

## **5 RESULTADOS E ANÁLISE**

### **5.1. Introdução**

Este capítulo apresenta os resultados obtidos na etapa experimental e na aplicação em programa Plaxis do projeto, onde na pesquisa foi realizada à comparação dos resultados da etapa experimental com os resultados obtidos na etapa numérica, fazendo principalmente uma análise da compatibilidade.

Na etapa experimental foram executados três ensaios, onde se analisou principalmente a variação da espessura do corpo de prova.

Na etapa numérica foram realizadas 6 tipos de cálculo, onde se buscou analisar a influência da quantidade de drenos com a variação da permeabilidade do solo, além da fluência e a variação da vazão.

### **5.2. Etapa experimental**

Dos ensaios realizados no geocomposto drenante, neste caso o ensaio de transmissividade planar e também o ensaio de determinação da espessura, todos os resultados estão representados em gráficos para uma análise mais efetiva do comportamento do material.

#### **5.2.1. Ensaio de transmissividade planar**

Estes ensaios foram realizados em corpos de prova de dimensões 300 mm x 200 mm, do ensaio foram obtidos dados de vazão ao longo do tempo sob carregamento constante de 10 kPa.

Nas figuras 5.1, 5.2, 5.3 estão desenhadas os gráficos de fluência em compressão ao longo do tempo, para diferentes amostras, e na figura 5.4 se tem o resumo das três figuras.

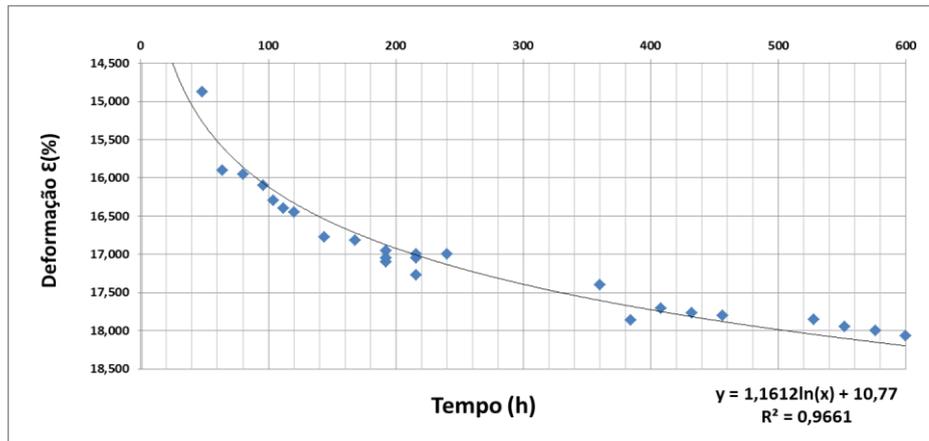


Figura 5.1 Curva de fluência a compressão, amostra 1.

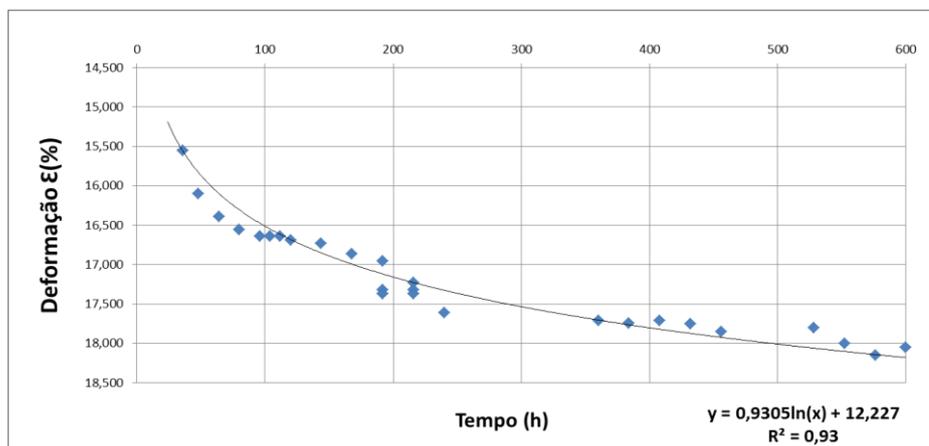


Figura 5.2 Curva de fluência a compressão, amostra 2.

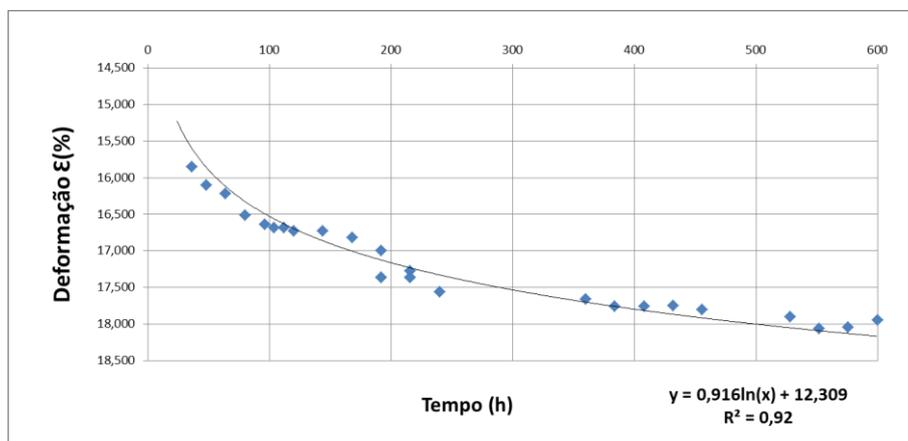
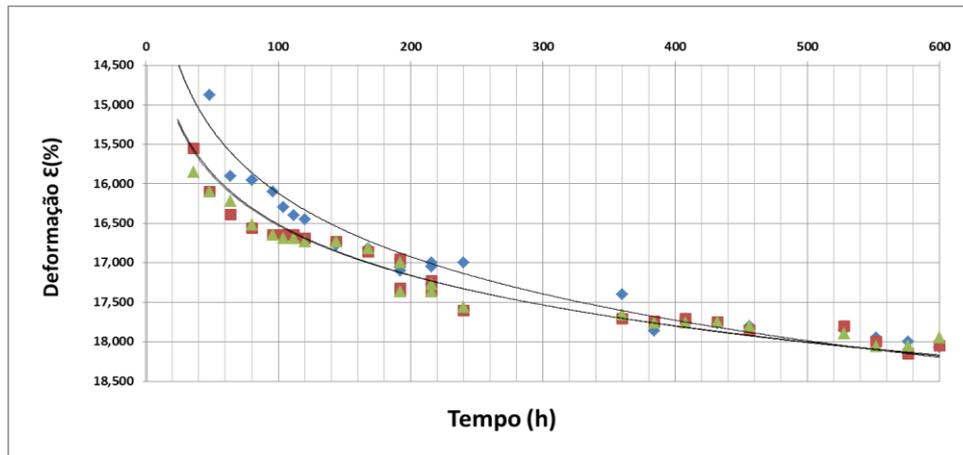


Figura 5.3 Curva de fluência a compressão, amostra 3

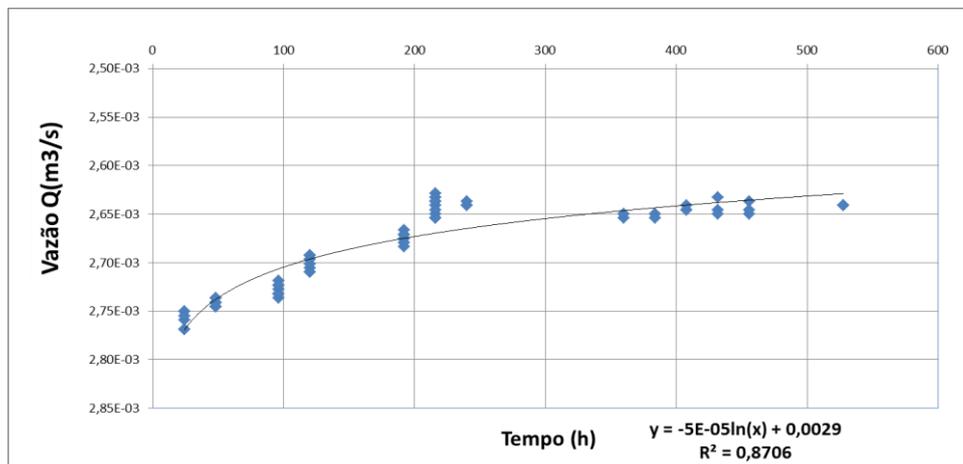


**Figura 5.4 Curva de fluência a compressão, amostras 1-2-3**

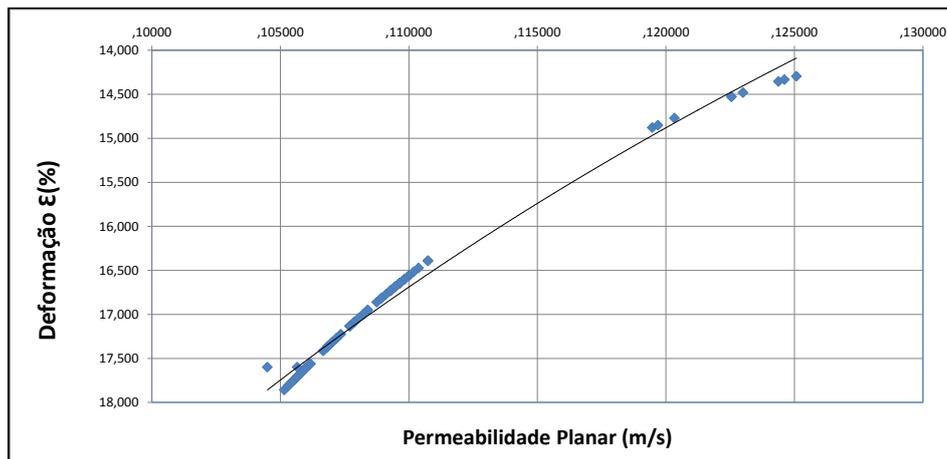
Como pode ser visto nas figuras 5.1, 5.2 e 5.3 a compressão ocorre em um tempo curto até as 300h a partir desse tempo até as 600h o acréscimo de variação da deformação é menor, mostrando nessa faixa pequena fluência em compressão.

Na figura 5.4 temos o quadro resumo que mostra o comportamento das figuras 5.1-2-3 sendo muito similar, existindo pouca variação.

Também foi analisada a variação da vazão ao longo do tempo, mostrado na figura 5.5, onde a vazão diminui à medida que a amostra vai se deformando com o carregamento aplicado de 10 (kPa).



**Figura 5.5 Curva de vazão para carregamento de 10 kPa**



**Figura 5.6 Curva deformação - permeabilidade**

Na figura 5.6 temos apresentado o comportamento da permeabilidade planar no geocomposto à medida que ele ia se deformando. Podemos ver que à medida que o corpo vai se deformando por compressão a permeabilidade planar no corpo vai diminuindo.

Avaliando-se a interação solo-geocomposto, pode-se dizer que os carregamentos aos quais o conjunto está submetido geram deformações que vão influenciar na capacidade de vazão, segundo as seguintes considerações:

- No caso do ensaio de permeabilidade planar e transmisividade, considerando um carregamento constante de 10 (kPa) e um gradiente também constante  $i=1$ , e a diferença de carga total entre o ingresso e a saída da máquina de ensaio  $H = 0.30$  m. Realizando a análise de fluência das amostras, tem-se que a amostra conseguiu se deformar 18.20% da espessura inicial, que foi 4,38 mm.

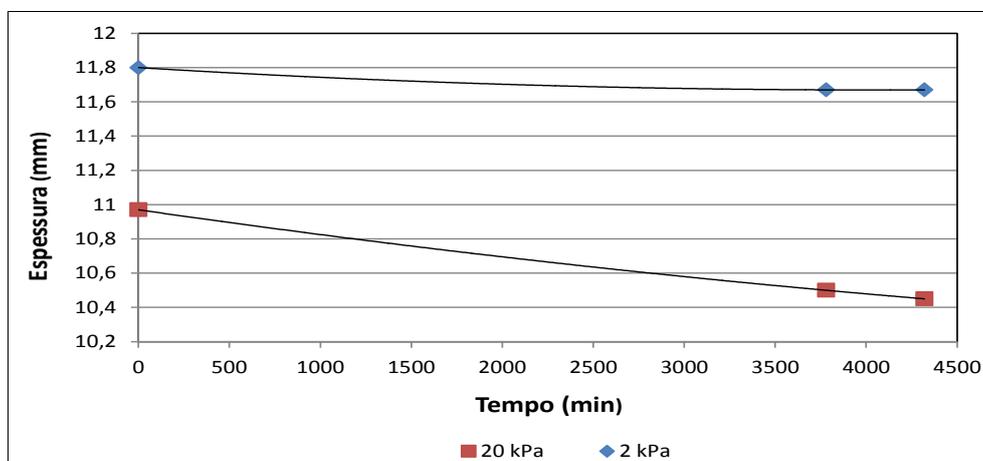
- Observa-se que se apresentam duas regiões bem marcadas de deformação, a primeira no início do ensaio apresenta uma deformação imediata de 14,5% até chegar ao valor de 17,5%, e na segunda o grau de deformação decresce até chegar ao valor de 18,20%.

- Avaliando-se a variação do fluxo ao longo do tempo temos o processo inverso, onde à medida que a amostra se deforma a vazão diminui. Esta diminuição é proporcional à deformação, apresentando também duas regiões bem marcadas de variação de vazão, a primeira decresce 10%, e a segunda chega a uma diminuição de capacidade de vazão de 16,5%.

### 5.2.2. Determinação da fluência por compressão da espessura

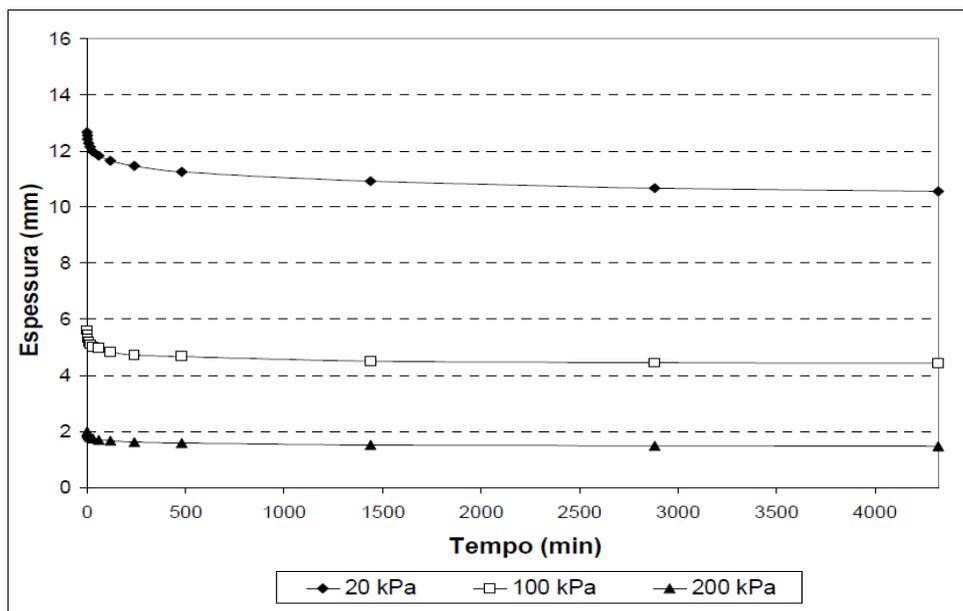
Foram realizados ensaios de fluência em compressão do geocomposto drenante para permitir uma melhor avaliação do seu comportamento quando instalado. Estes ensaios foram realizados em corpos de prova de dimensões de 100 mm x 100 mm, e foram utilizados dois diferentes níveis de tensões: 2 kPa e 20 kPa, as cargas foram aplicadas ao corpo de prova através de um elemento circular de diâmetro médio de 70,37 mm.

As curvas de fluência em compressão para uma camada de geocomposto se encontra na figura 5.7.



**Figura 5.7 Curvas do ensaio de fluência em compressão para 1 camada do geocomposto**

Para conferir os resultados obtidos da bibliografia se apresenta a figura 5.8 elaborado por Plácido da USP (2006), quem também verificou a fluência do geocomposto com a variação da espessura, no caso dele seus resultados foram apresentados para 20, 100 e 200 kPa de carregamento.



**Figura 5.8 Curvas do ensaio de fluência em compressão para 1 camada do geocomposto (Rafael Rivero Plácido USP)**

Como pode ser visto nas figuras 5.7 e 5.8, a compressão do geocomposto drenante ocorre em um tempo muito curto e se mantém praticamente constante ao longo do tempo, mostrando pequena fluência em compressão.

Do gráfico 5.7 para o carregamento de 2 (kPa) se apresenta uma deformação de 13%, e no caso do carregamento de 20 (kPa) apresenta uma maior deformação alcançando o valor de 17%, concluindo que a maior carregamento o grau de deformação também é maior.

### 5.3. Estudo de caso

Para a etapa numérica baseado num estudo de caso dado pela Maccaferri, para sistemas de drenagem subsuperficial em rodovias segundo o método de McClelland que determina a eficácia do geocomposto drenante MacDrain TD, foi feito a modelagem de dito estudo no programa PLAXIS usando os valores do estudo de caso e também os valores reais obtidos no laboratório referente à permeabilidade, e transmissividade ao longo do geocomposto, observando-se a variação da fluência ao longo do tempo, e a variação da vazão nos drenos (trincheira drenante) com o geocomposto. Adicionalmente foi feito o análise da

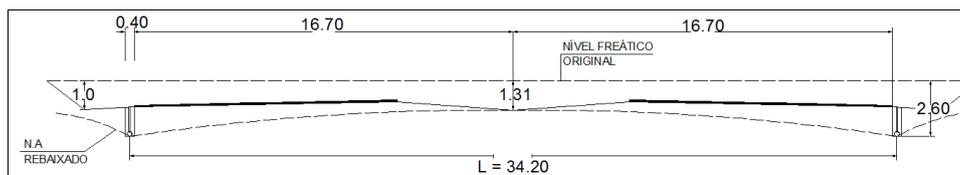
poro pressão no solo de subleito, e a verificação dos resultados obtidos com o estudo de caso proposto pela Maccaferri.

O estudo de caso apresentado descreve o dimensionamento de um sistema de drenagem por trincheira em rodovias usando o método de McClelland.



**Figura 5.9 Drenagem subsuperficial com geocomposto como trincheira drenante**

A metodologia de Mc Clelland foi utilizada para a determinação dos influxos subterrâneos que atingem os drenos profundos longitudinais por unidade de comprimento, bem como para prever o tempo necessário para estabilizar o nível rebaixado do lençol freático, considerando-se as condições da figura 5.10.



