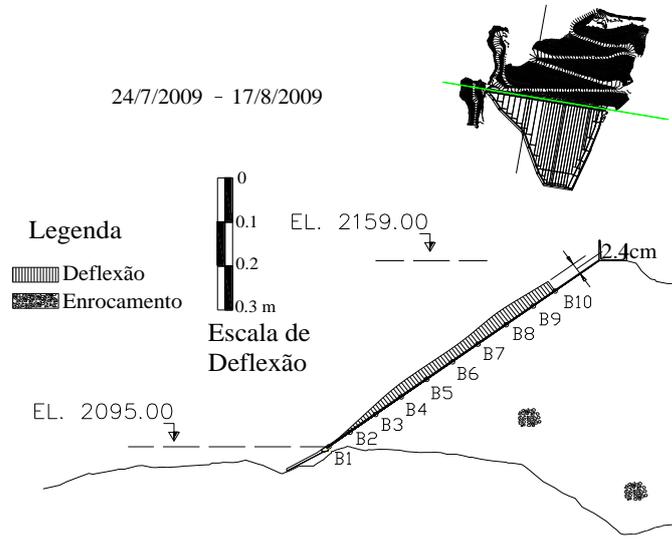


Figura 5.36 – Deflexões calculadas na Seção D da face de concreto da Barragem de Mazar em 17/08/2009.

- **Seção B (2º Estágio – B1 a B11)**

O ajuste dos pontos de rotação quando o grau é próximo ao número de pontos geralmente é muito bom para descrever as deflexões, por haver maior coeficiente de determinação. Na Figura 5.37 são mostradas as deflexões calculadas para a última leitura dos eletrônives da seção B.

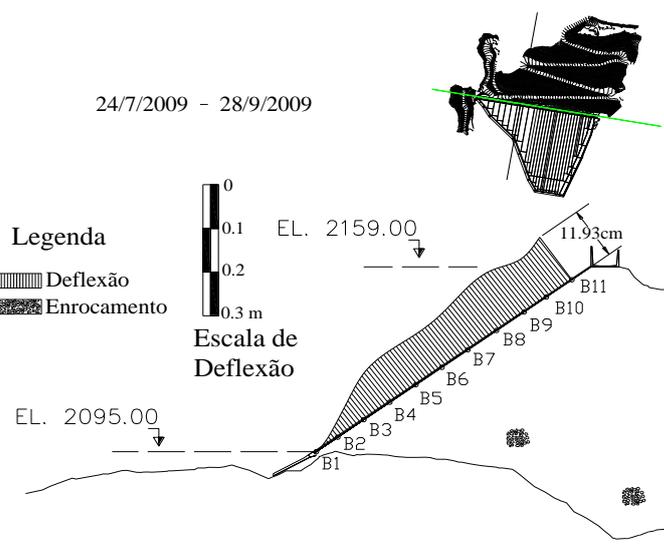


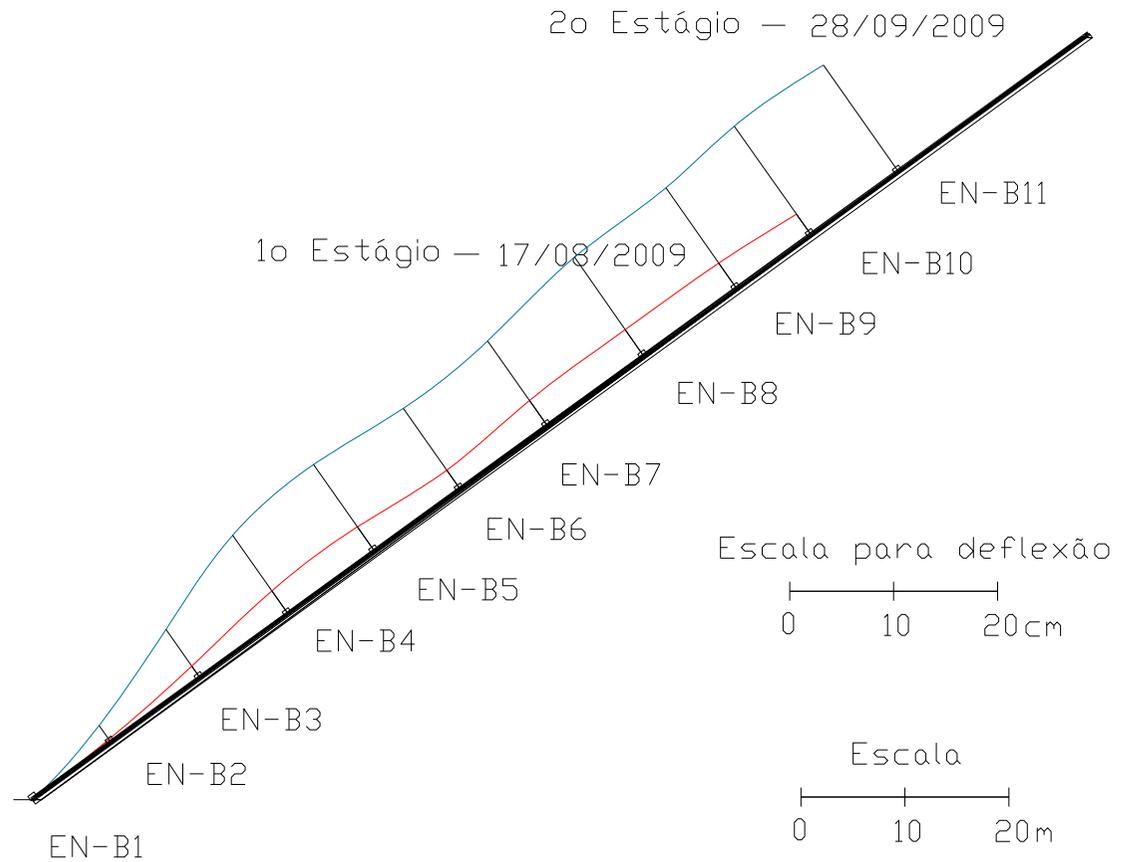
Figura 5.37 - Deflexões calculadas na Seção D da face de concreto da Barragem de Mazar em 28/09/2009.

Na Figura 5.38 são apresentados os resultados da compatibilização de todas as leituras da Seção B, desde a sua instalação em julho de 2009.

Na Figura 5.39 estão desenhadas, em escala, as deflexões a partir de uma data de referência em que se pudesse analisar o comportamento da face como um todo. O ideal seria iniciar a análise pelo primeiro estágio de instalação da última seção instrumentada (Seção B). No entanto, devido à pequena quantidade de dados dessa seção, se optou por tomar como referência à data de 15 de março de 2009, em que as seções A, C e D já possuíam um número significativo de eletrônives instalados. Sendo assim, na Figura 5.39 podem ser observadas as deflexões calculadas a partir do dia 15/03/2009 até 28/09/2009 para as seções A, C e D e do dia 27/07/2009 até o dia 28/09/2009 para a Seção B. No Apêndice C constam os resultados sem compatibilização para as leituras de todas as seções, do A1 a A28, C1 a C15, D1 a D18 e B1 a B10, para se obter os resultados sem a hipótese de rotação nula.

Após o término da construção da berma a montante, se nota haver uma movimentação para montante da face como um todo, entretanto mais pronunciada nas regiões próximas às ombreiras da barragem. Na região central (Seção A), se pode inferir que há certa estabilização das deflexões, o que está ligado à estabilização nas leituras observadas na análise do desempenho dos eletrônives na seção.

| Deflexões da Seção B (unidade das deflexões - cm) |          |           |           |           |
|---|----------|-----------|-----------|-----------|
| Inst.   | Cota (m) | Dist. (m) | 17/ago/09 | 28/set/09 |
| EN-B01  | 2099,20  | 0,20      | 0,00      | -0,03     |
| EN-B02  | 2104,50  | 9,32      | -0,39     | -2,00     |
| EN-B03  | 2110,50  | 19,64     | -1,40     | -5,68     |
| EN-B04  | 2116,50  | 29,96     | -2,22     | -8,69     |
| EN-B05  | 2122,50  | 40,29     | -2,37     | -9,62     |
| EN-B06  | 2128,50  | 50,61     | -2,25     | -9,44     |
| EN-B07  | 2134,50  | 60,93     | -2,49     | -9,93     |
| EN-B08  | 2141,00  | 72,12     | -3,10     | -11,54    |
| EN-B09  | 2147,50  | 83,30     | -3,02     | -11,77    |
| EN-B10  | 2152,50  | 91,90     | -2,44     | -10,27    |
| EN-B11  | 2158,50  | 102,22    |           | -11,94    |



Obs. Data da leitura de referência: 27/07/2009

Figura 5.38 – Deflexões observadas na face de concreto em todos os estágios de instalação (Seção B).

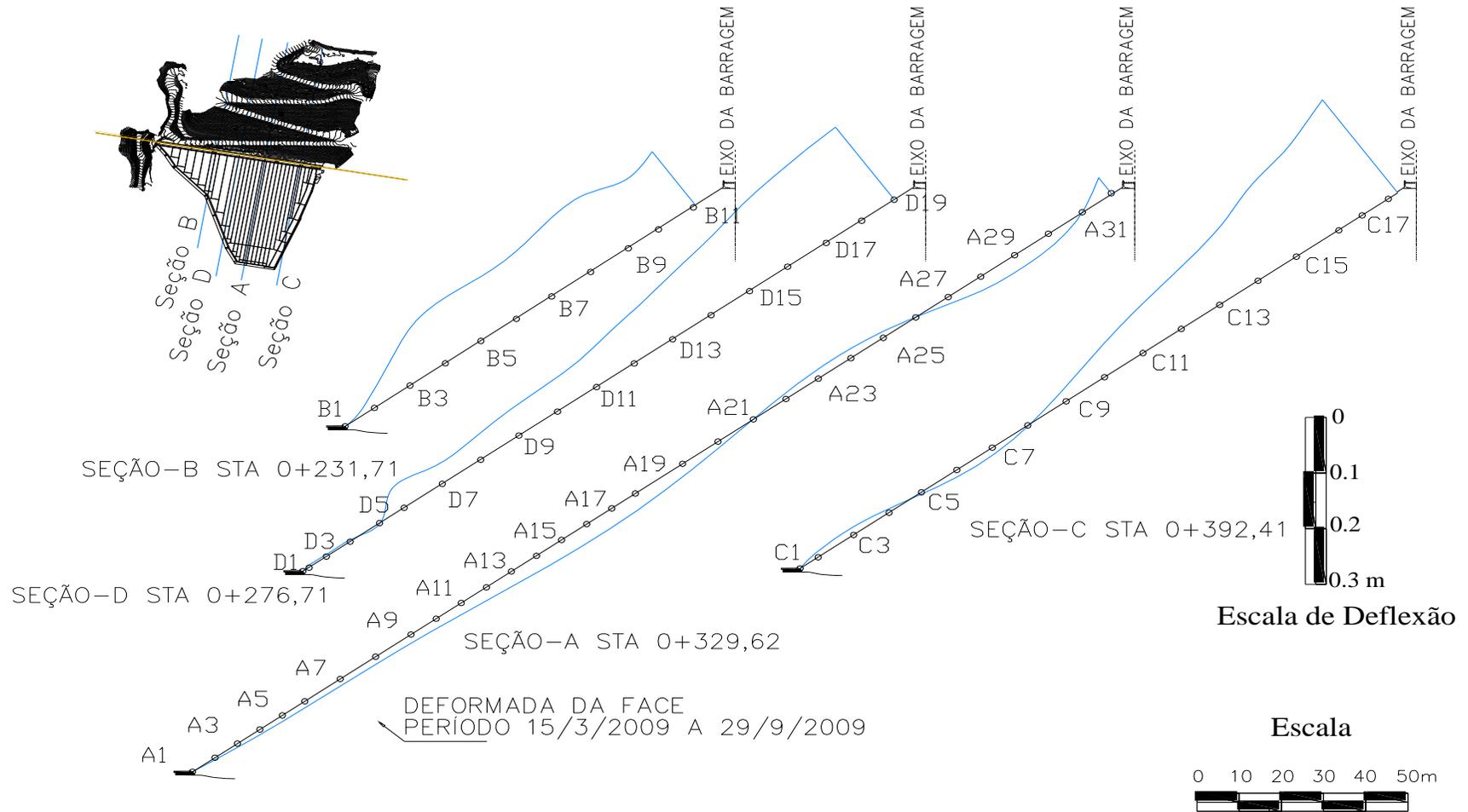


Figura 5.39 – Deflexões observadas na face de concreto da Barragem de Mazar em todas as seções. (Período 15/03/2009 a 28/09/2009 para as seções A, C e D e 27/07/2009 a 28/09/2009 para a Seção B.

#### 5.4. Análise dos momentos fletores atuantes na face de concreto da Barragem de Mazar

Utilizando o produto entre o polinômio de 5º grau, oriundo da derivação da curva representativa das rotações, e a rigidez da estrutura (EI), se obtiveram os momentos fletores para as datas de tomada de leitura.

No Capítulo 4, Figura 4.5, foi apresentada a expressão que determina a espessura teórica da face em qualquer ponto, que é dada pela expressão 4.3:

$$h = 0,30 + 0,003 \cdot H \quad (5.1)$$

onde H é a distância vertical da crista ao ponto que se deseja obter a espessura (h).

Sabendo que o  $f_{ck}$  do concreto utilizado é de 25 MPa, temos por (3.8) e (3.9) que  $E_c = 35234$  MPa e considerando o módulo de elasticidade do aço de 210 GPa, temos que:

$$\alpha_e = \frac{E_s}{E_c} = \frac{210000MPa}{35234MPa} = 5,96 \quad (5.2)$$

Conforme mencionado no capítulo 3, no que se refere às características da face, a armadura é de 5% nas duas direções, considerando um cobrimento nominal de 2,5 cm, as equações (3.10) e (3.11) podem ser determinadas. Na tabela 5.2 são apresentados os valores calculados de momento de inércia, pelas expressões apresentadas no Capítulo 3. Já na Tabela 5.3 são apresentados os limites de fissuração, em módulo, já que a armadura é dupla e os limites positivos e negativos são iguais, calculados pelas expressões também apresentadas no Capítulo 3.

Tabela 5.2 – Valores do momento de Inércia da seção homogênea da face de concreto nos pontos de instalação dos eletrônicos (Valores em  $m^4$ ).

| EN/Seção | A        | B        | C        | D        |
|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1        | 6,19E-02 | 1,43E-02 | 2,89E-02 | 2,97E-02 |
| 2        | 5,92E-02 | 1,28E-02 | 2,76E-02 | 2,93E-02 |
| 3        | 5,65E-02 | 1,14E-02 | 2,51E-02 | 2,80E-02 |
| 4        | 5,39E-02 | 1,00E-02 | 2,27E-02 | 2,63E-02 |
| 5        | 5,14E-02 | 8,76E-03 | 2,07E-02 | 2,43E-02 |
| 6        | 4,90E-02 | 7,62E-03 | 1,87E-02 | 2,20E-02 |
| 7        | 4,54E-02 | 6,59E-03 | 1,68E-02 | 1,97E-02 |
| 8        | 4,19E-02 | 5,57E-03 | 1,50E-02 | 1,76E-02 |
| 9        | 3,86E-02 | 4,67E-03 | 1,32E-02 | 1,56E-02 |
| 10       | 3,64E-02 | 4,05E-03 | 1,16E-02 | 1,38E-02 |
| 11       | 3,42E-02 | 3,38E-03 | 1,01E-02 | 1,21E-02 |
| 12       | 3,22E-02 |          | 8,76E-03 | 1,06E-02 |
| 13       | 3,02E-02 |          | 7,53E-03 | 9,16E-03 |
| 14       | 2,83E-02 |          | 6,42E-03 | 7,90E-03 |
| 15       | 2,65E-02 |          | 5,43E-03 | 6,75E-03 |
| 16       | 2,48E-02 |          | 4,54E-03 | 5,72E-03 |
| 17       | 2,31E-02 |          | 4,05E-03 | 4,80E-03 |
| 18       | 2,16E-02 |          | 3,38E-03 | 4,05E-03 |
| 19       | 1,89E-02 |          |          | 3,38E-03 |
| 20       | 1,69E-02 |          |          |          |
| 21       | 1,52E-02 |          |          |          |
| 22       | 1,36E-02 |          |          |          |
| 23       | 1,22E-02 |          |          |          |
| 24       | 1,09E-02 |          |          |          |
| 25       | 9,69E-03 |          |          |          |
| 26       | 8,56E-03 |          |          |          |
| 27       | 7,53E-03 |          |          |          |
| 28       | 6,59E-03 |          |          |          |
| 29       | 5,65E-03 |          |          |          |
| 30       | 4,80E-03 |          |          |          |
| 31       | 4,05E-03 |          |          |          |
| 32       | 3,38E-03 |          |          |          |