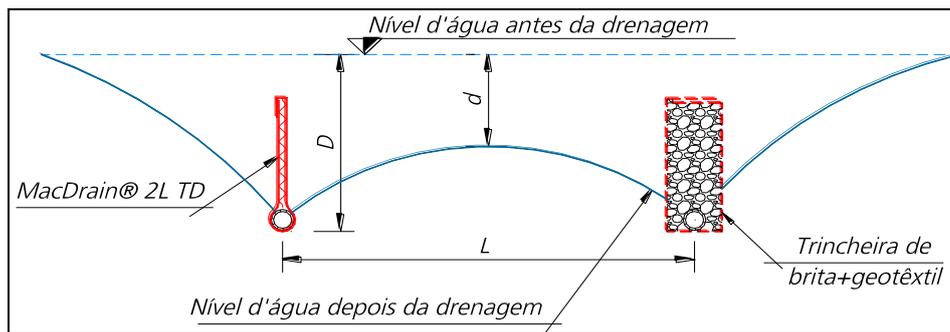
**Figura 5.10 Seção tipo que apresenta as condições de contorno para o exemplo**

O coeficiente de permeabilidade do solo foi considerado:  $k = 10^{-4}$  (cm/s).

#### 5.3.1.1. Relações de McClelland

Escolhida a solução de drenagem subsuperficial por trincheiras para rebaixamento do lençol freático em rodovias, cabe definir um método para

determinar o espaçamento e a profundidade das trincheiras. Um dos mais usados é o método prático criado por McClelland (1943), que permite obter, além dos parâmetros já citados, a vazão do sistema e uma estimativa do tempo necessário para o sistema entrar em regime e liberar a entrada de equipamentos no local. A figura 5.11 mostra o esquema de rebaixamento freático proposto por McClelland em suas pesquisas, proposição que condiz perfeitamente com a superfície freática em sua condição de equilíbrio.



**Figura 5.11 Representação do rebaixamento da superfície freática causado pela utilização de drenagem por trincheira.**

Onde:

$D$  = Diferença de cotas entre o lençol freático, antes da drenagem, e o N.A. máximo nos drenos (m).

$L$  = Distância entre os drenos (m).

$d$  = Rebaixamento mínimo do nível freático (m).

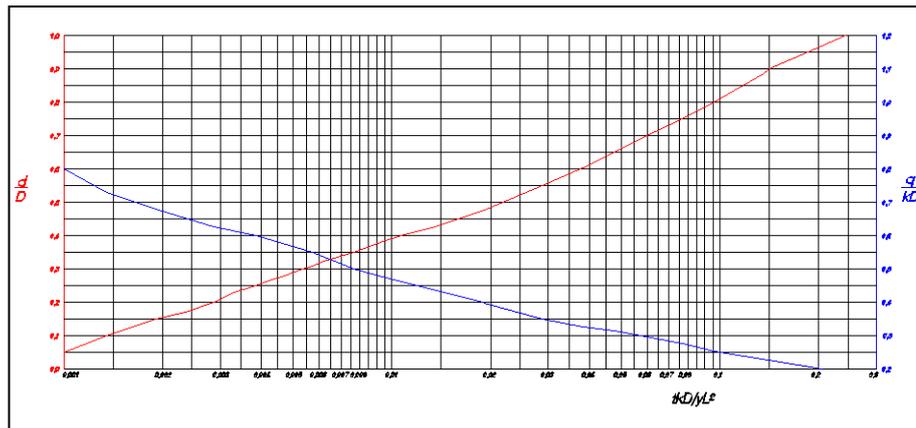
$k$  = Coeficiente de permeabilidade do solo (m/s)

$y$  = Relação entre volume de água livre e volume de solo, usualmente da ordem de 0,01, podendo variar de 0,05 (areias) a 0,02 (argilas)

$t$  = Tempo para estabilizar o nível do lençol rebaixado, em segundos.

### 5.3.1.2. Metodologia de cálculo

Por meio do ábaco da figura 5.12 ou da tabela 5.1, proposto por McClelland, é possível obter a vazão, por metro, que cada tubo inserido no dreno irá suportar e, com isso, dimensionar o sistema de drenagem necessário para captar e transportar o fluxo de águas gerado pelo rebaixamento do lençol freático.



**Figura 5.12** Ábaco interpolando as condições impostas pelo método proposto por McClelland (1943).

Da figura 5.12 foi feita a interpolação e foram obtidas as correlações mostradas na tabela 5.1.

**Tabela 5.1** Correlações obtidas pelas experiências de McClelland

$q/kD$	$tkD/yL^2$	$d/D$
0,8	10/mar	0,06
0,47	10/fev	0,37
0,25	10/jan	0,79

O valor de “y” estimado para o solo foi  $y = 0,035$ , a média entre solos argilosos  $y = 0,02$  e solos arenosos  $y = 0,05$ .

$$d/D = 0,58$$

$$tkD/w^2y = 0,036$$

$$q/Dk = 0,78$$

$$t = 654998 \text{ s} = 7,58 \text{ dias}$$

$$q = 1,755 \cdot 10^{-6} \cdot L$$

### 5.3.1.3.

#### Verificação da capacidade de vazão do MacDrain TD

Para se obter a capacidade de vazão do MacDrain TD, é necessário determinar a tensão a que este estará submetido. Adota-se, em favor da segurança, um valor aproximado para o coeficiente de empuxo no repouso  $k_0 = 0,40$ ; obtém-se assim a tensão horizontal efetiva:

$$P = \gamma \cdot h \cdot k_o = 18 \cdot 1,40 \cdot 0,4 = 10,00 \text{ kPa}$$

Em que:

$\gamma$  é o peso específico do solo, em  $\text{kN/m}^3$ ;

$h$  é a altura da trincheira, em m.

Utilizando a ficha técnica do Mac Drain TD (Tabela 5.1), obtêm-se os seguintes valores para o gradiente hidráulico igual a 1:

**Tabela 5.2 Capacidade de vazão do Mac Drain TD**

Pressão (kPa)	Vazão(l/s.m)
10	2,84
20	2,17
50	1,35
100	0,41

Verificando o dado obtido com os valores da Tabela 5.2, obtêm-se, para  $P = 10 \text{ kPa}$ , uma capacidade de vazão (favoravelmente à segurança) de  $2,84 \text{ l/s.m}$  para o Mac Drain TD.

Pelas normas, tem-se que aplicar os seguintes fatores de redução para o geocomposto drenante MacDrain.

$$FR_{IN} = 1,05 \text{ (Intrusão do solo)}$$

$$FR_{CR} = 1,20 \text{ (Fluência – CREEP)}$$

$$FR_{CC} = 1,10 \text{ (Colmatação química)}$$

$$FR_{BC} = 1,15 \text{ (Colmatação biológica)}$$

Com isso obtêm-se a vazão admissível do sistema utilizado MacDrain TD:

$$Q_{AdmMacDrain} = Q_{MacDrain} / (FR_{IN} \cdot FR_{CR} \cdot FR_{CC} \cdot FR_{BC}) = 1,78 \text{ l/s.m}$$

A vazão encontrada  $1,78 \text{ l/s.m}$ , representa a vazão admissível para a trincheira com MacDrain.

#### 5.4. Análise dos cálculos

Para fazer uma análise mais detalhada de avaliação da variação da fluência com a capacidade de vazão na interação solo-geossintético, foi feita a modelagem do solo da estrutura de pavimento com o sistema de drenagem (trincheira

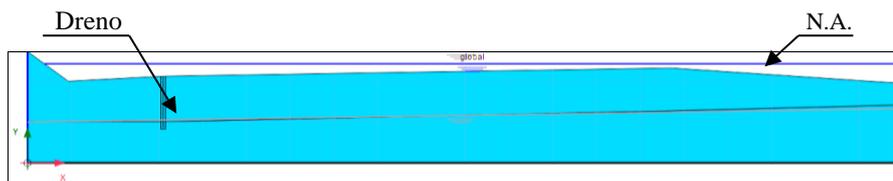
drenante), apresentada no estudo de caso, onde se calculou o rebaixamento do lençol freático desde uma altura de 0.5 m acima da estrutura de pavimento em todos os casos.

Como foi explicado no capítulo 4 foram realizados seis casos de modelagens onde foi modificada a permeabilidade e também o número de drenos.

Por se tratar de uma seção simétrica, foi calculada a sua metade como pode ser visto na figura 5.10, tendo os casos 1-1, 2-1, 3-1 que foram calculados adotando a permeabilidade do estudo de caso  $k=10^{-6}$ (m/s), e os casos 1-2,2-2, 3-2 calculados com a permeabilidade obtida no laboratório  $k=0,125$ (m/s).

#### 5.4.1. Caso 1-1

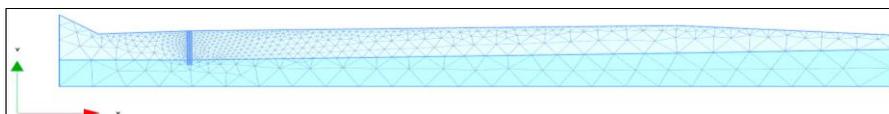
Baseado no estudo de caso do manual técnico da Maccaferri (2009), onde se adotou a seção de cálculo mostrada na figura 5.13, e apresenta um dreno.



**Figura 5.13** Seção de cálculo do solo para 1 dreno

#### 5.4.2. Malha

São apresentados elementos triangulares de 15 nós, e a malha se encontra refinada na interação solo geocomposto drenante, como mostra a figura 5.14.



**Figura 5.14** Malha da seção de cálculo

#### 5.4.3. Modelo utilizado

O modelo utilizado foi o Soft Soil Creep como foi descrito no capítulo 4, recomendado para o análise de variação da fluência em um sistema acoplado fluxo-deformação.

Na modelagem as propriedades do solo usadas foram às mesmas utilizadas por Durán em 2012, e que estão mostradas na tabela 5.3.

**Tabela 5.3 Propriedades do solo, caso 1.**

$\gamma_{\text{sat}}$ (kN/m <sup>3</sup> )	19.60
$\gamma_{\text{unsat}}$ (kN/m <sup>3</sup> )	15.55
Parâmetros de resistência	
$c'_{\text{ref}}$ (kPa)	20
$\phi'$ (°)	25
$\psi$ (°)	0

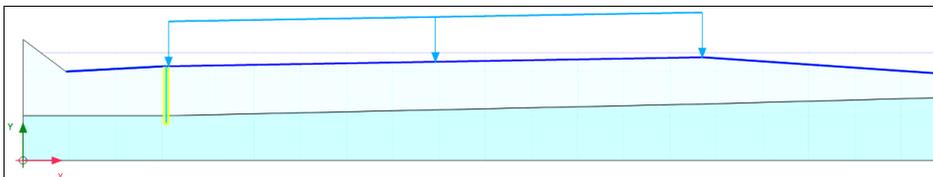
#### 5.4.4. Propriedades hidráulicas

As propriedades hidráulicas do modelo a ser analisado são mostradas na tabela 5.4, que correspondem aos valores dados no estudo de caso.

**Tabela 5.4 Propriedades hidráulicas do solo, caso 1**

Parâmetros	
$k_x$ (m/dia)	0,08640
$k_y$ (m/dia)	0,08640
$-\Psi_{\text{unsat}}$ (m)	1,00E+04
$e_{\text{init}}$	0,75

#### 5.4.5. Condições de contorno:



**Figura 5.15 Aplicação de carregamento e condições de contorno**

Por se tratar de análise da fluência na interação solo geocomposto drenante, o modelo de cálculo foi submetido à um carregamento estático de 10 (kN/m) e as condições de contorno vão estar dadas para fluxo e deslocamentos:

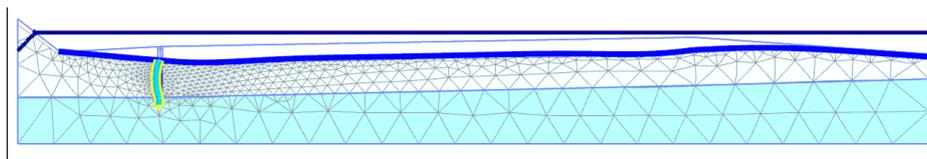
- Fluxo:
  - Base: impermeável
  - Laterais: permeável
  - Topo: pressão nula
- Deslocamentos:
  - Laterais:  $u_x=0$
  - Base:  $u_x=u_y=0$

#### 5.4.6. Resultados

Dos resultados obtidos foram analisados os fatores de maior efeito na interação solo-geocomposto drenante, por se tratar de um caso de drenagem com material elástico, foi feita à análise de deslocamentos, a variação da poro pressão e a variação da vazão de descarga de rebaixamento do lençol freático ao longo do tempo.

#### 5.4.7. Análise da fluência

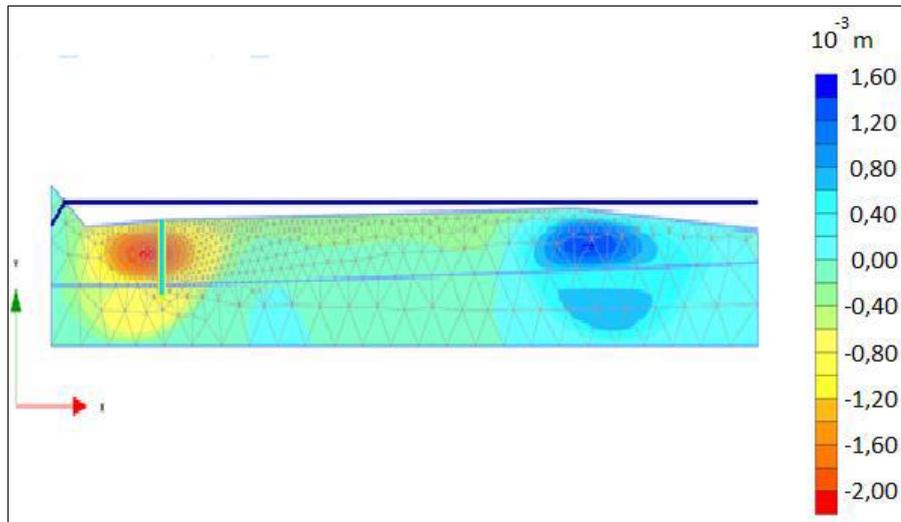
Foi analisada como primeira variante a fluência na interação solo-geossintético, que ela acrescenta à medida que o lençol freático vai diminuindo.



**Figura 5.16 Seção deformada**

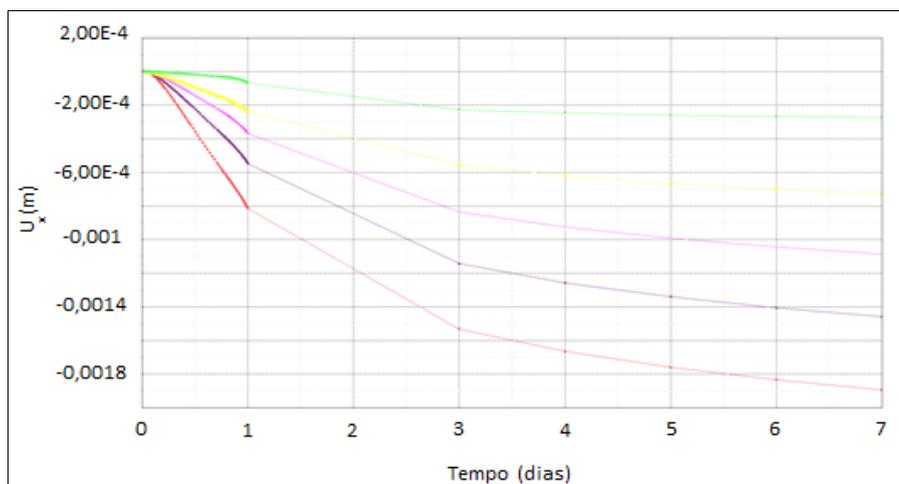
Neste caso por se tratar de um sistema de drenagem com geossintético em trincheira, vamos dar maior ênfase na análise da deformação e do deslocamento horizontal já que esses dois parâmetros vão refletir a variação da espessura do dreno.

Na figura 5.17 se apresenta a variação de deslocamentos, e podemos ver que a região crítica está na interação solo-geocomposto, que é a região vermelha, e a menos afeitada de cor azul.



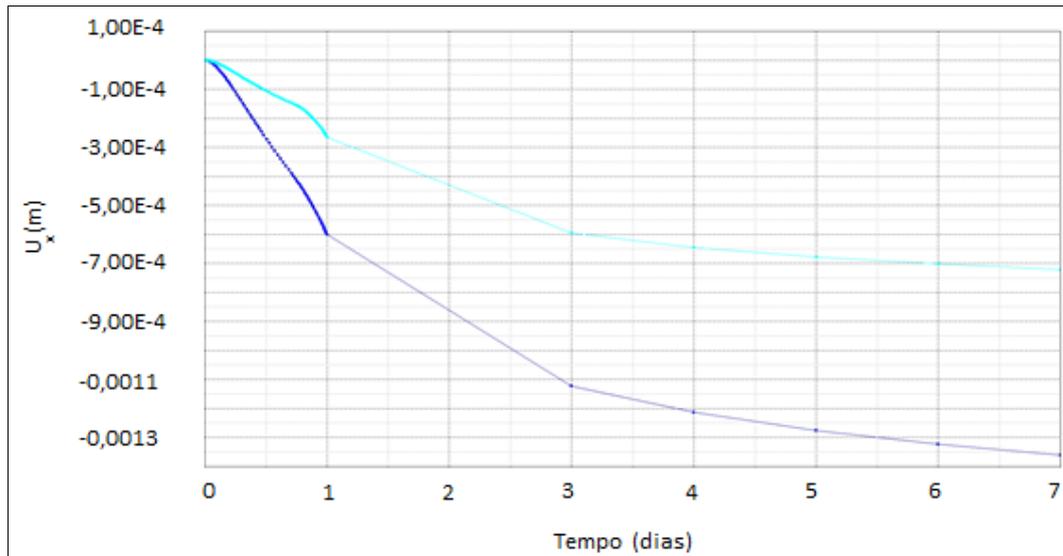
**Figura 5.17** Gráfico de deslocamento solo-geossintético

Também foi desenhada a variação dos deslocamentos ao longo do tempo como é mostrado na figura 5.18, sendo maior na região da interação solo-geocomposto, e diminui à medida em que se afasta.