Tabela 5.3 – Valores (em módulo) do momento de fissuração da seção da face de concreto nos pontos de instalação dos eletrônives (Valores em kN·m).

| EN/Seção | A     | B     | C     | D     |
|----------|-------|-------|-------|-------|
| 1        | 341,0 | 131,0 | 207,0 | 211,0 |
| 2        | 331,0 | 122,0 | 201,0 | 209,0 |
| 3        | 321,0 | 113,0 | 189,0 | 203,0 |
| 4        | 311,0 | 104,0 | 177,0 | 195,0 |
| 5        | 302,0 | 95,4  | 167,0 | 185,0 |
| 6        | 292,0 | 87,2  | 156,0 | 173,0 |
| 7        | 278,0 | 79,4  | 145,0 | 161,0 |
| 8        | 264,0 | 71,3  | 135,0 | 150,0 |
| 9        | 250,0 | 63,7  | 125,0 | 139,0 |
| 10       | 241,0 | 58,1  | 114,0 | 128,0 |
| 11       | 231,0 | 51,7  | 105,0 | 118,0 |
| 12       | 222,0 |       | 95,4  | 108,0 |
| 13       | 213,0 |       | 86,5  | 98,2  |
| 14       | 204,0 |       | 78,1  | 89,2  |
| 15       | 196,0 |       | 70,1  | 80,6  |
| 16       | 187,0 |       | 62,5  | 72,5  |
| 17       | 179,0 |       | 58,1  | 64,8  |
| 18       | 171,0 |       | 51,7  | 58,1  |
| 19       | 157,0 |       |       | 51,7  |
| 20       | 146,0 |       |       |       |
| 21       | 136,0 |       |       |       |
| 22       | 127,0 |       |       |       |
| 23       | 118,0 |       |       |       |
| 24       | 110,0 |       |       |       |
| 25       | 102,0 |       |       |       |
| 26       | 94,0  |       |       |       |
| 27       | 86,5  |       |       |       |
| 28       | 79,4  |       |       |       |
| 29       | 71,9  |       |       |       |
| 30       | 64,8  |       |       |       |
| 31       | 58,1  |       |       |       |
| 32       | 51,7  |       |       |       |

#### • Seção A

Na Figura 5.40 estão apresentadas curvas dos momentos fletores calculados nos diferentes estágios de instalação, enquanto na Figura 5.41 os resultados são plotados conjuntamente com os limites de fissuração da face.

Para a compatibilização das leituras entre as etapas de instalação, foi considerada a mesma hipótese usada anteriormente, ou seja, rotação nula nos novos trechos instrumentados, já que a face ainda não havia sido construída. Dessa forma, os momentos fletores iniciais nos novos trechos foram tomados como nulos.

Os valores positivos de momento correspondem à tração das fibras positivas da face de concreto e os negativos à tração das fibras negativas.

| Momentos Fletores da Seção A (unidade - tf·m) |          |           |           |           |           |           |
|---|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Inst.   | Cota (m) | Dist. (m) | 15/mar/09 | 12/jul/09 | 27/ago/09 | 28/set/09 |
| EN-A01  | 2001,00  | 0,33      | 0,52      | 0,60      | 0,60      | 0,71      |
| EN-A02  | 2004,80  | 6,86      | 6,45      | 7,47      | 7,37      | 9,14      |
| EN-A03  | 2008,60  | 13,40     | 6,73      | 7,95      | 7,71      | 10,16     |
| EN-A04  | 2012,40  | 19,94     | 4,65      | 5,67      | 5,28      | 7,75      |
| EN-A05  | 2016,20  | 26,48     | 2,28      | 2,89      | 2,38      | 4,48      |
| EN-A06  | 2020,00  | 33,02     | 0,72      | 0,91      | 0,30      | 1,83      |
| EN-A07  | 2026,00  | 43,34     | 0,72      | 0,43      | -0,24     | 0,30      |
| EN-A08  | 2032,00  | 53,66     | 3,11      | 2,70      | 2,06      | 1,77      |
| EN-A09  | 2038,00  | 63,98     | 6,04      | 5,88      | 5,35      | 4,55      |
| EN-A10  | 2042,25  | 71,30     | 7,35      | 7,52      | 7,10      | 6,14      |
| EN-A11  | 2046,50  | 78,61     | 7,41      | 7,99      | 7,69      | 6,72      |
| EN-A12  | 2050,75  | 85,92     | 5,95      | 6,96      | 6,78      | 5,93      |
| EN-A13  | 2055,00  | 93,23     | 3,04      | 4,43      | 4,37      | 3,72      |
| EN-A14  | 2059,25  | 100,54    | -0,96     | 0,74      | 0,77      | 0,37      |
| EN-A15  | 2063,50  | 107,86    | -5,34     | -3,45     | -3,36     | -3,49     |
| EN-A16  | 2067,75  | 115,17    | -9,13     | -7,19     | -7,05     | -6,94     |
| EN-A17  | 2072,00  | 122,48    | -11,08    | -9,25     | -9,09     | -8,78     |
| EN-A18  | 2076,00  | 129,36    |           | 1,61      | 1,76      | 2,20      |
| EN-A19  | 2084,00  | 143,13    |           | 0,86      | 0,91      | 1,45      |
| EN-A20  | 2090,00  | 153,45    |           | 0,12      | 0,08      | 0,52      |
| EN-A21  | 2096,00  | 163,77    |           | -0,61     | -0,77     | -0,53     |
| EN-A22  | 2101,50  | 173,23    |           | -1,18     | -1,43     | -1,42     |
| EN-A23  | 2107,00  | 182,70    |           | -1,54     | -1,85     | -2,07     |
| EN-A24  | 2112,50  | 192,16    |           | -1,59     | -1,93     | -2,33     |
| EN-A25  | 2118,00  | 201,62    |           | -1,26     | -1,57     | -2,06     |
| EN-A26  | 2123,50  | 211,08    |           | -0,51     | -0,72     | -1,16     |
| EN-A27  | 2129,00  | 220,55    |           | 0,70      | 0,65      | 0,42      |
| EN-A28  | 2134,50  | 230,01    |           | 2,34      | 2,52      | 2,70      |
| EN-A29  | 2140,50  | 240,33    |           |           | 0,50      | 1,32      |
| EN-A30  | 2146,50  | 250,65    |           |           | 0,87      | 2,54      |
| EN-A31  | 2152,50  | 260,98    |           |           | 1,28      | 3,95      |
| EN-A32  | 2158,50  | 271,30    |           |           |           | 3,77      |