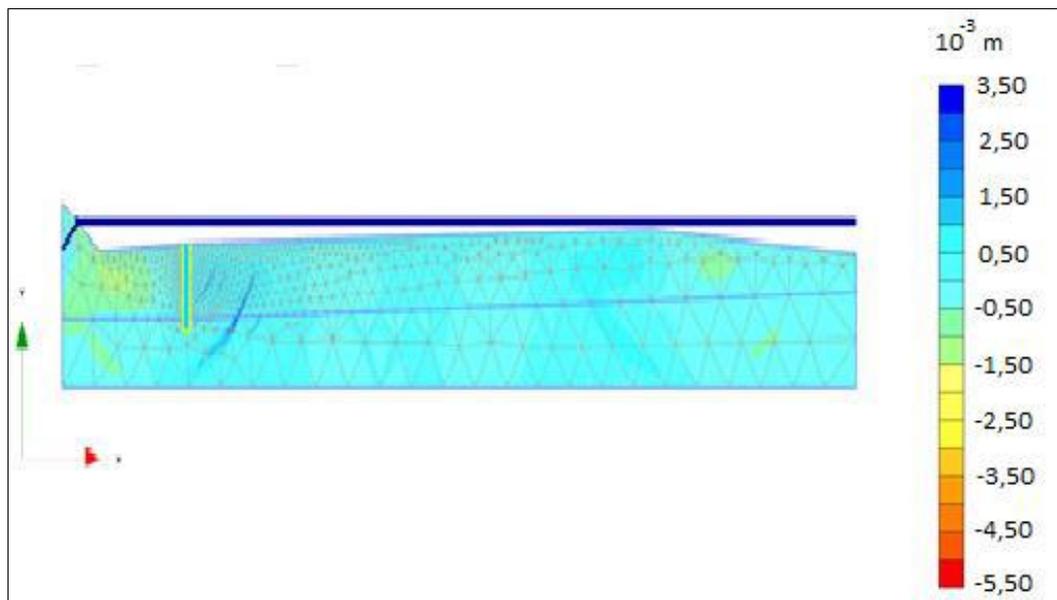
**Figura 5.18** Gráfico de deslocamento solo-geossintético

Na figura 5.19 também se apresenta a variação dos deslocamentos no solo, sendo os valores menores aos obtidos na figura 5.18.



**Figura 5.19** Gráfico de deslocamento no solo

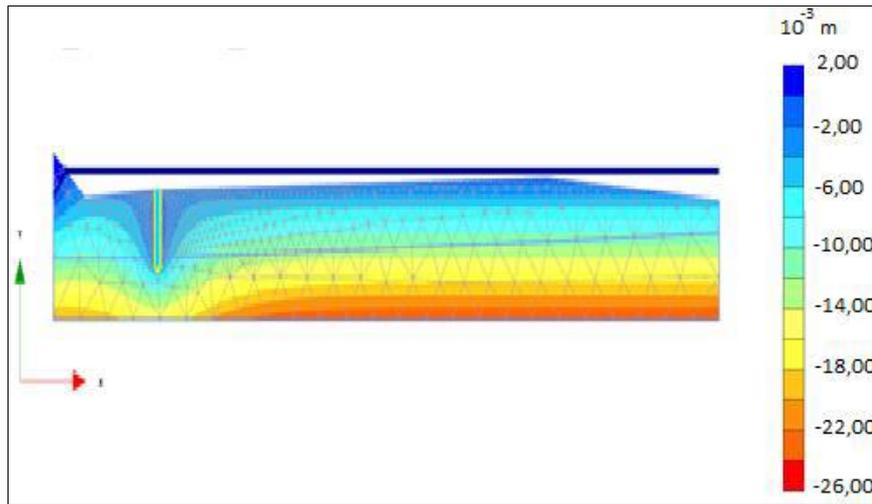
Foi analisada a variação das deformações horizontais mostrada na figura 5.20, apresentando valores baixos e principalmente geradas pelo dreno que é um material elástico.



**Figura 5.20** Gráfico de deformações no solo  $\epsilon_{xx}$

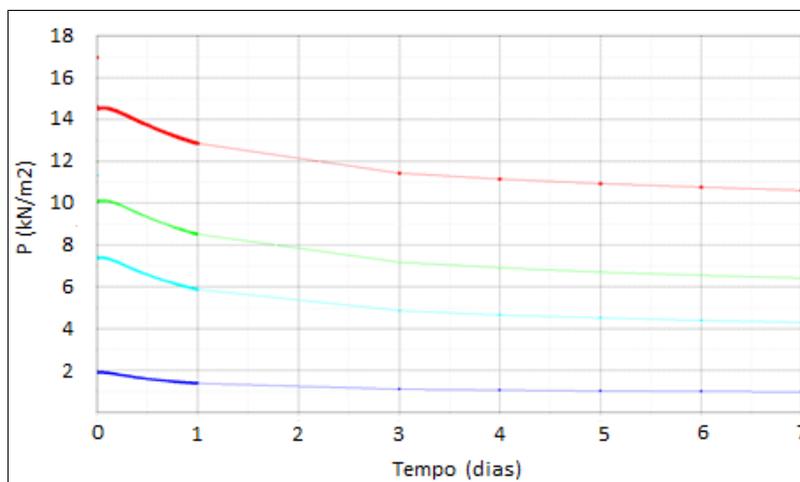
#### 5.4.8. Análise de fluxo

Foi estudado também o comportamento do fluxo, na figura 5.21 se apresenta a variação da poropressão que na interação do solo com o geocomposto é menor, e vai crescendo o valor à medida que se afasta do dreno.



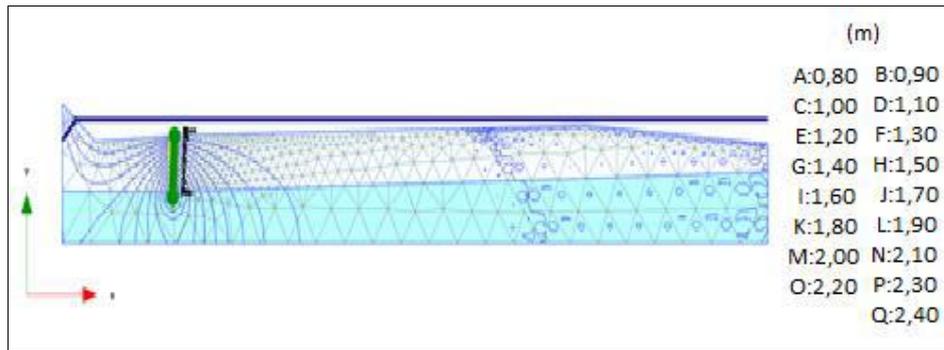
**Figura 5.21 Gráfico de variação da Poro pressão**

Na figura 5.22 foi desenhada a variação da poropressão ao longo do tempo, sendo menor na região de interação solo-geocomposto, e o valor cresce conforme afasta-se do dreno. Da figura também podemos ver que a poro pressão vai diminuindo à medida que o lençol freático vai rebaixando e que fica constante no sétimo dia onde se conseguiu rebaixar o nível, mas este cálculo é uma aproximação, já que o dreno ainda continua trabalhando, uma vez que a poropressão vai permanecer constante.

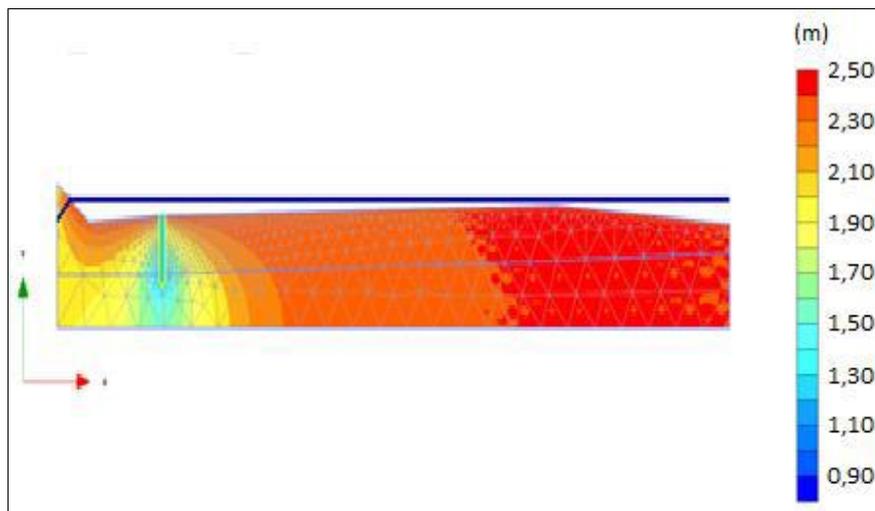


**Figura 5.22 Variação da poro pressão com a espessura do solo**

Na figura 5.23 foi desenhada a rede de fluxo para o sistema de drenagem, onde está traçada até onde o dreno conseguiu atingir o fluxo do solo saturado.

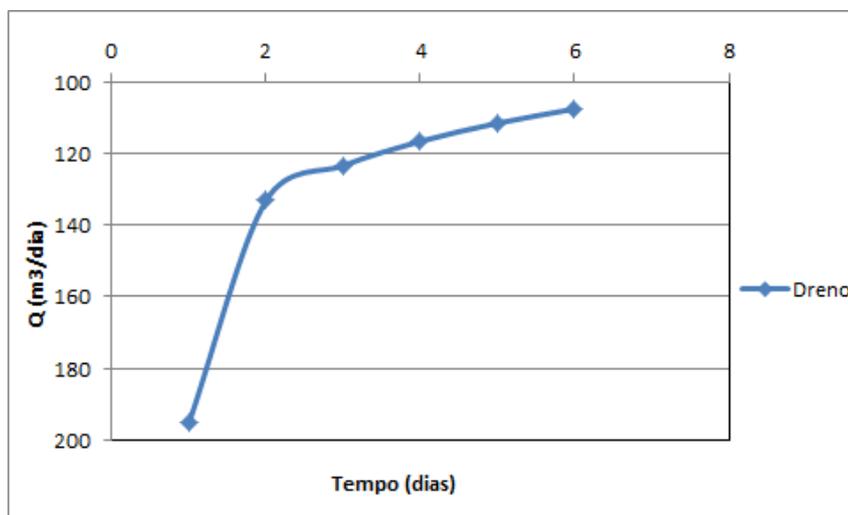


**Figura 5.23** Gráfico da região atingida pela rede de fluxo



**Figura 5.24** Variação da rede de fluxo

Assim também temos a figura 5.24, que mostra a região atingida pelo sistema de drenagem, onde podemos ver a região vermelha ainda se encontra saturada, e para conseguir atingir toda essa região nos seguintes casos se acrescentou o número de drenos, o que será visto nos próximos incisos.

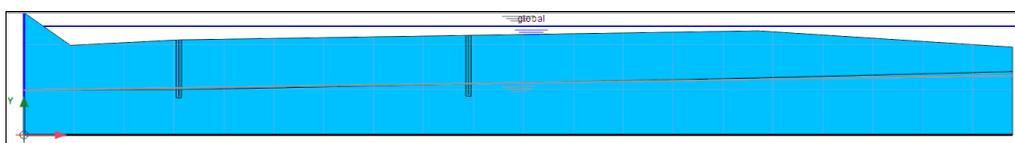


**Figura 5.25** Curva da vazão ao longo do tempo

Na figura 5.25 foi analisada a variação da vazão ao longo do tempo, onde diminui com o aumento da deformação para o carregamento aplicado de 10 (kN/m).

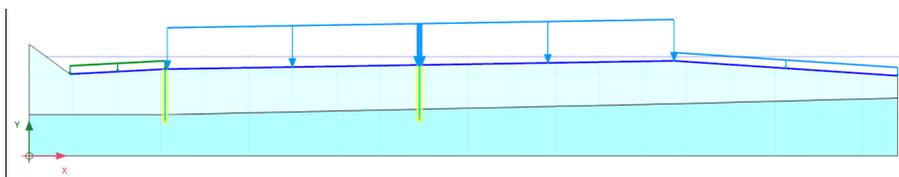
### 5.5. Caso 2-1

Foi adotada a seção mostrada na figura 5.26. (Neste caso os cálculos foram feitos para dois drenos).



**Figura 5.26 Seção de cálculo do solo para 2 drenos**

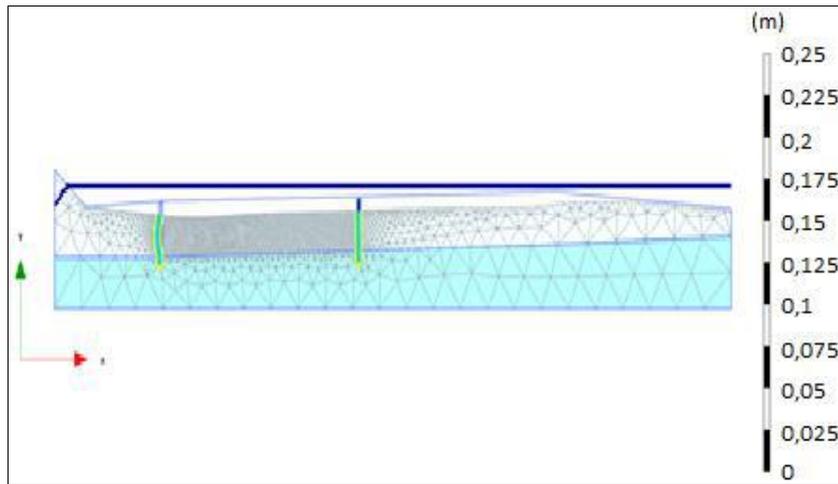
Para as propriedades físicas e hidráulicas do solo, o modelo utilizado e as condições de contorno foram as mesmas usadas no caso 1-1, e o carregamento utilizado também foi de 10 (kN/m), como é mostrado na figura 5.27.



**Figura 5.27 Aplicação de carregamento e condições de contorno**

#### 5.5.1. Análise da fluência

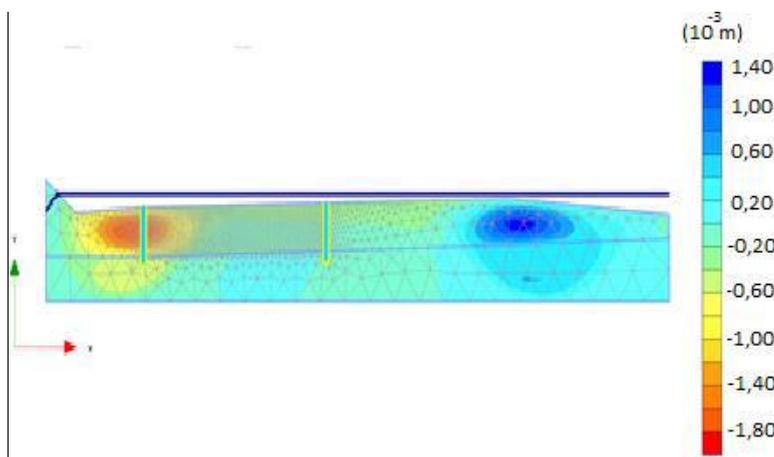
Como o ponto de interesse a ser analisada é a fluência na interação solo-geocomposto concluímos que as deformações aumentam à medida que o lençol freático vai rebaixando.



**Figura 5.28 Seção deformada Solo-geossintético**

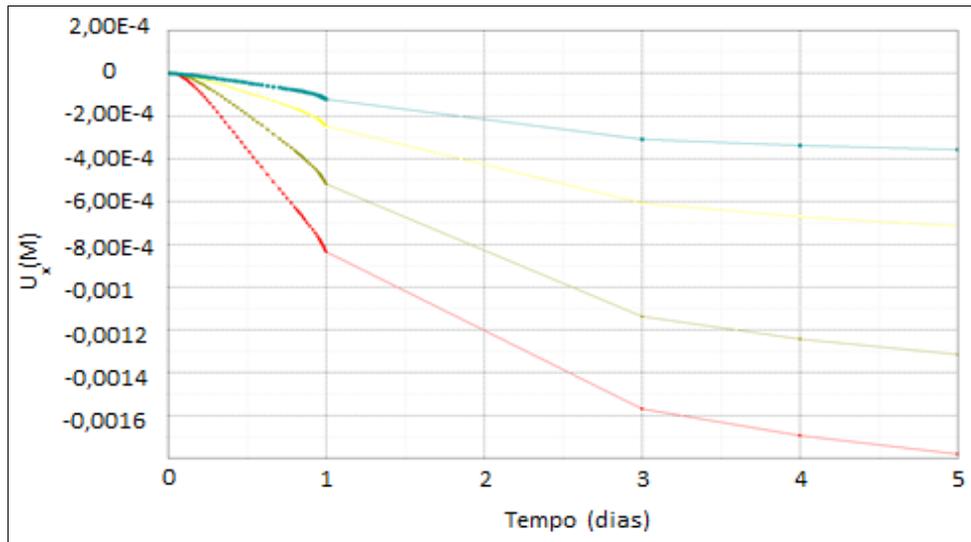
A figura 5.29 apresenta a variação de deslocamentos horizontais, sendo a região crítica a interação solo-geocomposto e a região vermelha indica o deslocamento do primeiro dreno apresentando maiores deslocamentos. O dreno do meio apresenta deslocamentos menores, reduzido de 70% aproximadamente.

Na região mais crítica que é a vermelha os valores de deslocamento que apresentam são de 2 mm, então o geossintético vai comprimir esse valor aproximadamente, que está dentro da faixa calculada no laboratório que foi de 4,35 mm o valor do deslocamento.



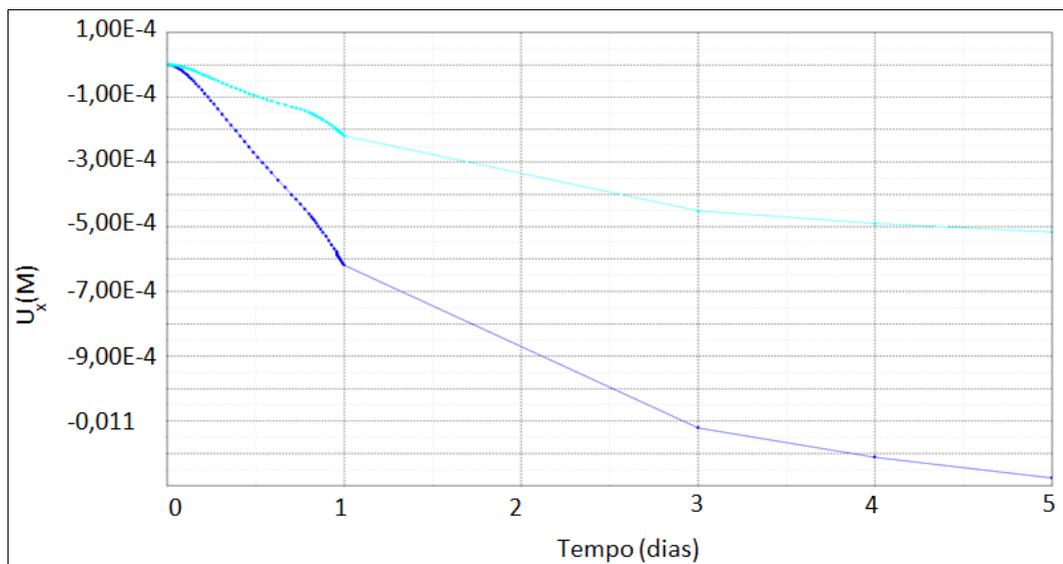
**Figura 5.29 Deslocamento solo-geossintético**

Também foi desenhada a variação dos deslocamentos ao longo do tempo como mostrado na figura 5.30, sendo maior na interação solo-geocomposto diminuindo à medida que se afasta.