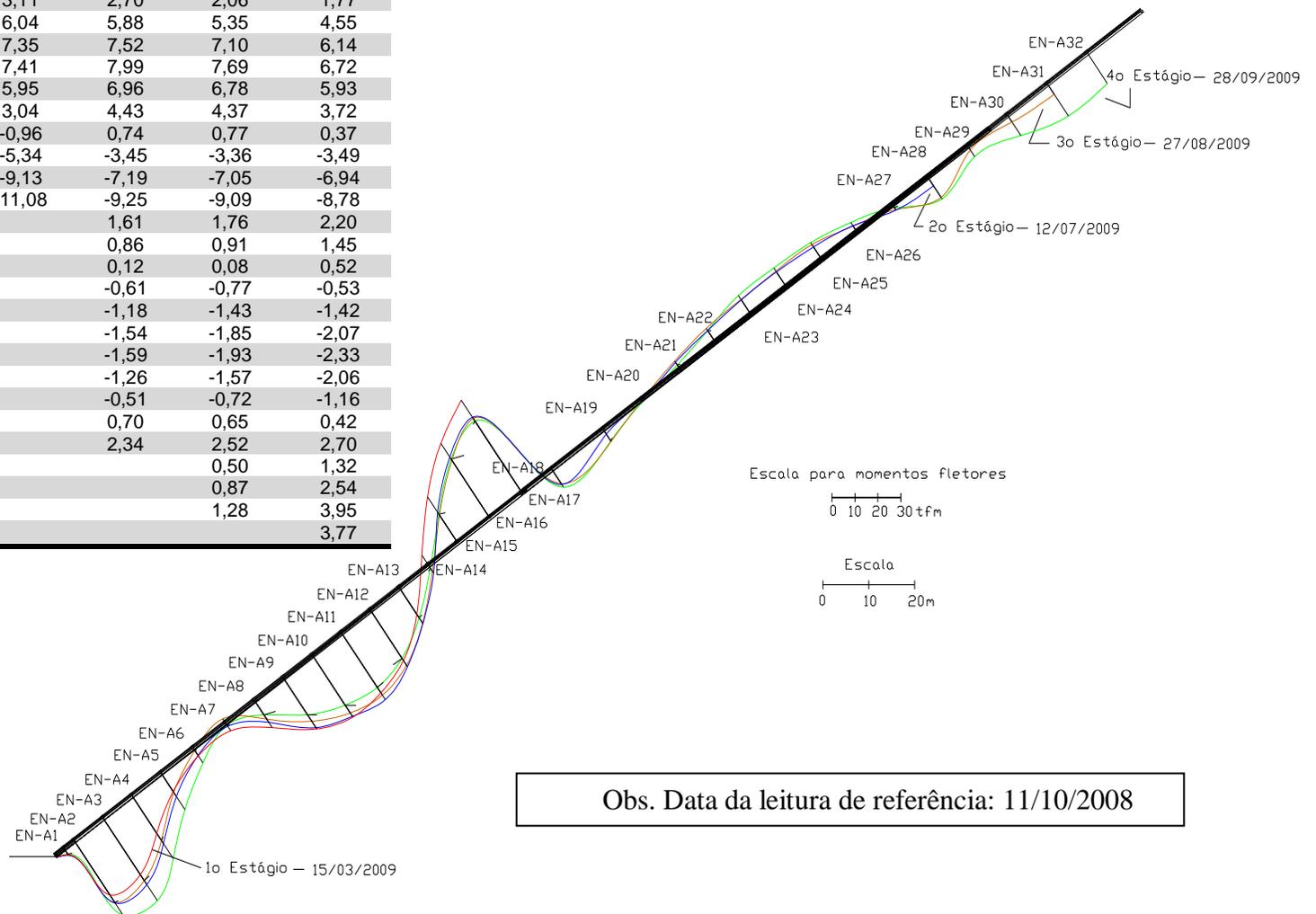


Figura 5.40 – Momentos Fletores atuantes medidos nos diferentes estágios de instalação dos eletrônives (Seção A).

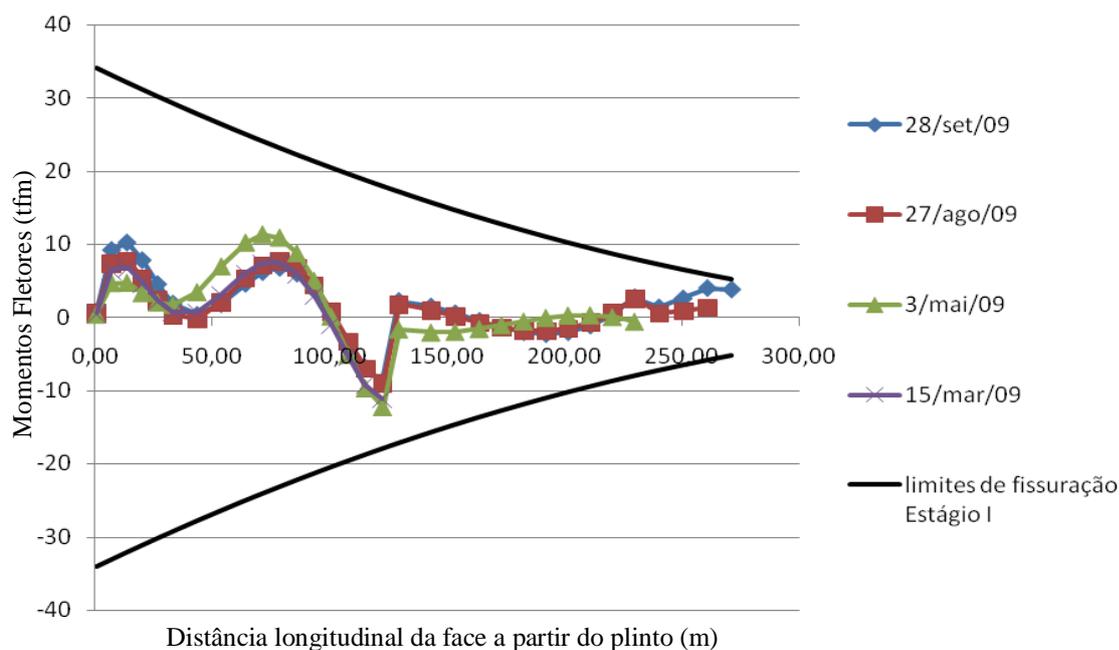


Figura 5.41 – Momentos fletores atuantes na Seção A em diferentes estágios e limites de fissuração do concreto.

Nas Figuras 5.40 e 5.41 se nota que o ponto de inflexão mais pronunciado ocorre exatamente no eletrônível A14, o que representa um ponto de máximo na integral da curva de momentos fletores (curva de rotações). Essa tendência de maior inflexão nesse ponto já havia ocorrido antes mesmo do comportamento anômalo observado no desempenho dos eletrôníveis na seção. Na data de 3/5/2009 (Figura 5.41), entretanto, se torna mais pronunciada esta inflexão, tornando a região ao seu redor mais pronunciada em termos de momentos fletores. Apesar dessa situação, os limites de fissuração teóricos não foram atingidos.

Um cuidado deve ser tomado na interpretação polinomial, pois geralmente a derivada da aproximação não é fidedigna nos extremos da função. Neste trabalho, foi estabelecida uma condição de contorno junto ao plinto, mas nenhuma nas proximidades da crista. Sendo assim, os valores das funções nos extremos podem ser considerados instáveis.

### • Seção C

Na Figura 5.42 podem ser vistos os momentos fletores atuantes na Seção C em diferentes estágios construtivos. Nota-se que os momentos nessa seção foram pronunciados e variam suavemente entre os eletrôníveis, sendo esse o motivo de não ser tão evidente na observação das deflexões.

| Momentos Fletores da Seção C (unidade - tfm) |          |           |           |           |           |
|--|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Inst.  | Cota (m) | Dist. (m) | 12/jul/09 | 19/ago/09 | 28/set/09 |
| EN-C01                                       | 2058,00  | 3,94      | -0,17     | -0,52     | -0,50     |
| EN-C02                                       | 2061,00  | 9,10      | -0,28     | -1,04     | -1,00     |
| EN-C03                                       | 2067,00  | 19,42     | 0,12      | -1,23     | -1,15     |
| EN-C04                                       | 2073,00  | 29,75     | 1,16      | -0,49     | -0,36     |
| EN-C05                                       | 2078,50  | 39,21     | 2,24      | 0,42      | 0,59      |
| EN-C06                                       | 2084,50  | 49,53     | 3,06      | 0,98      | 1,20      |
| EN-C07                                       | 2090,50  | 59,85     | 3,25      | 0,67      | 0,94      |
| EN-C08                                       | 2096,50  | 70,18     | 2,83      | -0,54     | -0,25     |
| EN-C09                                       | 2103,00  | 81,36     | 1,96      | -2,52     | -2,27     |
| EN-C10                                       | 2109,50  | 92,54     | 1,07      | -4,68     | -4,50     |
| EN-C11                                       | 2116,00  | 103,73    | 0,44      | -6,56     | -6,49     |
| EN-C12                                       | 2122,50  | 114,91    | 0,03      | -8,10     | -8,11     |
| EN-C13                                       | 2129,00  | 126,09    | -0,54     | -9,66     | -9,68     |
| EN-C14                                       | 2135,50  | 137,28    | -1,72     | -11,83    | -11,78    |
| EN-C15                                       | 2142,00  | 148,46    | -3,44     | -14,79    | -14,67    |
| EN-C16                                       | 2148,50  | 141,96    |           | -16,53    | -16,64    |
| EN-C17                                       | 2152,50  | 137,96    |           | -17,90    | -18,55    |
| EN-C18                                       | 2158,50  | 131,96    |           |           | -20,53    |

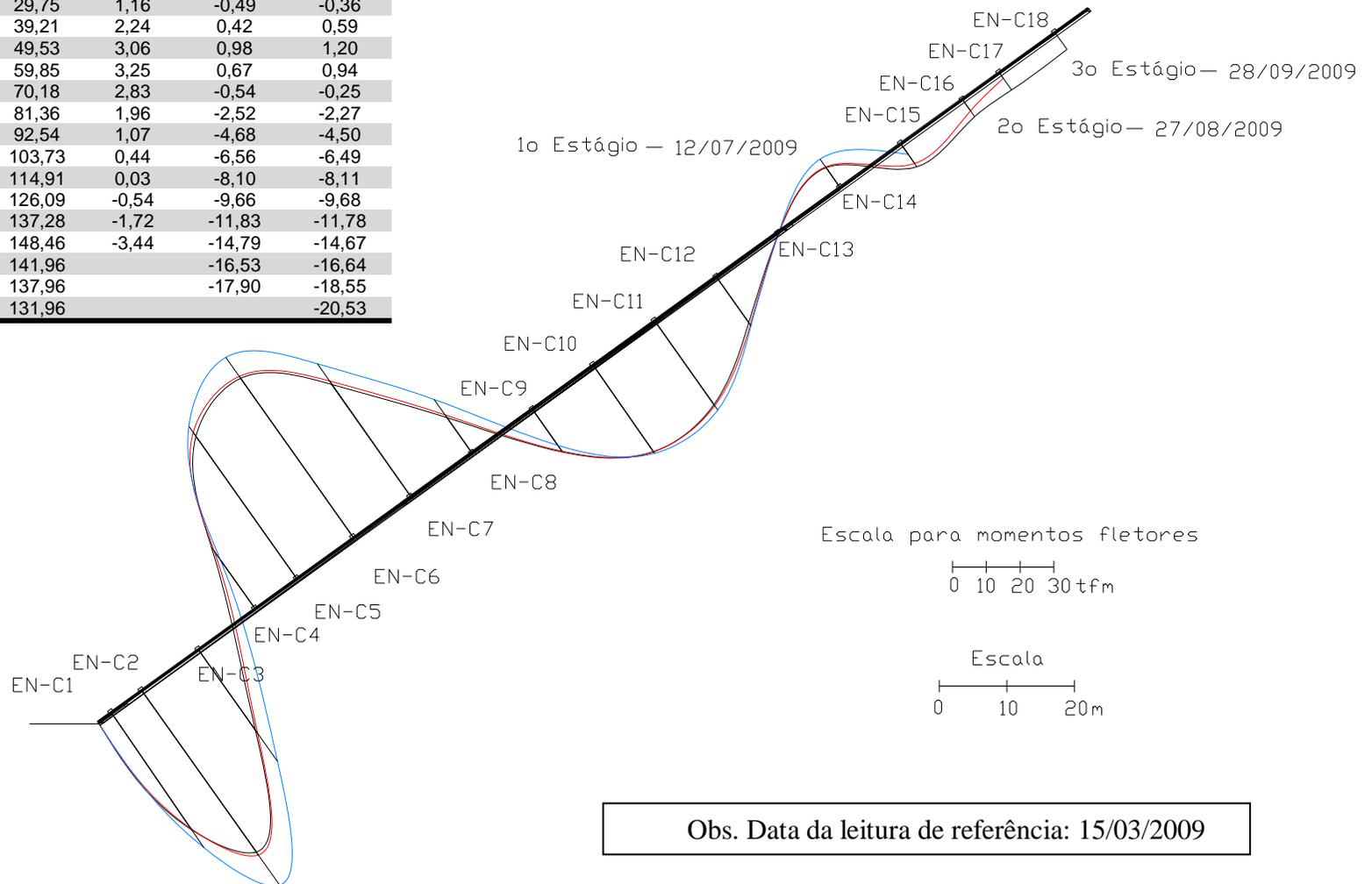


Figura 5.42 – Momentos Fletores atuantes medidos nos diferentes estágios de instalação dos eletrônives (Seção C).

Na Figura 5.43 as curvas de momentos fletores são plotadas juntamente com os limites teóricos de fissuração. Na região do eletrônível C6 os instrumentos indicaram momento negativo próximo ao de fissuração, o que pode ser verificado por inspeção visual já que os instrumentos da seção C estão acima da berma a montante. Entratanto as regiões dos eletrôníveis C2 e C10, que indicaram momentos positivos elevados não podem ser verificados já que a tração ocorre nas fibras positivas, no contato da face com o enrocamento.

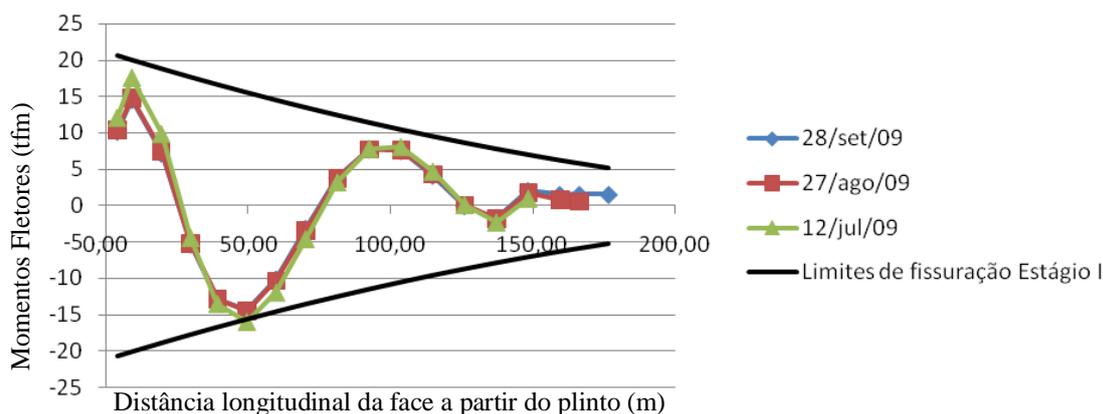


Figura 5.43 - Momentos fletores atuantes na Seção C em diferentes estágios e limites de fissuração do concreto.

#### • Seção D

Conforme analisado anteriormente com relação às deflexões na Seção D, de grande irregularidade topográfica na fundação, na região do eletrônível D5 ocorre uma mudança abrupta na deformada da face. Na Figura 5.44 se nota realmente haver um momento fletor negativo muito pronunciado em relação aos outros pontos exatamente no referido instrumento.

Já na Figura 5.45 são plotadas as curvas dos momentos juntamente com os limites teóricos de fissuração, onde se observa que não foram atingidos os momentos teóricos de fissuração nessa região.

No Apêndice C constam os resultados sem compatibilização para as leituras de todas as seções, do A1 a A28, C1 a C15, D1 a D18 e B1 a B10, para se obter os resultados sem a hipótese de rotação nula.