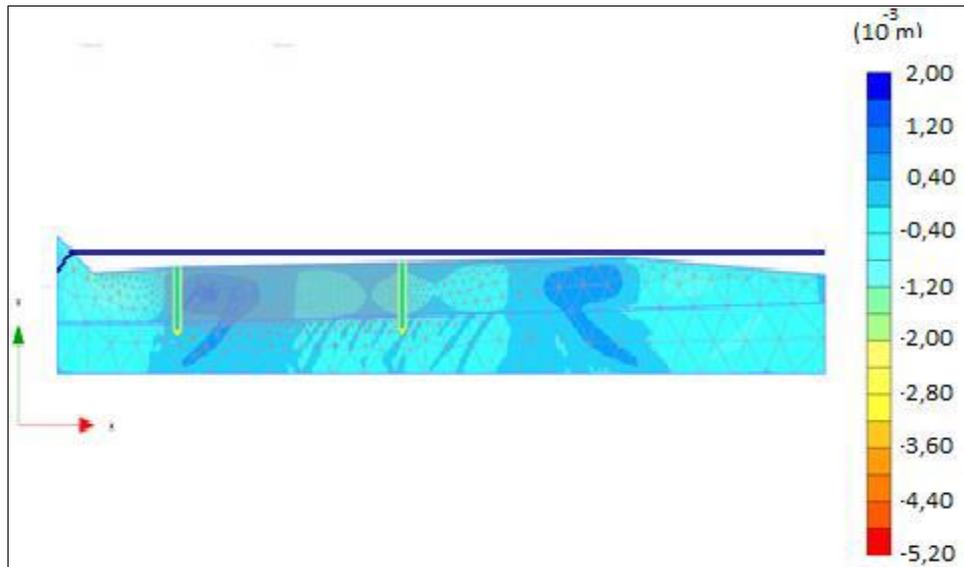
**Figura 5.30 Deslocamento solo-geocomposto drenante**

Na figura 5.31 também apresenta a variação dos deslocamentos no solo, sendo os valores menores aos obtidos na figura 5.30, mas o comportamento é o mesmo.



**Figura 5.31 Gráfico de deslocamento no solo**

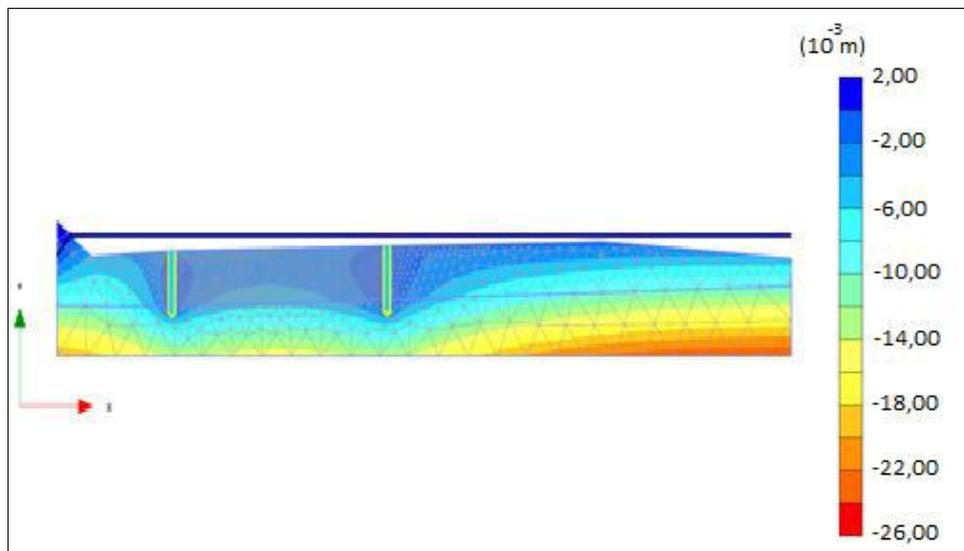
Foi analisada a variação das deformações horizontais mostrado na figura 5.32, apresentando valores baixos e principalmente gerados pelos drenos que são materiais elásticos.



**Figura 5.32** Gráfico de deformações no solo  $\epsilon_{xx}$

### 5.5.2. Análise de fluxo

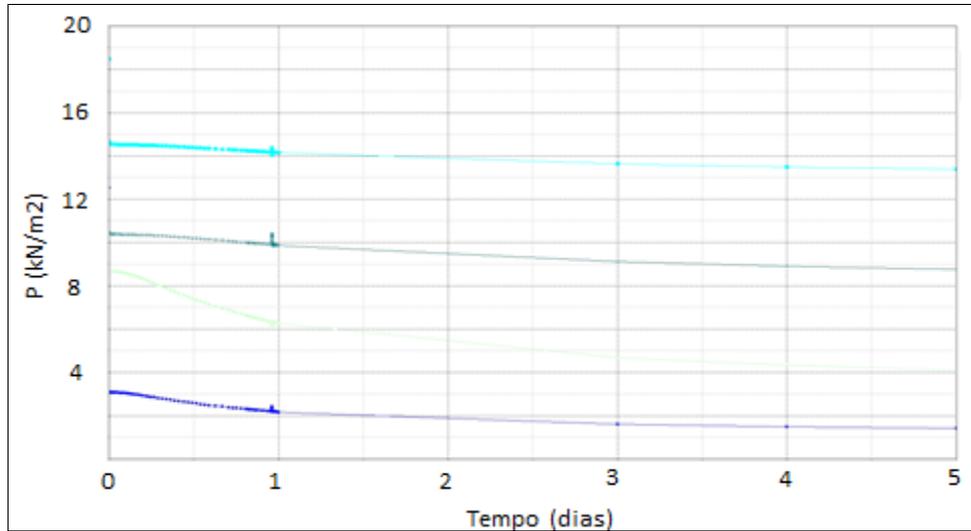
Dos cálculos referente ao fluxo, na figura 5.33 se apresenta a variação da poro pressão que na interação do solo com os drenos é menor, e vai aumentando à medida que se afasta, o comportamento é o mesmo na poro pressão para um ou dois drenos.



**Figura 5.33** Gráfico de variação da Poro pressão

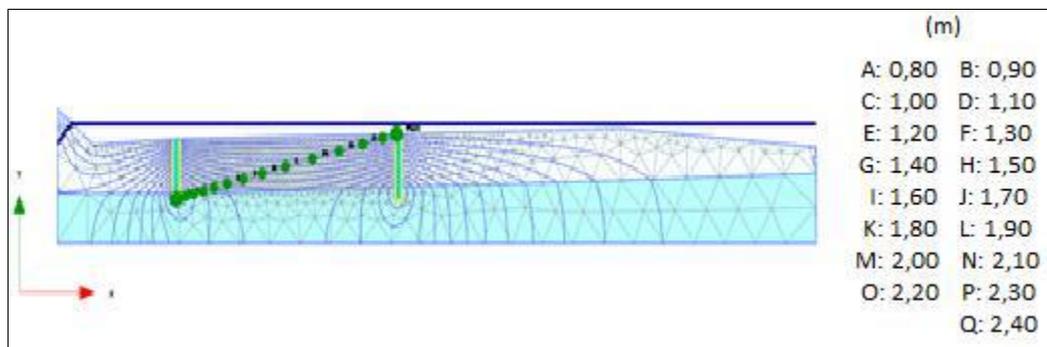
Na figura 5.34 foi desenhado a variação da poro pressão ao longo do tempo, sendo menor na região da interação solo-geocomposto, e vai aumentando à medida que se afasta.

Também podemos ver que a poro pressão vai diminuindo à medida que o lençol freático vai rebaixando e que fica constante no quinto dia onde se conseguiu rebaixar o nível, mas este cálculo é uma aproximação já que o dreno ainda continua trabalhando uma vez que o fluxo vai ser menor.



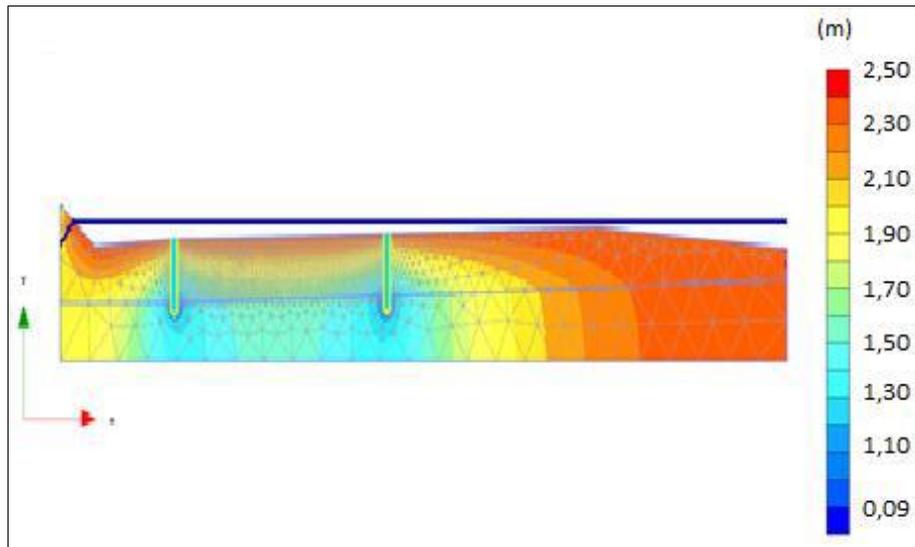
**Figura 5.34 Gráfico de variação da poro pressão**

Na figura 5.35 foi desenhada a rede de fluxo para o sistema de drenagem, onde a rede está traçada até onde o dreno consegue atingir o fluxo do solo saturado.

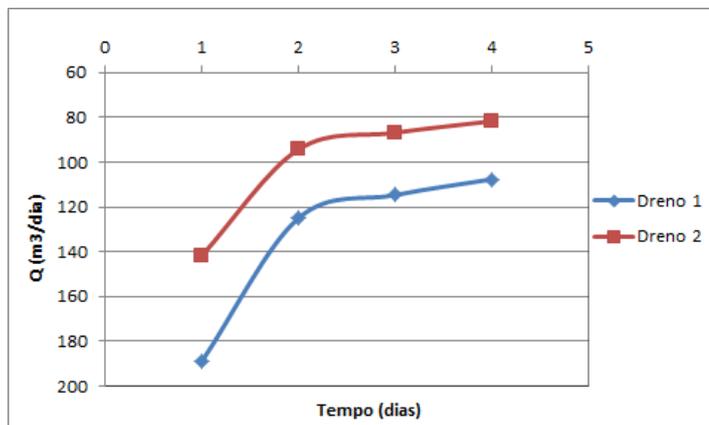


**Figura 5.35 Gráfico de variação da rede de fluxo**

Assim também temos a figura 5.36, que mostra a região atingida pelo sistema de drenagem sendo maior em comparação com o caso 1-1, mas ainda se tem a região vermelha que indica solo saturado, e para conseguir atingir toda essa região, teve que acrescentar mais um dreno, o que será visto no seguinte inciso.



**Figura 5.36 Gráfico da região atingida pela rede de fluxo**

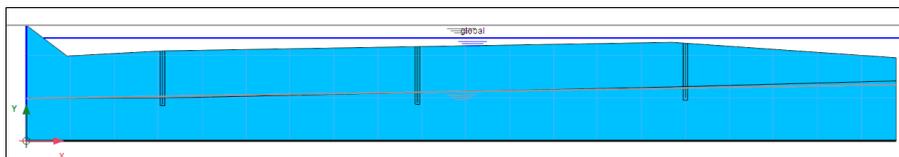


**Figura 5.37 Curva da vazão ao longo do tempo**

Na figura 5.37 foi analisada a variação da vazão ao longo do tempo, onde a vazão diminui com o aumento da deformação nos dois drenos, porém, no caso do dreno 2 a vazão transportada é menor.

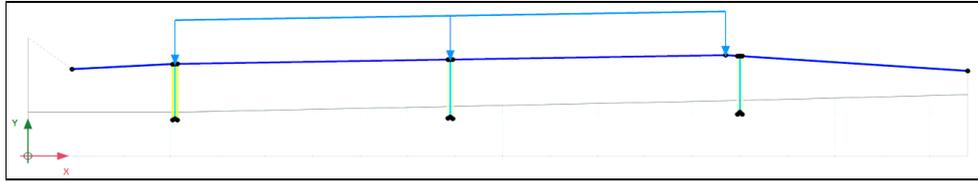
## 5.6. Caso 3-1

Foi adotada a seção mostrada na figura 5.38, e o cálculo foi feito para três drenos.



**Figura 5.38 Seção de cálculo do solo para 3 drenos**

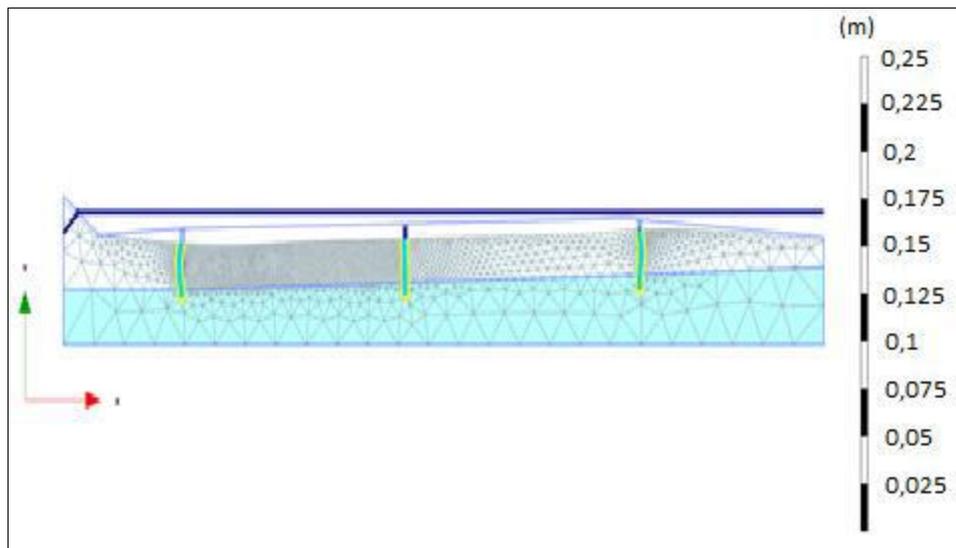
Para as propriedades físicas e hidráulicas, o modelo utilizado e as condições de contorno foram as mesmas usadas nos casos 1-1 e 2-1, e o carregamento para o cálculo também foi de 10 (kN/m), conforme mostrado na figura 5.39.



**Figura 5.39 Condições do modelo de cálculo**

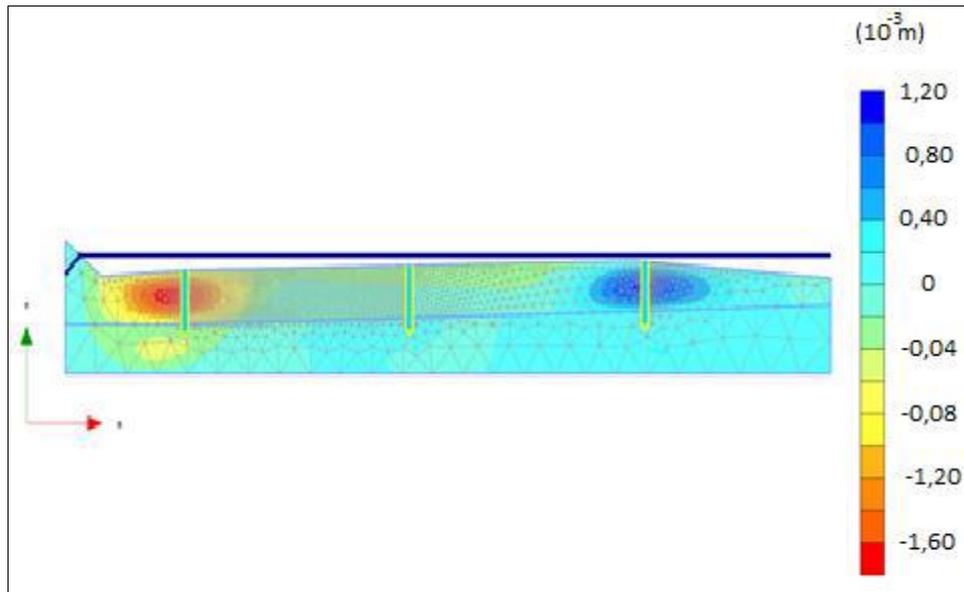
### 5.6.1. Análise da fluência

A fluência na interação solo-geocomposto, aumenta à medida que o lençol freático vai rebaixando.



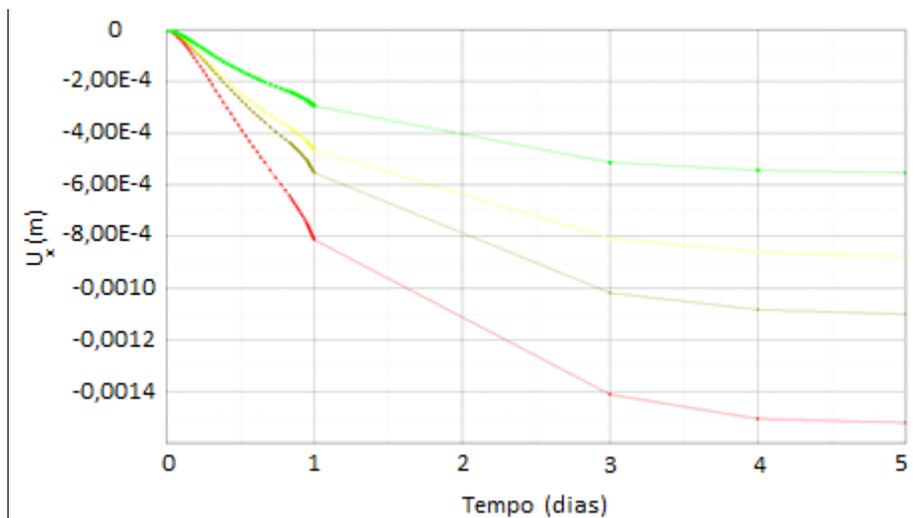
**Figura 5.40 Seção deformada do solo-geocomposto**

Na figura 5.41 é apresentada a variação de deslocamentos, e podemos ver que a região crítica está novamente na interação solo-geocomposto, que é a região vermelha e azul, no primeiro e terceiro dreno. No caso do segundo dreno que está no meio, é apresentada deslocamentos menores.