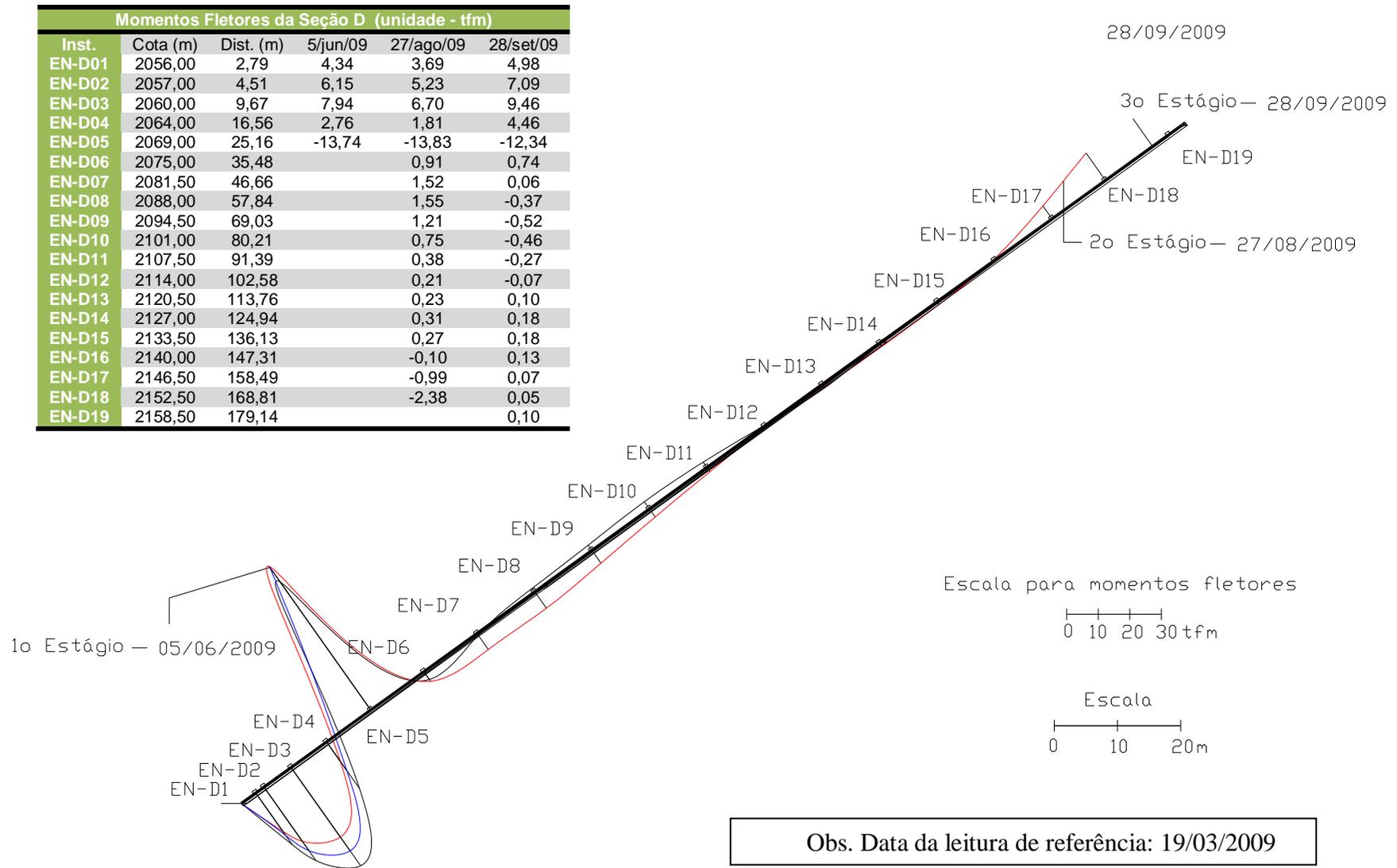


Figura 5.44 – Deflexões observadas na face de concreto em todos os estágios de instalação (Seção D).

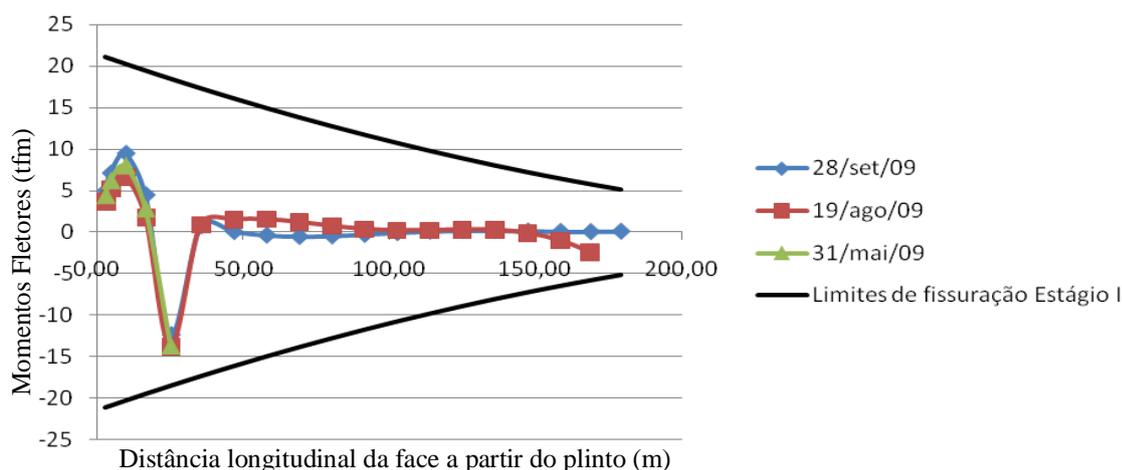


Figura 5.45 – Momentos fletores atuantes na Seção B em diferentes estágios e limites de fissuração do concreto.

### • Seção B

A Seção B possui apenas 11 eletrônives instalados, numero próximo a grau polinomial adotado. Na análise com um polinômio de 6º grau, existe uma boa representação para as deflexões pelo bom ajuste dos pontos, entretanto maior instabilidade numérica para o processo de derivação.

Conforme mencionado anteriormente, os extremos das funções são regiões críticas na análise das derivadas, como pode ser observado na Figura 5.46, onde os momentos excedem consideravelmente os limites teóricos de fissuração.

Na Figura 5.47 podem ser observados os momentos em escala para os dois estágios de instalação dos eletrônives.

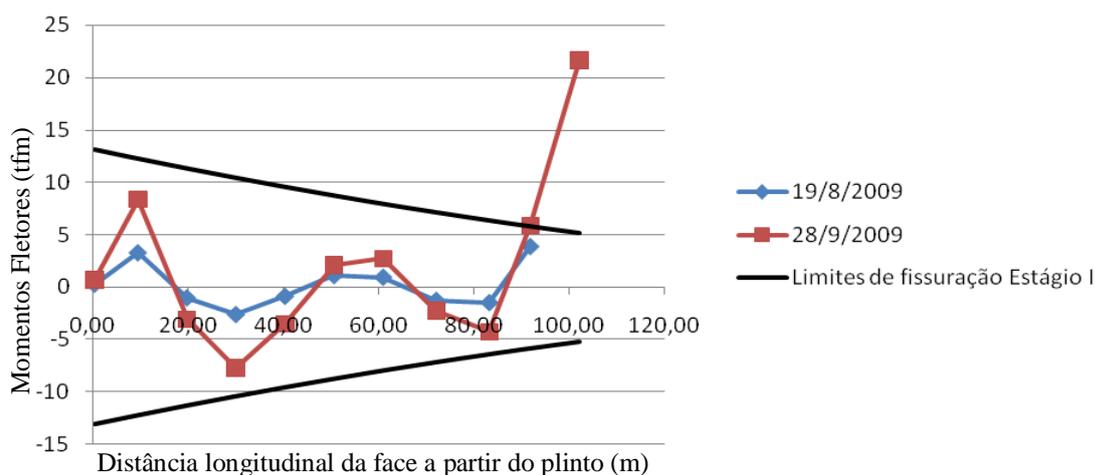


Figura 5.46 – Momentos fletores atuantes na Seção B em diferentes estágios e limites de fissuração do concreto.

| Deflexões da Seção B (unidade das deflexões - cm) |          |           |           |           |
|---|----------|-----------|-----------|-----------|
| Inst.   | Cota (m) | Dist. (m) | 24/jul 09 | 28/set/09 |
| EN-B01  | 2099,20  | 0,20      | -0,18     | -0,46     |
| EN-B02  | 2104,50  | 9,32      | -2,12     | -5,40     |
| EN-B03  | 2110,50  | 19,64     | 0,66      | 1,99      |
| EN-B04  | 2116,50  | 29,96     | 1,69      | 5,04      |
| EN-B05  | 2122,50  | 40,29     | 0,56      | 2,28      |
| EN-B06  | 2128,50  | 50,61     | -0,73     | -1,38     |
| EN-B07  | 2134,50  | 60,93     | -0,62     | -1,78     |
| EN-B08  | 2141,00  | 72,12     | 0,83      | 1,52      |
| EN-B09  | 2147,50  | 83,30     | 0,97      | 2,85      |
| EN-B10  | 2152,50  | 91,90     | -2,60     | -3,92     |
| EN-B11  | 2158,50  | 102,22    |           | -14,64    |

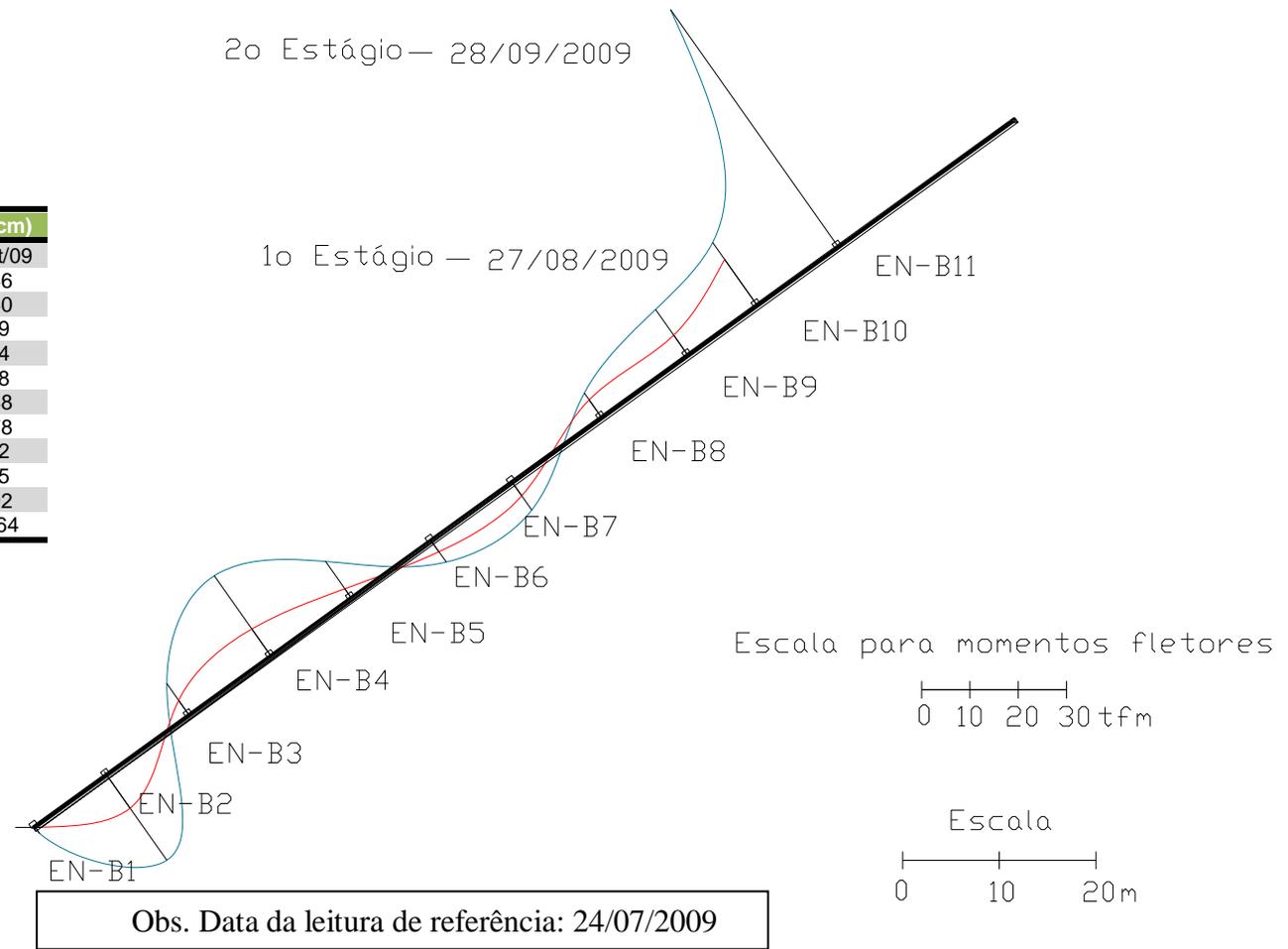


Figura 5.47 – Deflexões observadas na face de concreto em todos os estágios de instalação (Seção B).

## 5.5. Sistematização dos cálculos

Foi criada uma interface gráfica no Microsoft Excel para visualização dos gráficos gerados em cada seção. Os gráficos de rotação consistem na nuvem de pontos, enquanto os demais gráficos (deflexões e momentos fletores) foram obtidos a partir da integração e derivação da função polinomial obtida pela regressão através do método dos mínimos quadrados com restrições, no caso o momento nulo no contato da face de concreto com o plinto.

As telas da interface gráfica para a Seção A podem ser vistas nas Figuras 5.48, 5.49, 5.50 e 5.51, em diferentes funções de cálculo. O programa busca na planilha de dados as novas leituras e calcula os coeficientes, integrais e o produto da derivada pela rigidez da estrutura.

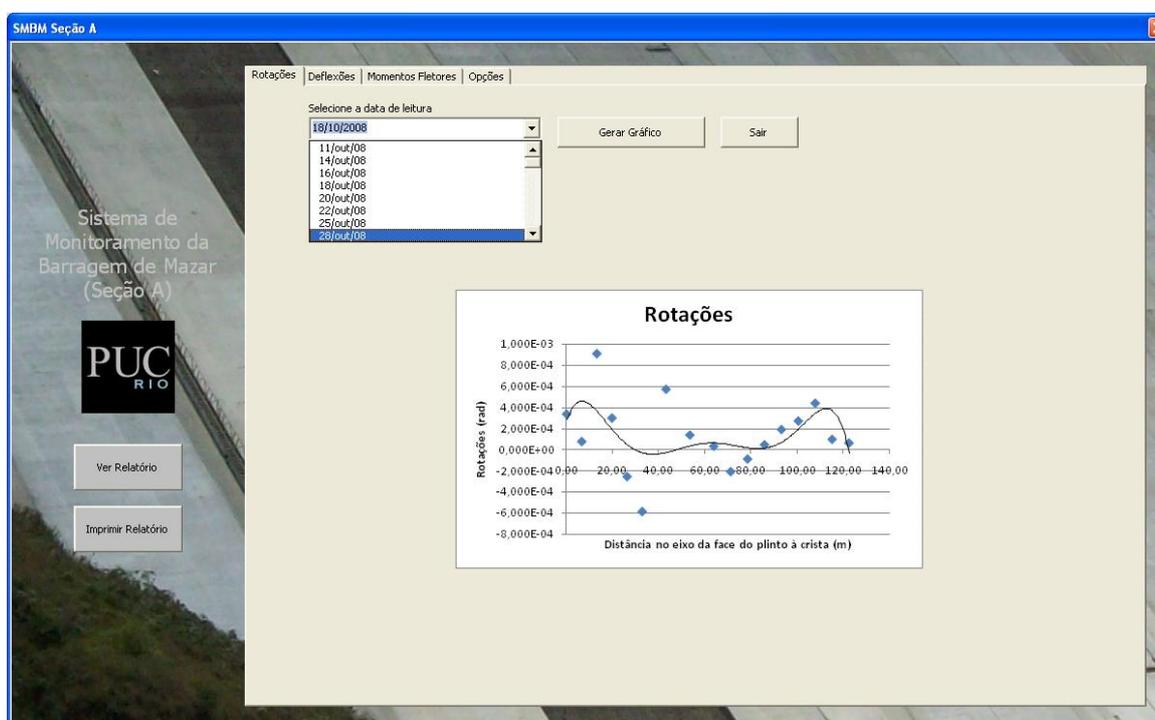


Figura 5.48 - Vista da tela da interface gráfica para o cálculo das rotações na Seção A.