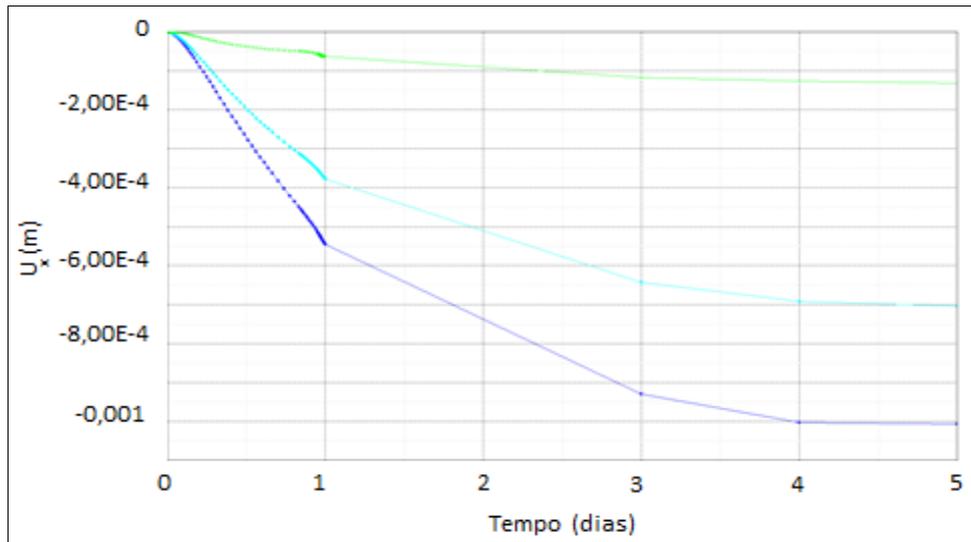
**Figura 5.41 Gráfico de deslocamento solo-geossintético**

Na figura 5.42 foi desenhada a variação dos deslocamentos ao longo do tempo, sendo maior na região da interação solo-geocomposto, e vai diminuindo à medida que se afasta.



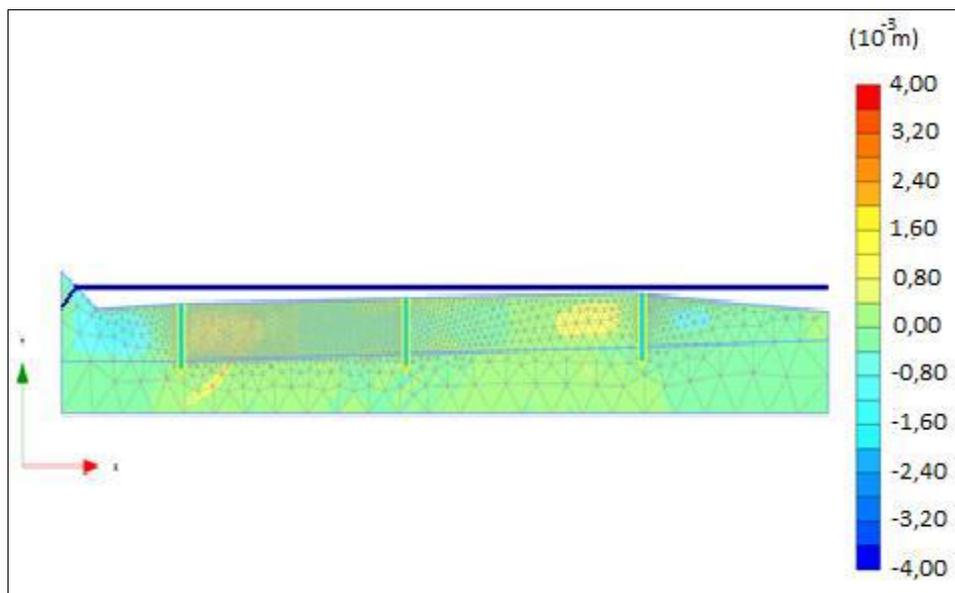
**Figura 5.42 Deslocamento solo-geossintético**

Na figura 5.43 também apresenta a variação dos deslocamentos no terceiro dreno, sendo os valores menores aos obtidos na figura 5.42, mas o comportamento é o mesmo.



**Figura 5.43 Deslocamento no solo-geossintético3.**

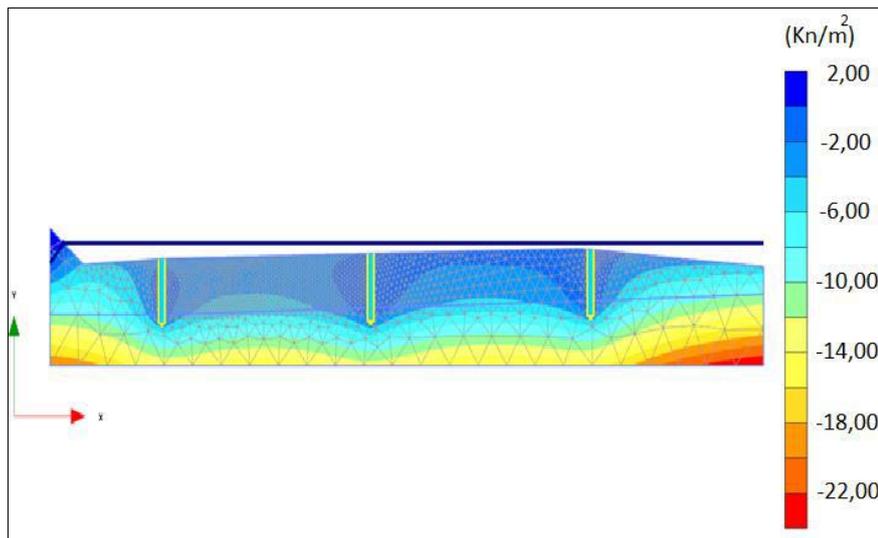
Foi analisada a variação das deformações horizontais mostrada na figura 5.44, apresentando valores baixos e principalmente geradas pelos drenos que são materiais elásticos.



**Figura 5.44 Gráfico de deformações no solo  $\epsilon_{xx}$**

### 5.6.2. Análise de fluxo

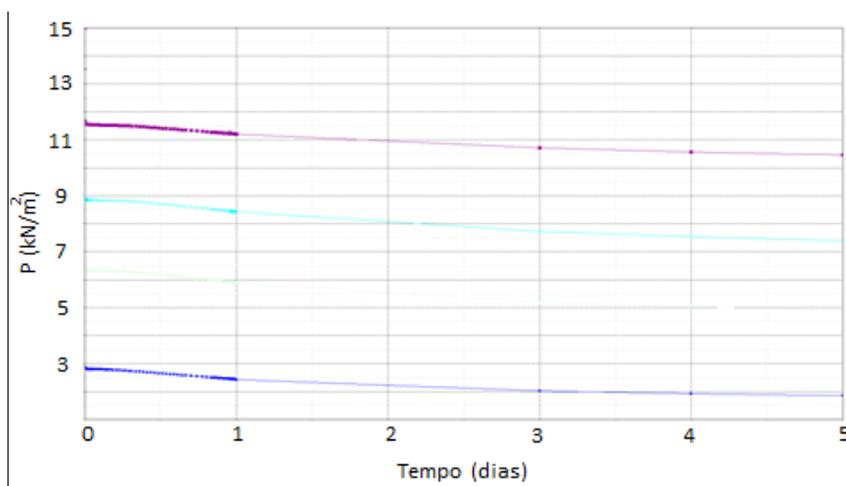
Dos cálculos referente ao fluxo, na figura 5.45 apresenta a variação da poro pressão que na interação do solo com o geocomposto drenante é menor, e vai aumentando o valor à medida que se afasta dos drenos, sendo igual a poro pressão nos drenos.



**Figura 5.45 Gráfico de variação da Poro pressão**

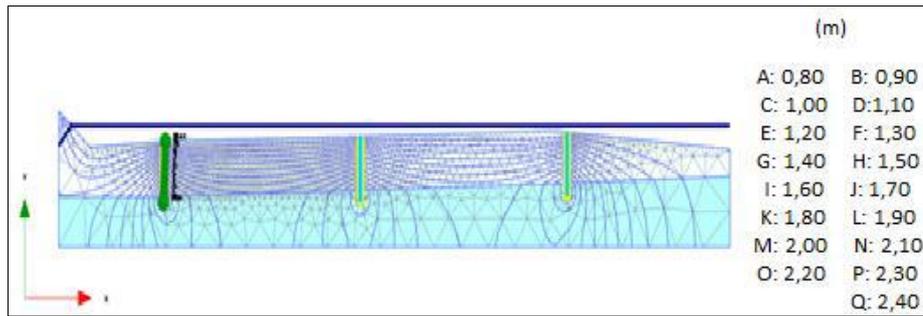
Na figura 5.46 foi desenhada a variação da poro pressão ao longo do tempo, sendo menor na região da interação solo-geocomposto, e vai aumentando à medida que se afasta.

Da figura também podemos ver que a poro pressão vai diminuindo à medida que o lençol freático vai rebaixando e que fica constante no quinto dia onde se conseguiu rebaixar o nível, mas o dreno ainda continua trabalhando só que o fluxo vai ser menor (cálculo aproximado).



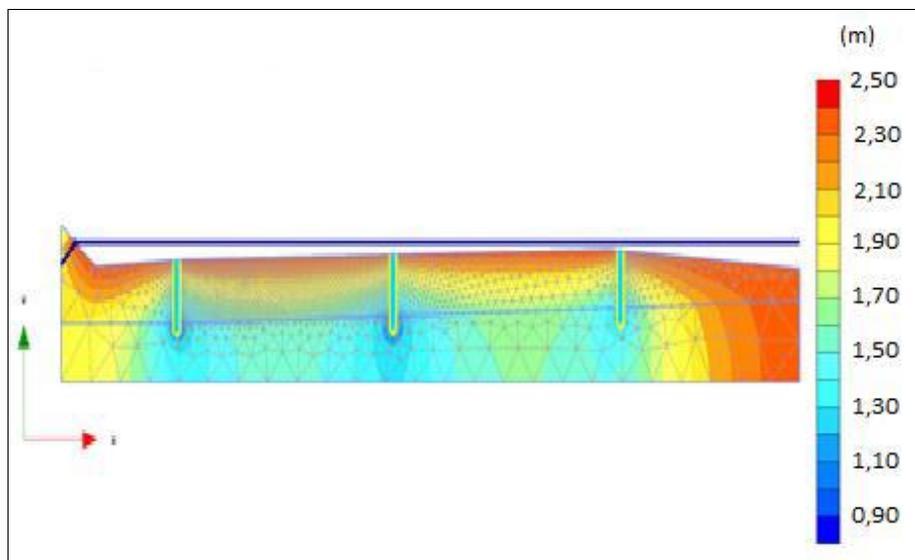
**Figura 5.46 Gráfico de variação da Poro pressão**

Na figura 5.47 foi desenhada a rede de fluxo para o sistema de drenagem, onde a rede está traçada até onde o dreno consegue atingir o fluxo do solo saturado.

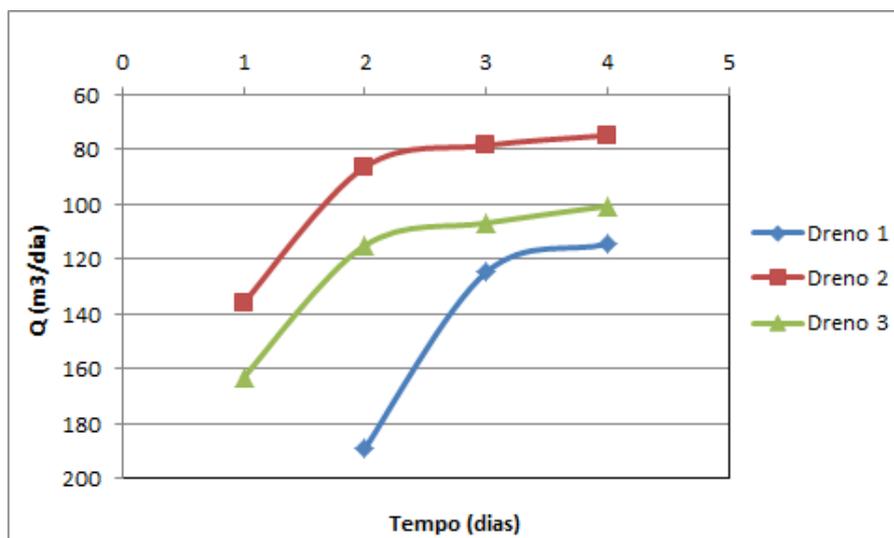


**Figura 5.47** Gráfico de variação da rede de fluxo

Assim também temos a figura 5.48, que mostra a região atingida pelo sistema de drenagem sendo maior em comparação com o caso 1-1, onde se conseguiu atingir com três drenos todo o solo saturado.



**Figura 5.48** Gráfico da região atingida pela rede de fluxo



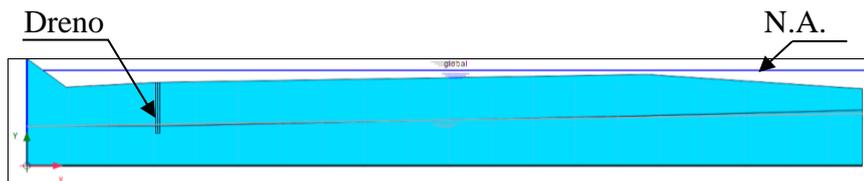
**Figura 5.49** Curva da vazão ao longo do tempo

Na curva 5.49 foi analisada a variação da vazão ao longo do tempo, onde a vazão diminui com o aumento da deformação nos três drenos.

### 5.7.

#### Caso 1-2

O cálculo também foi baseado no estudo de caso do manual técnico da Maccaferri (2009), foi adotada a seção mostrada na figura 5.50, e foi calculado para um dreno.

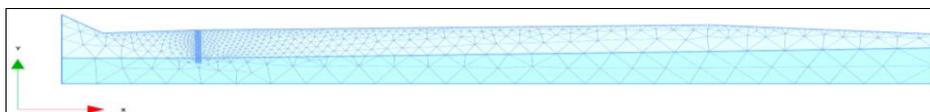


**Figura 5.50** Seção de cálculo para 1 dreno

#### 5.7.1.

#### Malha de cálculo

São apresentados elementos triangulares de 15 nós, e a malha se encontra refinada na interação solo-geocomposto, como mostra a figura 5.51.



**Figura 5.51** Malha da seção de cálculo

#### 5.7.2.

#### Modelo utilizado

O modelo utilizado foi o Soft Soil Creep, recomendado para o análise da variação da fluência em um sistema acoplado fluxo-deformação, descrito no capítulo 4.

**Tabela 5.5** Propriedades do solo, caso 2.

$\gamma_{\text{sat}}$ (kN/m <sup>3</sup> )	19.60
$\gamma_{\text{unsat}}$ (kN/m <sup>3</sup> )	15.55
Parâmetros de resistência	
$c'_{\text{ref}}$ (kPa)	20
$\phi'$ (°)	25
$\psi$ (°)	0

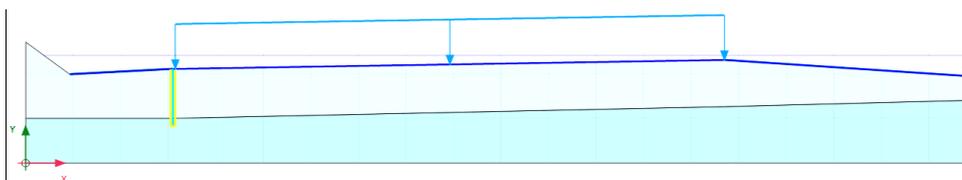
### 5.7.2.1.1. Propriedades hidráulicas do solo, caso 2.

As propriedades hidráulicas do modelo a ser analisado são mostradas na tabela 5.6, que correspondem aos valores dados no laboratório.

**Tabela 5.6 Propriedades hidráulicas do solo**

Parâmetros	
$k_x$ (m/dia)	10766,35
$k_y$ (m/dia)	10766,35
$-\Psi_{unsat}$ (m)	1,00E+04
einit	0,75

### 5.7.2.1.2. Condições de contorno:



**Figura 5.52 Aplicação de carregamento e condições de contorno**

Por se tratar de análise da fluência na interação solo-geocomposto, o modelo de cálculo foi submetido a um carregamento estático de 10 (kN/m) e as condições de contorno foram dadas para fluxo e deformação:

Fluxo:

Base: impermeável

Laterais: permeável

Topo: pressão nula

- Deformações – Standart fixicities:
  - Laterais:  $u_x=0$
  - Base:  $u_x=u_y=0$

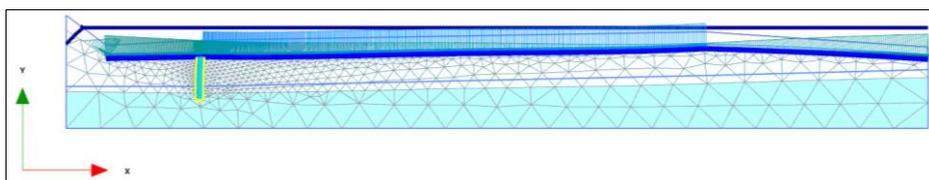
### 5.7.3. Resultados

Dos resultados obtidos foram analisados os fatores de maior efeito na interação solo-geocomposto, por se tratar de um caso de drenagem com material

geossintético, foi feita a análise da fluência, a variação da poro pressão, a variação da vazão de descarga de rebaixamento do lençol freático ao longo do tempo.

#### 5.7.4. Análise da fluência

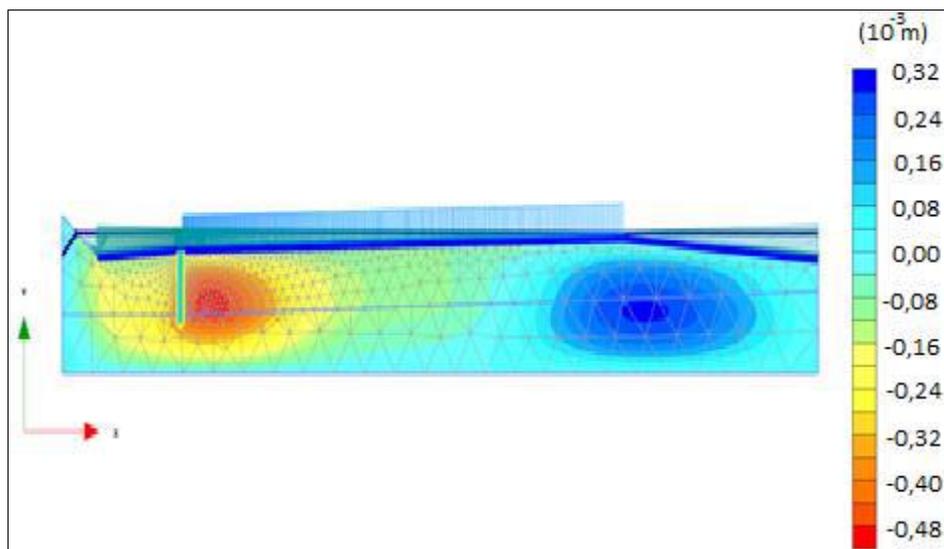
Foi analisada como primeira variante a fluência na interação solo-geocomposto, que ela cresce à medida que o lençol freático vai diminuindo.