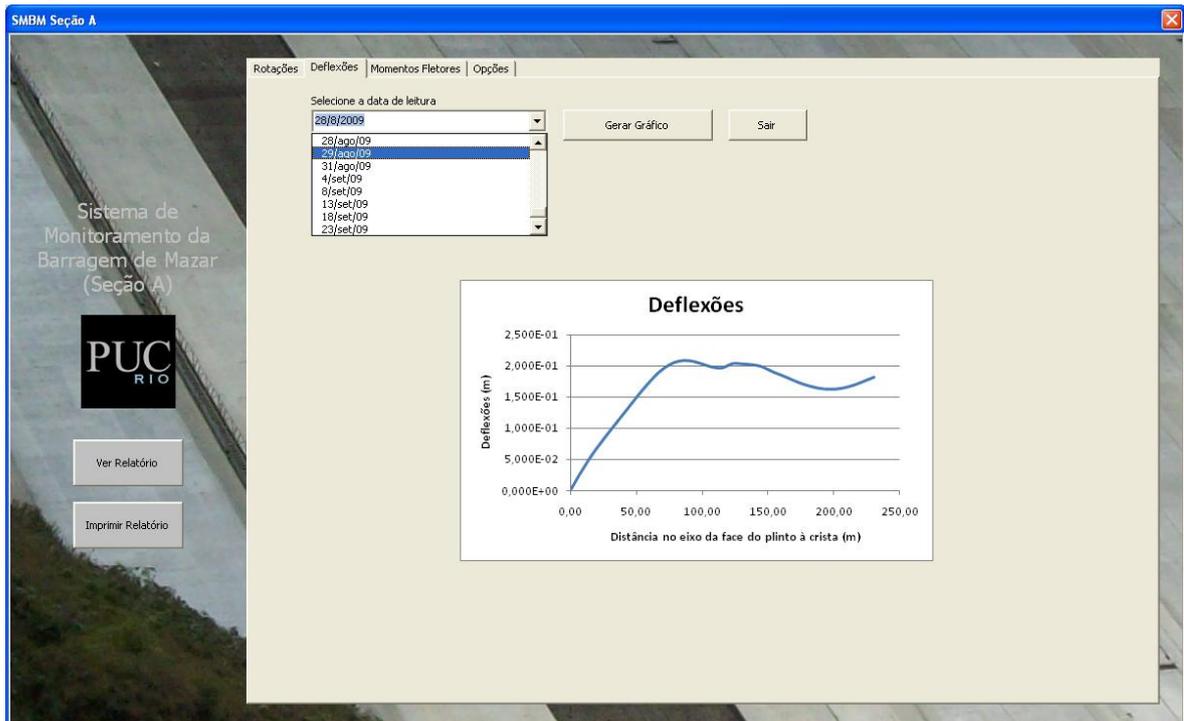


Figura 5.49 - Vista da tela da interface gráfica para o cálculo das deflexões na face de concreto na Seção A.

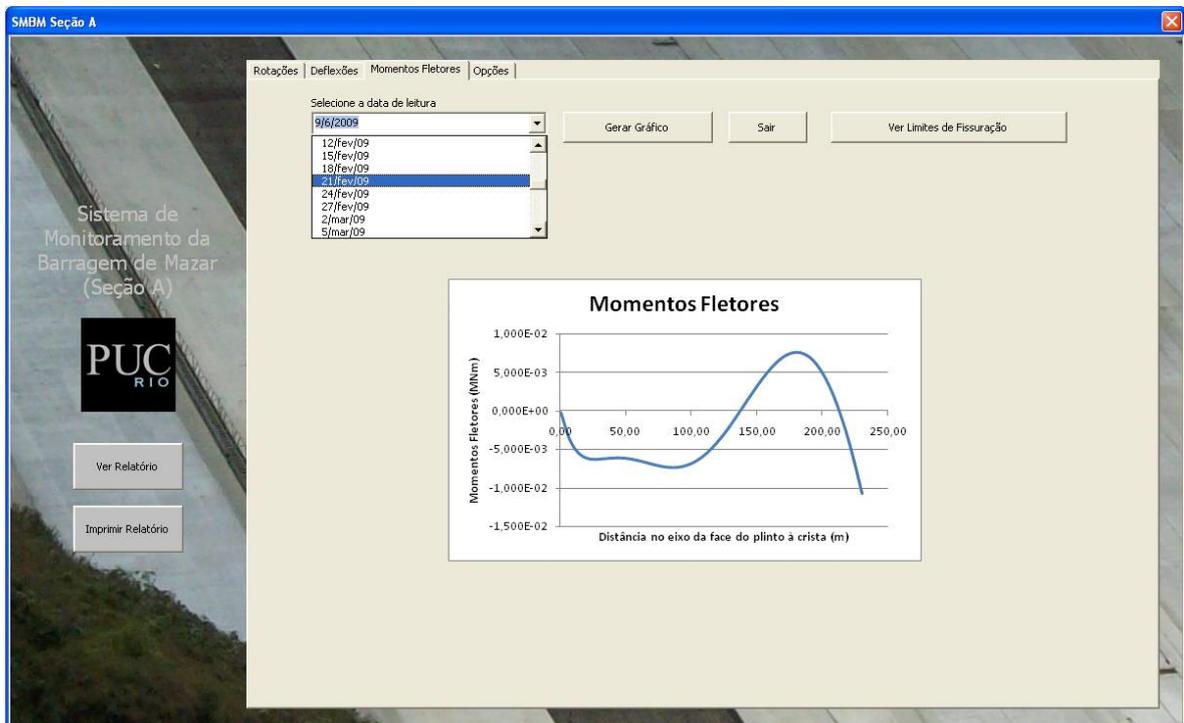


Figura 5.50 – Vista da tela da interface gráfica para o cálculo dos momentos fletores atuantes na face de concreto na Seção A.

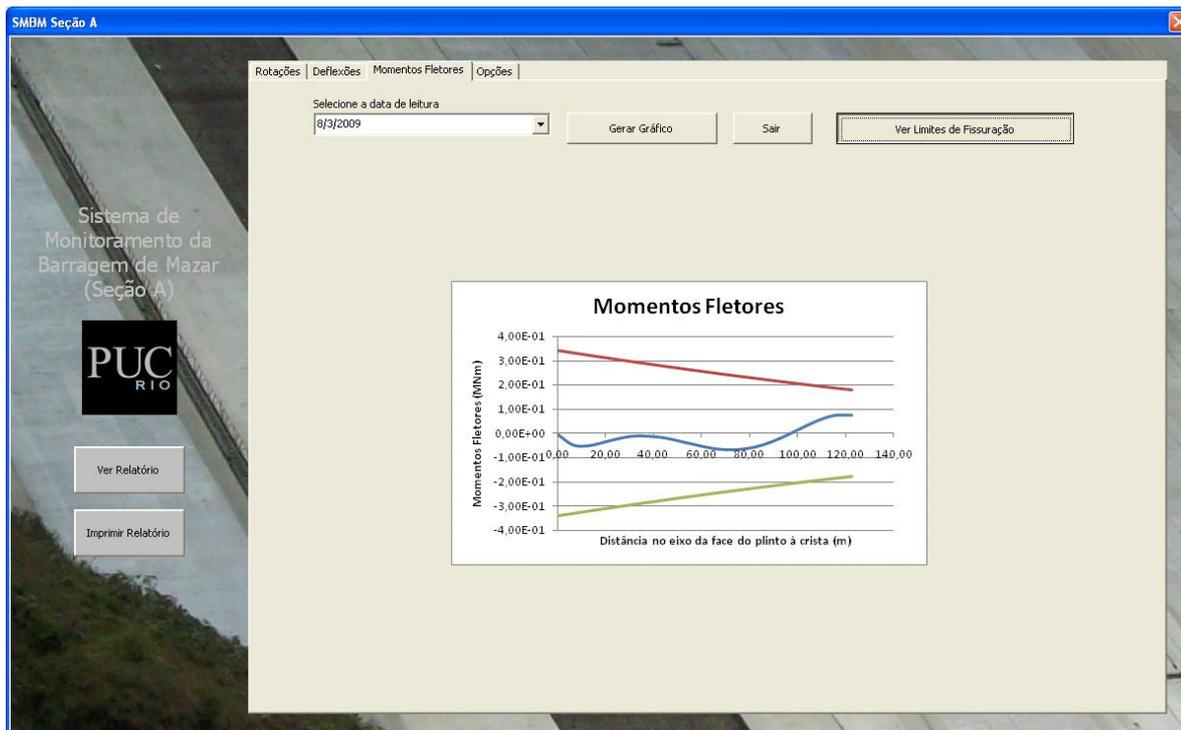


Figura 5.51 – Vista da tela da interface gráfica para o cálculo dos momentos fletores atuantes na face de concreto na Seção A e os limites teóricos de fissuração.

Podem ainda ser emitidos relatórios com informações a respeito das deflexões e momentos fletores atuantes em uma data escolhida, como deflexões máximas e mínimas, momentos máximos e mínimos, além dos gráficos. No Apêndice D consta um exemplo de um relatório gerado pelo programa, e no Apêndice E o código simplificado utilizado.