**Figura 5.53 Seção deformada**

Neste caso por se tratar de um sistema de drenagem com geocomposto em trincheira, vamos dar maior ênfase na análise da deformação e do deslocamento horizontal já que esses dois parâmetros vão refletir a variação da espessura do dreno.

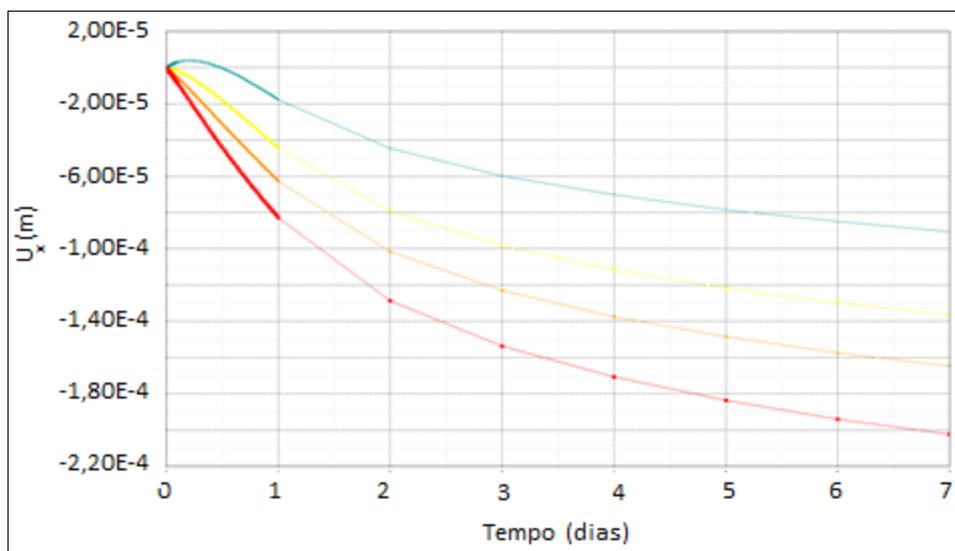
Na figura 5.54 se apresenta a variação de deslocamentos, e podemos ver que a região crítica esta na interação solo-geocomposto, que é a região vermelha, e a menos afetada é a região azul.



**Figura 5.54 Gráfico de deslocamento solo-geocomposto**

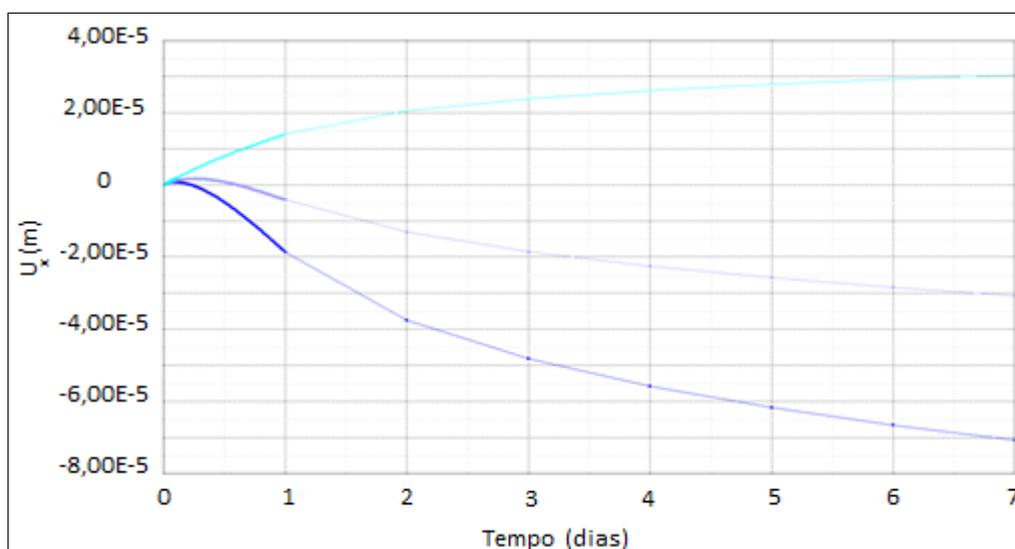
Comparando o gráfico 5.17 com o 5.54 podemos dizer que no caso 1-2 foi calculado com uma permeabilidade maior e os deslocamentos são menores do que o caso 1-1, mas o comportamento do solo nos dois casos é o mesmo.

Também foi desenhada a variação dos deslocamentos ao longo do tempo como é mostrado na figura 5.55, sendo maior na região da interação solo-geocomposto, e diminui à medida que se afasta.



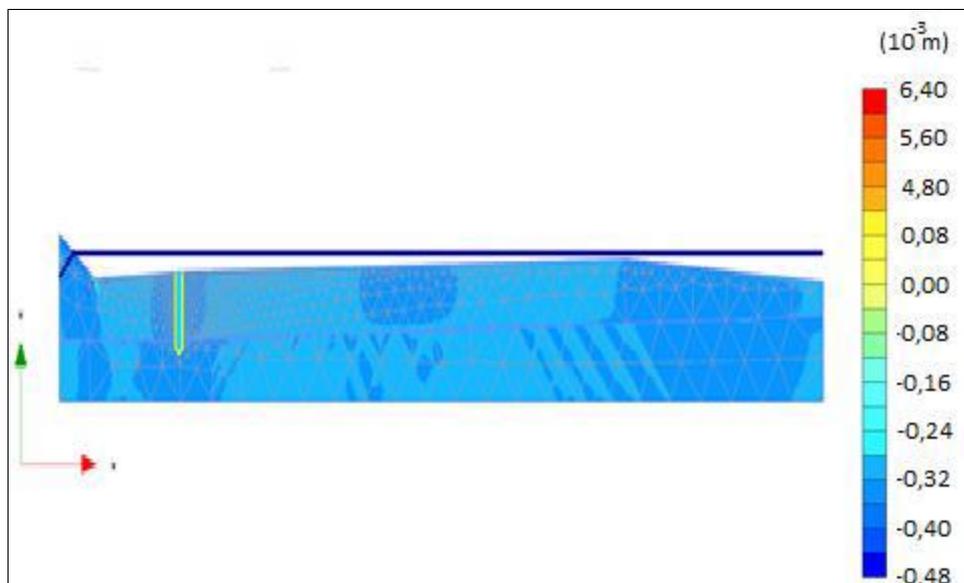
**Figura 5.55 Gráfico de deslocamento solo-geocomposto drenante**

Na figura 5.56 também apresenta a variação do deslocamento no solo, sendo os valores menores aos obtidos na figura 5.55.



**Figura 5.56 Gráfico de deslocamento no solo**

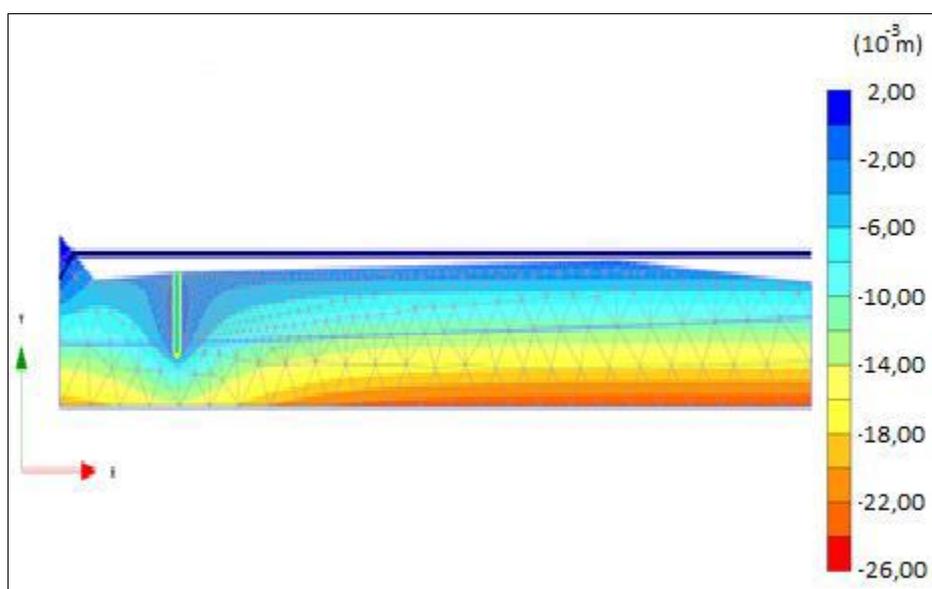
Foi analisada a variação das deformações horizontais mostrada na figura 5.57, apresentando valores baixos e principalmente geradas pelo dreno que é um material elástico.



**Figura 5.57** Gráfico de deformações no solo  $\epsilon_{xx}$

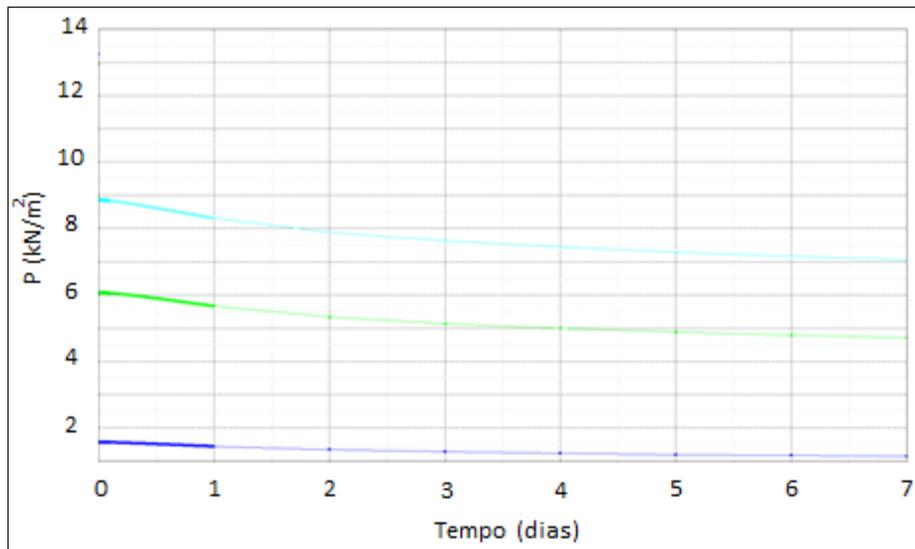
### 5.7.5. Análise de fluxo

Na figura 5.58 apresenta a variação da poro pressão que na interação do solo com o geocomposto é menor, e vai aumentando o valor à medida que se afasta do dreno.



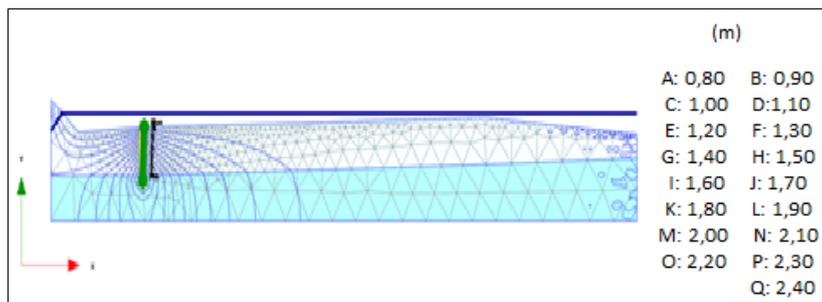
**Figura 5.58** Gráfico de variação da Poro pressão

Na figura 5.59 foi desenhada a variação da poro pressão ao longo do tempo, sendo menor na região da interação solo-geocomposto, e o valor aumenta conforme se afasta do dreno. Também podemos ver que a poro pressão vai diminuindo à medida que o lençol freático vai rebaixando e que fica constante no sétimo dia onde se conseguiu rebaixar o nível, mas este cálculo é uma aproximação já que o dreno ainda continua trabalhando.

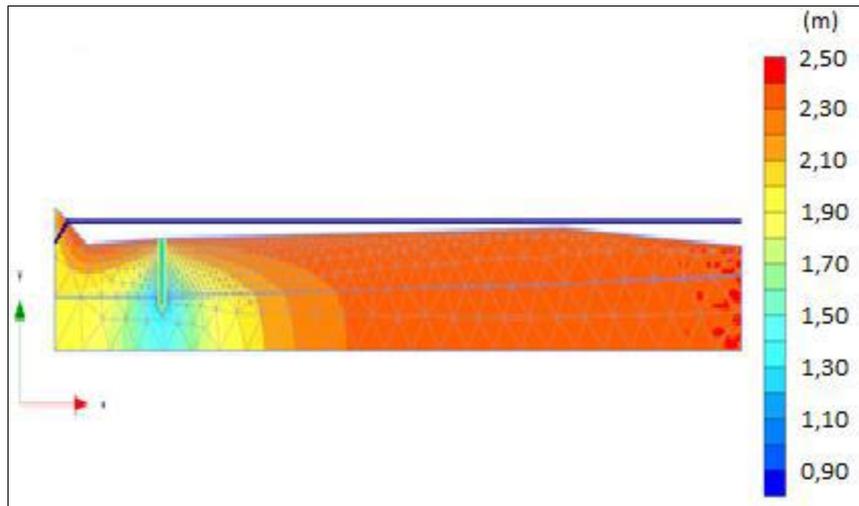


**Figura 5.59 Gráfico de variação da Poro pressão**

Na figura 5.60 foi desenhada a rede de fluxo para o sistema de drenagem, onde a rede novamente está traçada até onde o dreno consegue atingir o fluxo do solo saturado.

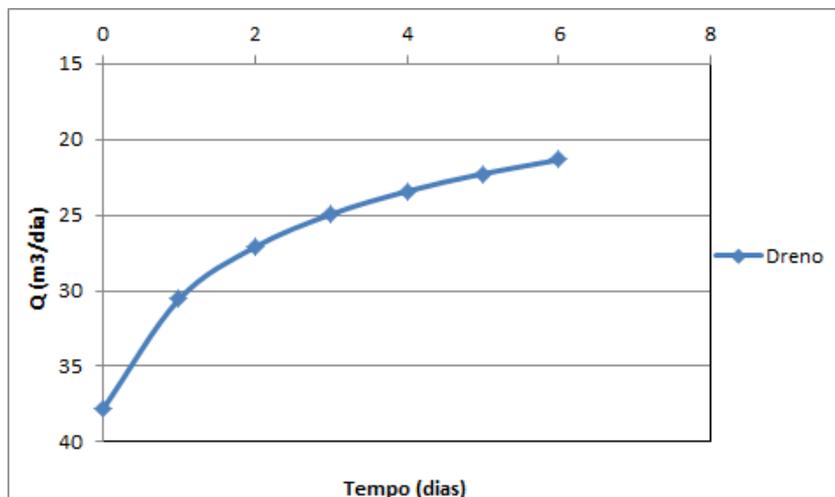


**Figura 5.60 Gráfico da região atingida pela rede de fluxo**



**Figura 5.61** Variação da rede de fluxo

Assim também temos a figura 5.61, que mostra a região atingida pelo sistema de drenagem, onde podemos ver a região vermelha ainda se encontra saturada, e para conseguir atingir toda a região saturada nos seguintes casos se acrescentou também o número de drenos.

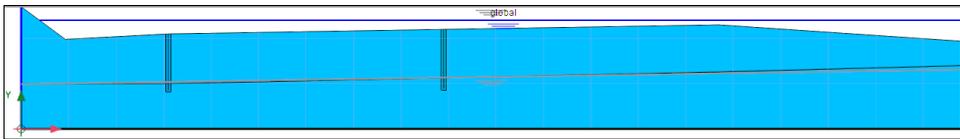


**Figura 5.62** Curva da vazão ao longo do tempo

Na figura 5.62 foi analisada a variação da vazão ao longo do tempo, onde a vazão diminui com o aumento da deformação para o carregamento aplicado de 10 (kN/m), mas neste caso os valores da vazão são menores já que se acrescentou o valor da permeabilidade.

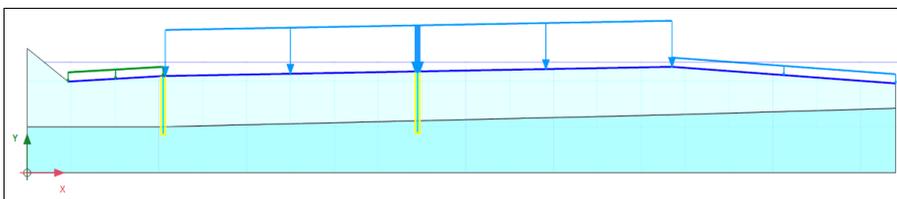
## 5.8. Caso 2-2

Foi adotada a seção mostrada na figura 5.63 que é a mesma do caso 2-1.



**Figura 5.63 Seção de cálculo para 2 drenos**

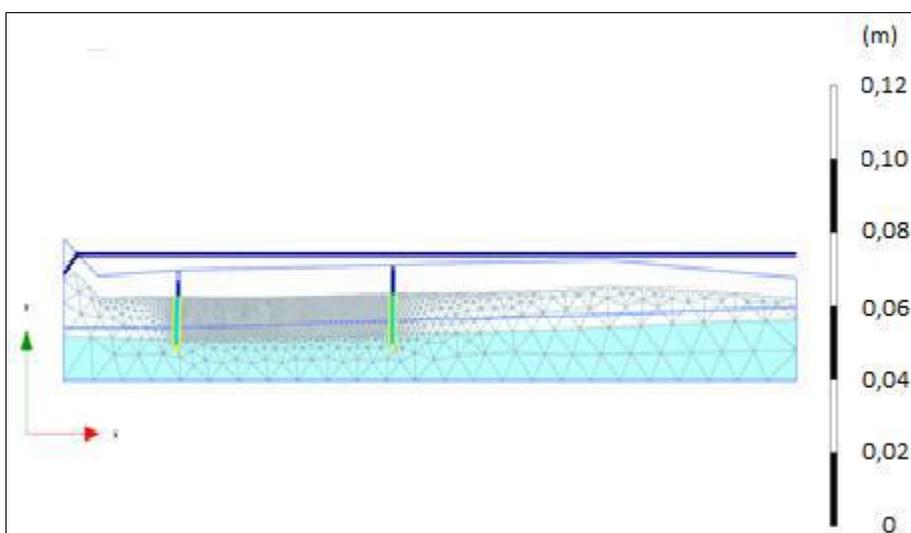
Para propriedades físicas e hidráulicas do solo, o modelo utilizado e as condições de contorno foram as mesmas usadas no caso 1-2 para um dreno, e o carregamento para o cálculo também foi de 10 (kN/m), como é mostrado na figura 5.64.



**Figura 5.64 Aplicação de carregamento e condições de contorno**

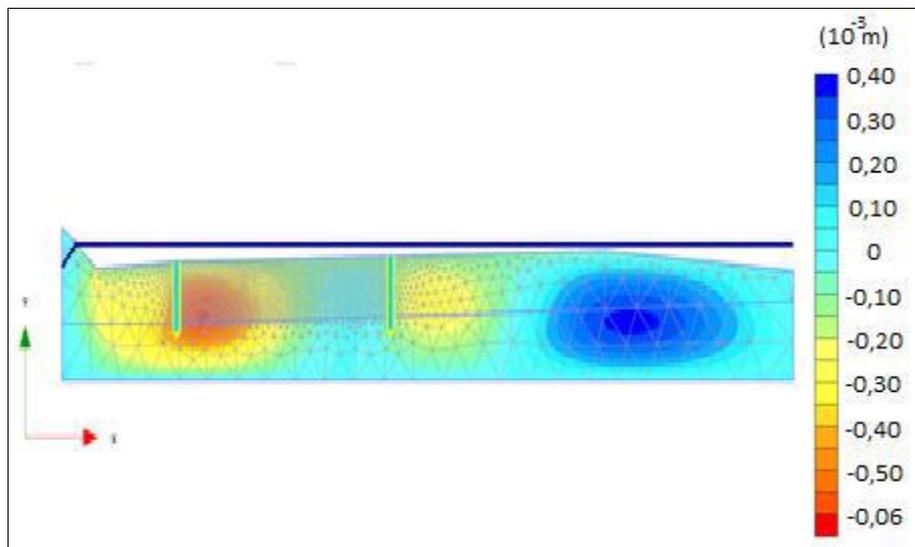
### 5.8.1. Análise da fluência

Foi analisada como primeira variante novamente a fluência na interação solo-geocomposto, onde as deformações aumentam à medida que o lençol freático vai rebaixando.



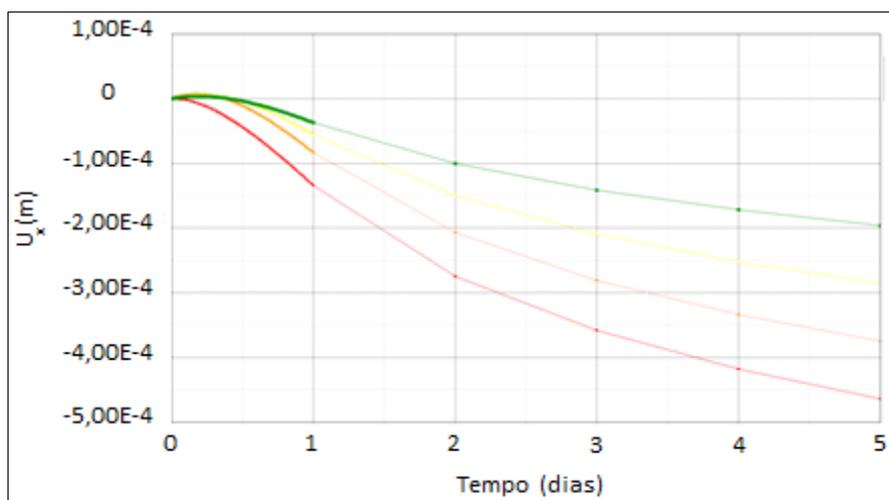
**Figura 5.65 Seção deformada Solo-geocomposto drenante**

Na figura 5.66 apresenta a variação de deslocamentos, e podemos ver que a região crítica esta na interação solo-geocomposto, que é a região avermelhada no primeiro dreno, o segundo dreno que esta no meio apresenta deformações menores.



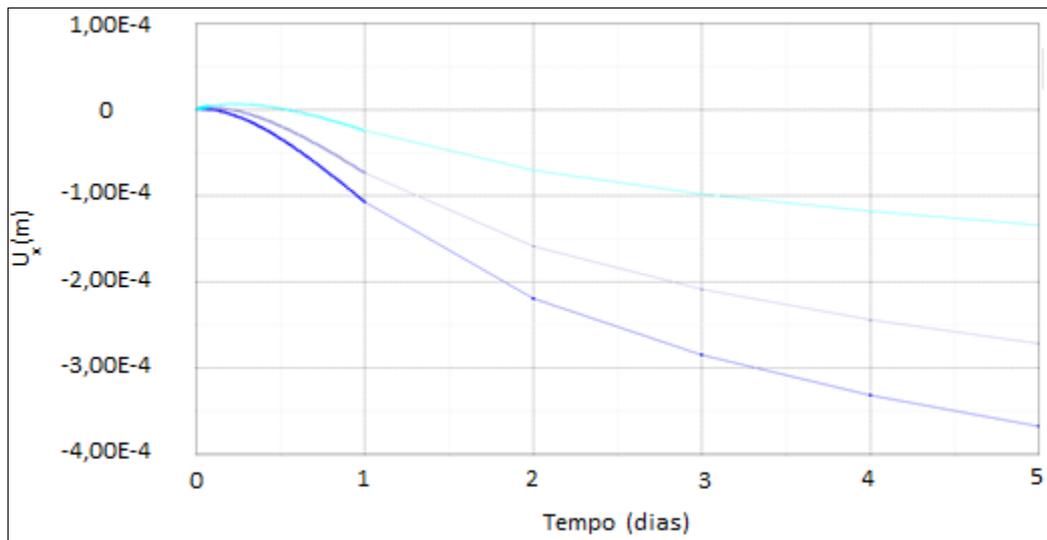
**Figura 5.66 Gráfico de deslocamento solo-geocomposto**

Foi desenhada a variação dos deslocamentos ao longo do tempo como mostrada na figura 5.67, sendo maior na região da interação solo-geocomposto, e vai diminuindo à medida que se afasta.



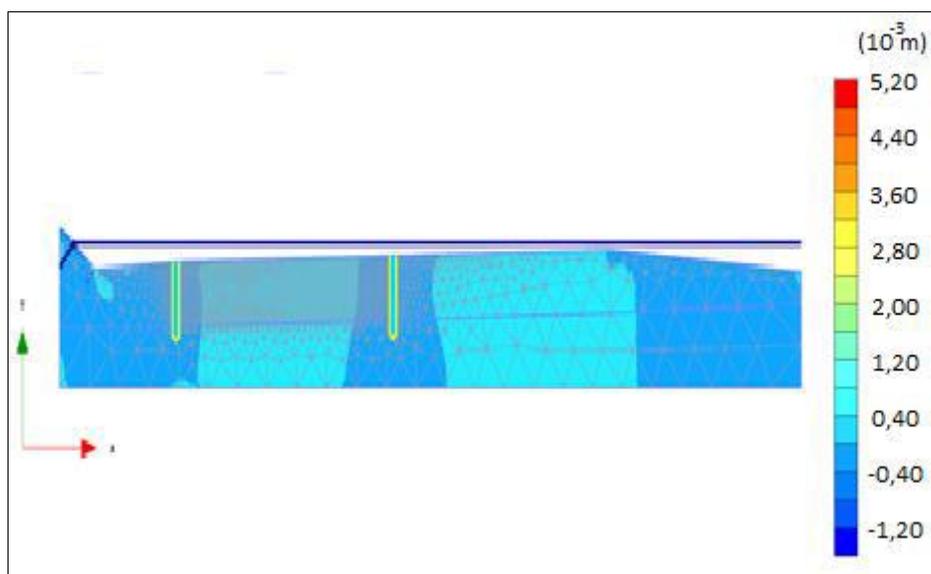
**Figura 5.67 Gráfico de deslocamento solo-geossintético**

Na figura 5.68 também apresenta a variação dos deslocamentos no solo, sendo os valores menores aos obtidos na figura 5.67.



**Figura 5.68** Gráfico de deslocamento no solo

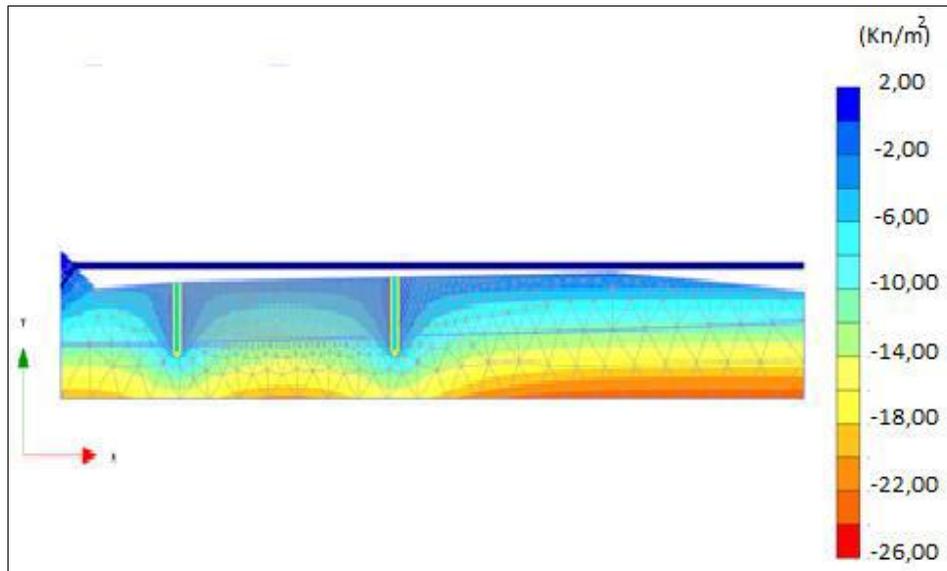
Foi analisada a variação das deformações horizontais mostrada na figura 5.69, apresentando valores baixos e principalmente geradas pelos drenos que são materiais elásticos.



**Figura 5.69** Gráfico de deformações no solo  $\epsilon_{xx}$

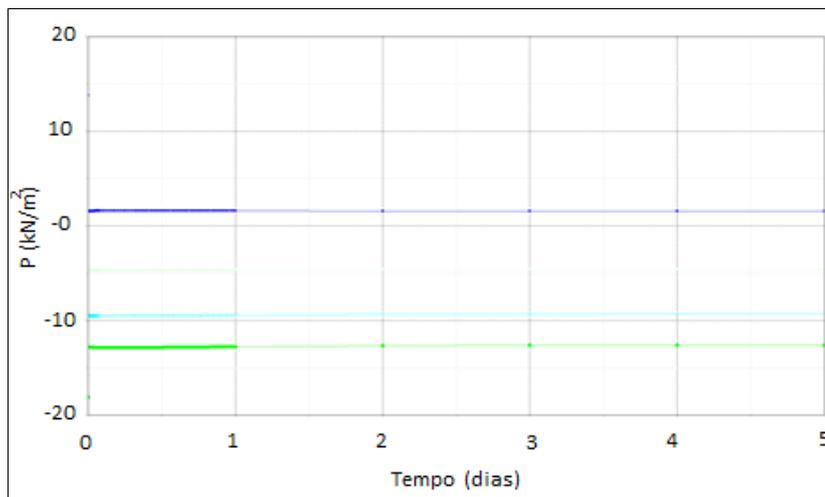
### 5.8.2. Análise de fluxo

Referente ao fluxo, na figura 5.70 apresenta a variação da poro pressão que na interação do solo com o geocomposto é menor, e vai aumentando conforme se afasta dos drenos. Não existe variação na poro pressão nos drenos, sendo o comportamento o mesmo.



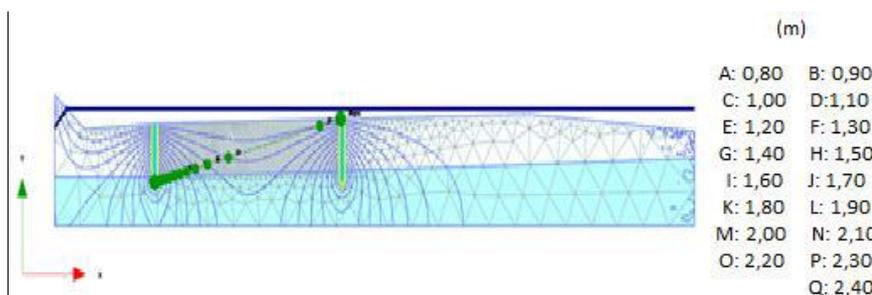
**Figura 5.70 Gráfico de variação da Poro pressão**

Na figura 5.71 foi desenhado a variação da poro pressão ao longo do tempo, sendo menor na região da interação solo-geocomposto, e acrescenta à medida que se afasta.

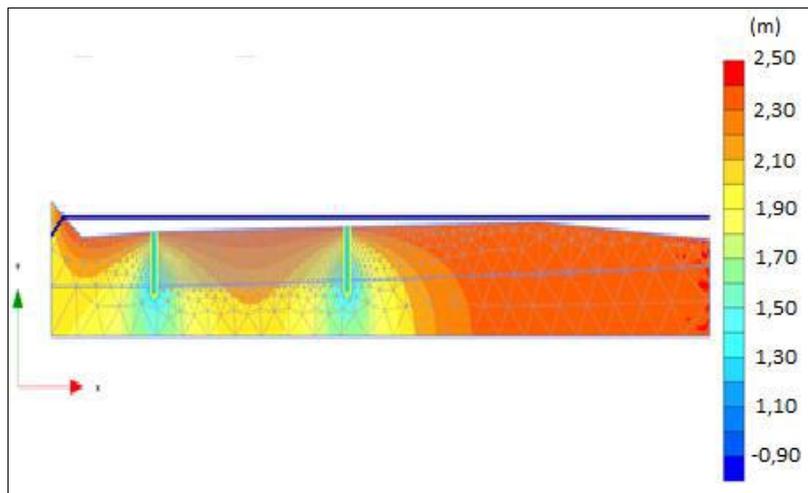


**Figura 5.71 Gráfico de variação da Poro pressão**

Na figura 5.72 foi desenhada a rede de fluxo para o sistema de drenagem.

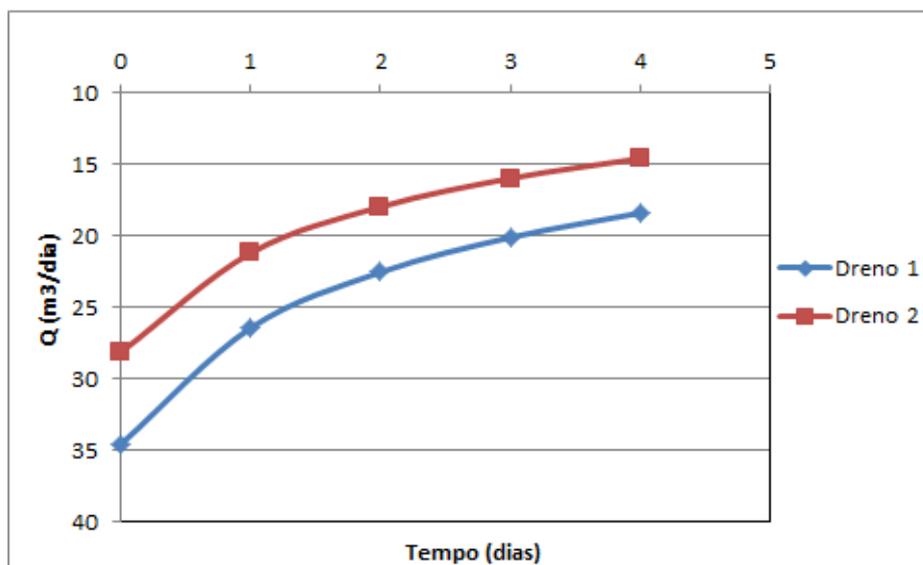


**Figura 5.72 Gráfico de variação da rede de fluxo**



**Figura 5.73 Gráfico da região atingida pela rede de fluxo**

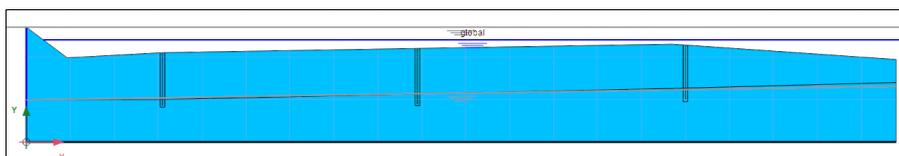
Na figura 5.73 podemos ver a região atingida pelo sistema de drenagem, onde a região avermelhada ainda se encontra saturada.



**Figura 5.74 Curva da vazão ao longo do tempo**

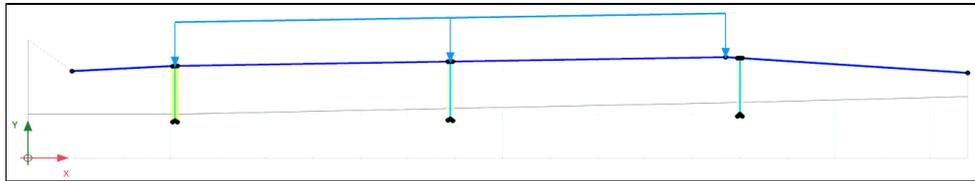
## 5.9. Caso 3-2

Foi adotada a seção mostrada na figura 5.75, calculado para três drenos.



**Figura 5.75 Seção de cálculo para 3 drenos**

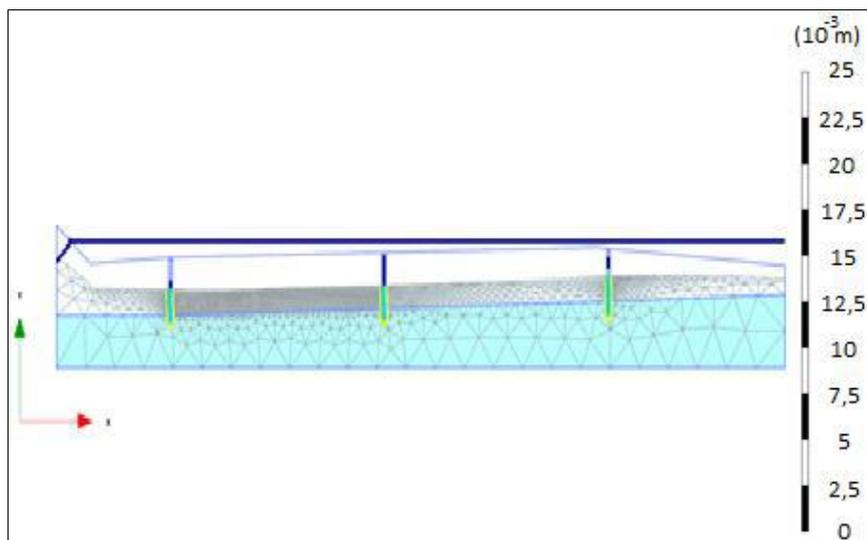
Para as propriedades físicas e hidráulicas, o modelo utilizado e as condições de contorno foram as mesmas usadas no caso 1-2 e 2-2 , e o carregamento para o cálculo também foi de 10(kN/m), conforme mostrada na figura 5.76.



**Figura 5.76 Condições do modelo de cálculo**

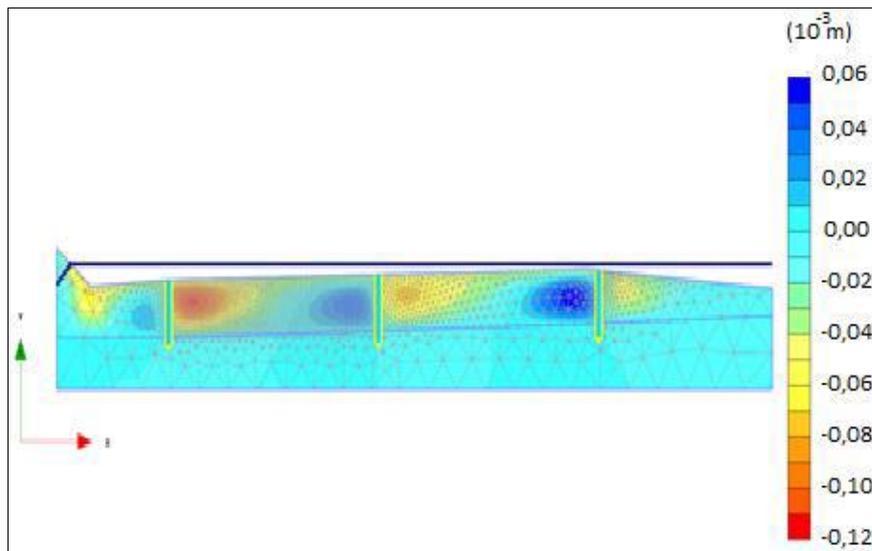
### 5.9.1. Análise da fluência

A fluência na interação solo-geocomposto, aumenta à medida que o lençol freático vai rebaixando.



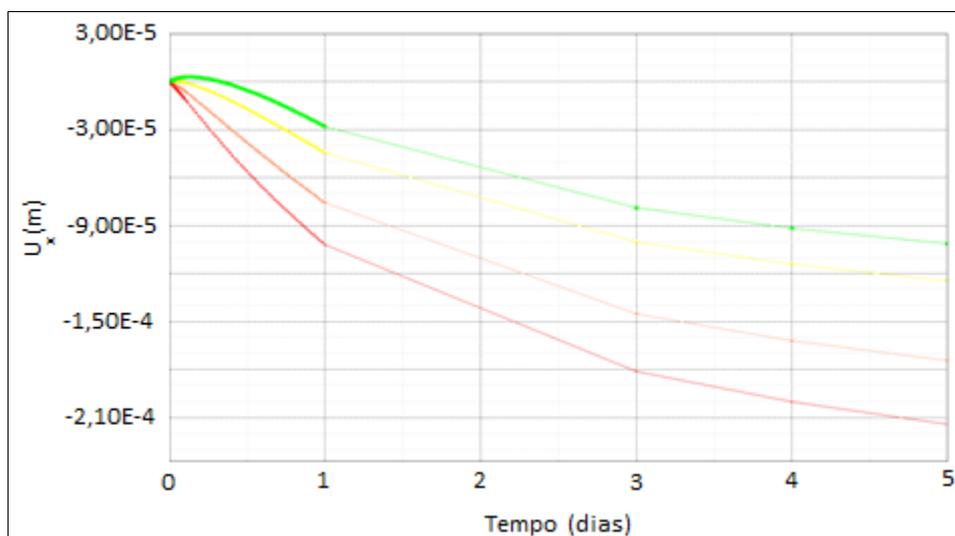
**Figura 5.77 Seção deformada**

Na figura 5.78 apresenta a variação de deslocamentos, e podemos ver que a região crítica esta na interação solo-geocomposto, que é a região vermelha no primeiro dreno, no caso do segundo dreno que esta no meio, as deformações são menores, e no terceiro dreno que é a região de cor azul também apresenta deslocamentos elevadas.



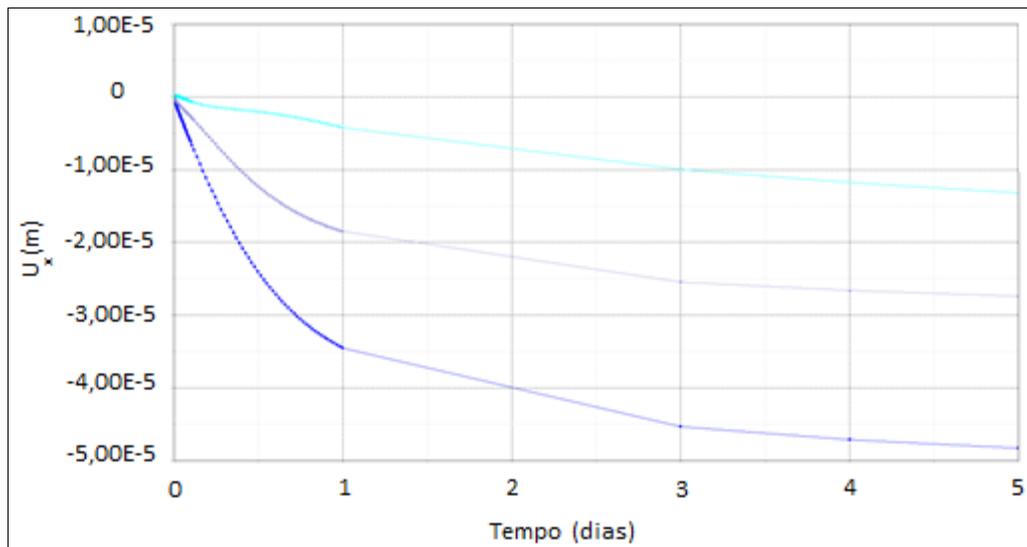
**Figura 5.78 Gráfico de deslocamento solo-geocomposto**

Também foi desenhada a variação dos deslocamentos ao longo do tempo conforme mostrado na figura 5.79, sendo maior na região da interação solo-geocomposto, e diminui à medida que se afasta.



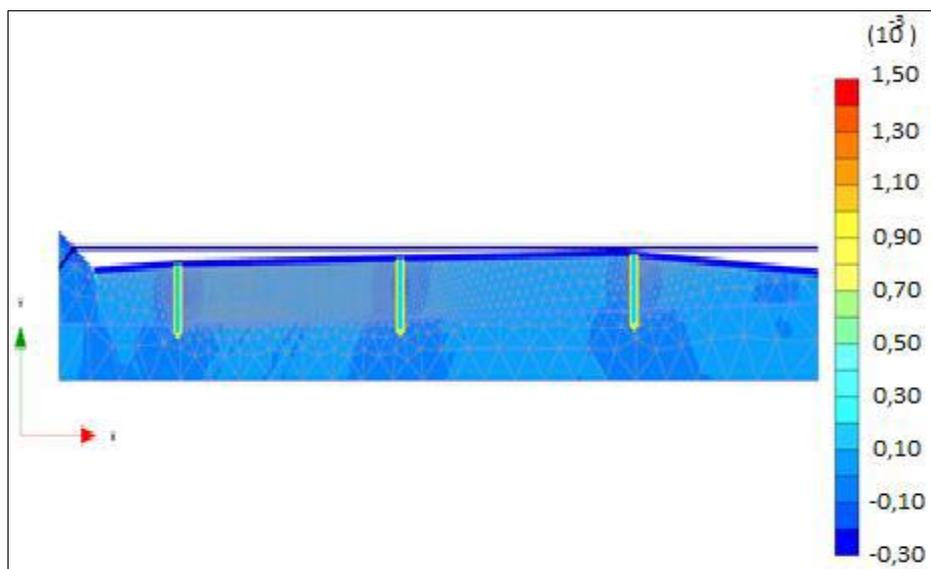
**Figura 5.79 Deslocamento solo-geocomposto**

Na figura 5.80 também apresenta a variação dos deslocamentos no terceiro dreno, sendo os valores menores aos obtidos na figura 5.79, porém, o comportamento é o mesmo.



**Figura 5.80** Deslocamento no solo-geossintético

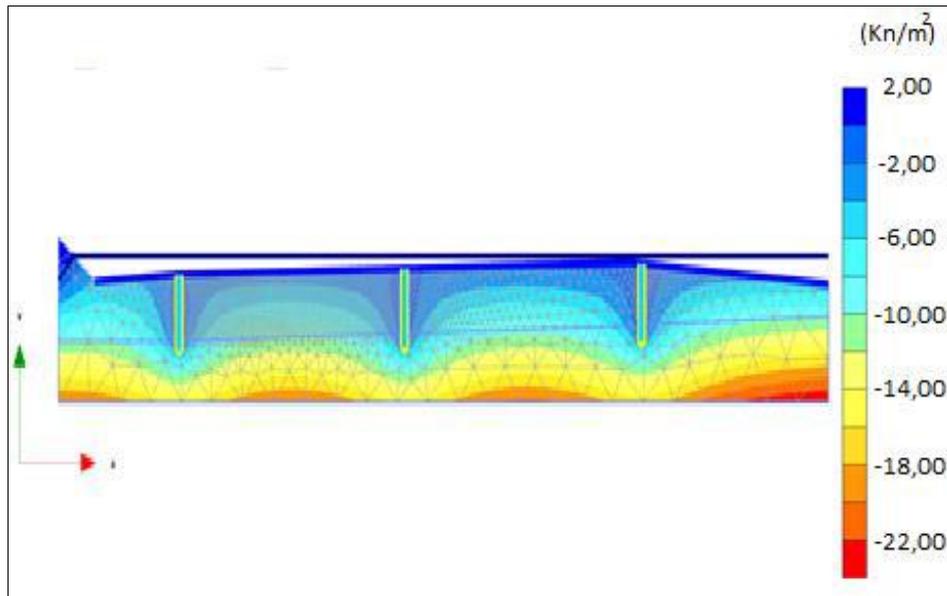
Foi analisada a variação das deformações horizontais mostrada na figura 5.81, apresentando valores baixos e principalmente geradas pelos drenos que são materiais elásticos.



**Figura 5.81** Gráfico de deformações no solo  $\epsilon_{xx}$

### 5.9.2. Análise de fluxo

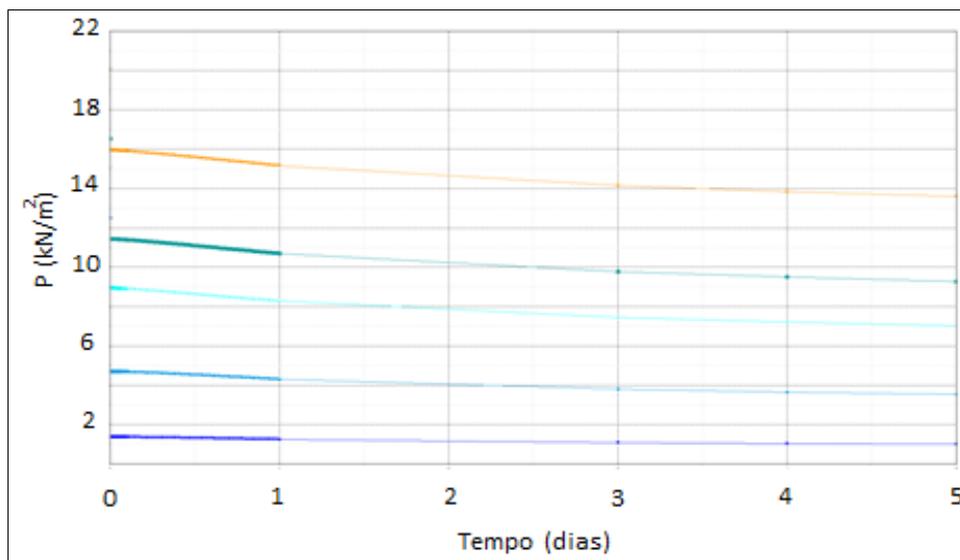
Dos cálculos referente ao fluxo no solo saturado, na figura 5.82 apresenta a variação da poro pressão que na interação do solo com o geocomposto é menor, e vai aumentando o valor à medida que se afasta dos drenos, sendo igual a poro pressão nos drenos.



**Figura 5.82 Gráfico de variação da Poro pressão**

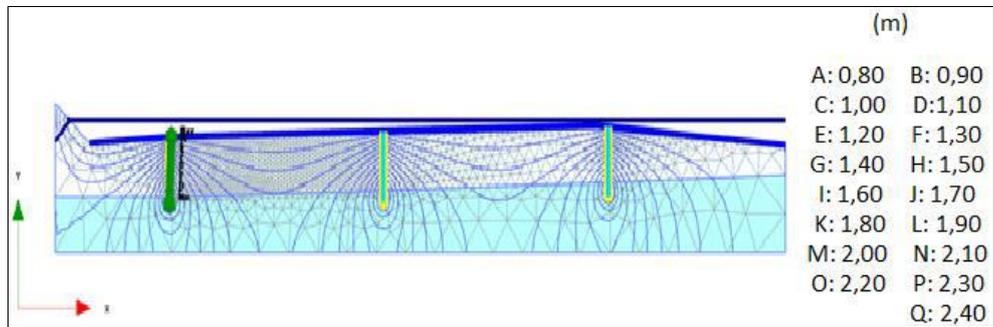
Na figura 5.83 foi desenhada a variação da poro pressão ao longo do tempo, sendo menor na região da interação solo-geocomposto, e aumenta conforme se afasta.

Da figura também podemos ver que a poro pressão vai diminuindo à medida que o lençol freático vai rebaixando e que fica constante no quinto dia onde se conseguiu rebaixar o nível, mas o dreno ainda continua trabalhando uma vez que o fluxo vai ser menor.(cálculo é aproximado).



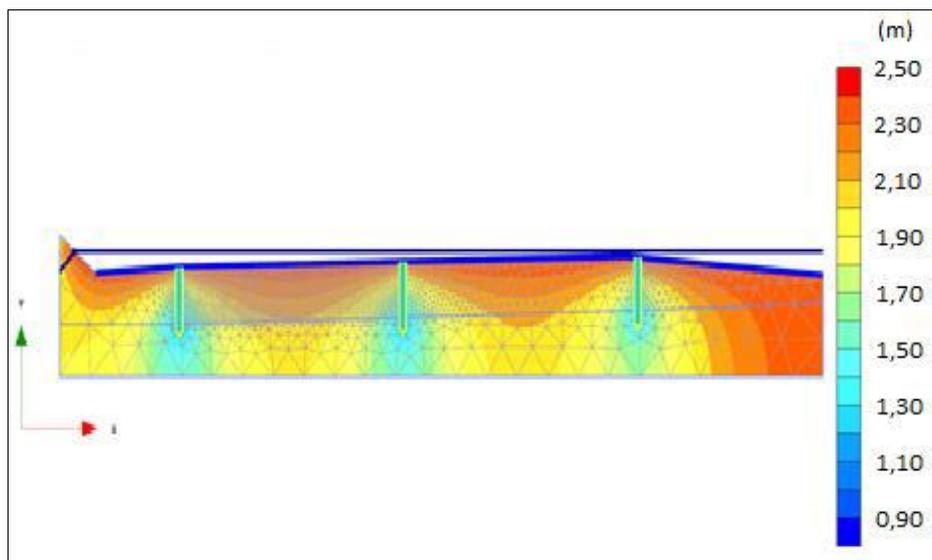
**Figura 5.83 Gráfico de variação da Poro pressão**

Na figura 5.84 foi desenhada a rede de fluxo para o sistema de drenagem, onde está traçada até onde o dreno consegue atingir o fluxo do solo saturado.

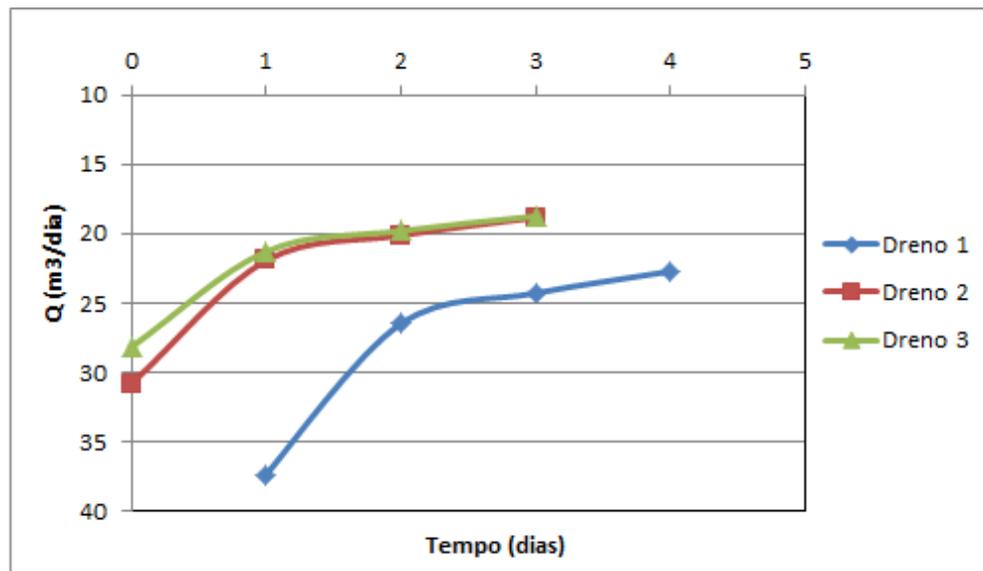


**Figura 5.84 Gráfico de variação da rede de fluxo**

Assim também temos a figura 5.85, que mostra a região atingida pelo sistema de drenagem sendo maior em comparação com o caso 1-2, onde conseguiu atingir com três drenos todo o solo saturado.



**Figura 5.85 Gráfico da região atingida pela rede de fluxo**



**Figura 5.86** Curva da vazão ao longo do tempo

Na figura 5.86 temos o gráfico de variação da vazão ao longo do tempo, onde a vazão diminui com o aumento da deformação nos três drenos.