

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

DANIEL CARDOSO GONÇALVES

**Contribuição ao estabelecimento de critérios de projeto para o  
dimensionamento de via permanente de sistemas de Veículos Leves Sobre  
Trilhos - VLT**

São Paulo

2019

DANIEL CARDOSO GONÇALVES

**Contribuição ao estabelecimento de critérios de projeto para o dimensionamento de via permanente de sistemas de Veículos Leves Sobre Trilhos - VLT**

**Versão original**

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de concentração: Engenharia de Transportes

Orientador: Prof. Dr. Felipe Issa Kabbach Junior

São Paulo

2019

## CATALOGAÇÃO-NA-PUBLICAÇÃO

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

#### Catálogo-na-publicação

Gonçalves, Daniel Cardoso

Contribuição ao estabelecimento de critérios de projeto para o dimensionamento de via permanente de sistemas de Veículos Leves Sobre Trilhos - VLT / D. C. Gonçalves -- São Paulo, 2019.

105 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes.

1.Veículos Leves sobre Trilhos 2.Ferrovias Urbanas I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Transportes II.t.

Nome: GONÇALVES, Daniel Cardoso

Título: Contribuição ao estabelecimento de critérios de projeto para o dimensionamento de via permanente de sistemas de Veículos Leves Sobre Trilhos - VLT

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Aprovado em:

Banca Examinadora

Prof. Dr. \_\_\_\_\_

Instituição: \_\_\_\_\_

Julgamento: \_\_\_\_\_

Prof. Dr. \_\_\_\_\_

Instituição: \_\_\_\_\_

Julgamento: \_\_\_\_\_

Prof. Dr. \_\_\_\_\_

Instituição: \_\_\_\_\_

Julgamento: \_\_\_\_\_

*Dedico este trabalho à minha esposa  
Alessandra, com amor e carinho.*

*Aos meus filhos Sofia e Gustavo, razão do  
meu viver.*

## Agradecimentos

Ao meu orientador, Prof. Dr. Felipe Issa Kabbach Jr, pelo apoio, orientação, paciência, ajuda e principalmente por confiar trabalho desenvolvido. Os ensinamentos sobre engenharia, ferrovias, geometria e sobre experiência de vida foram muito produtivas.

Ao Prof. Dr. Carlos Yukio Suzuki, pelas conversas acerca de engenharia, pavimentos e mercado de trabalho.

Ao Eng. Alberto dos Santos, profundo conhecedor da área de ferrovias, que auxiliou na elaboração das comparações entre sistemas de via permanente, além das longas conversas sobre o assunto ferroviário.

Ao meu grande amigo Eng. Elbio Oliveira, que além de ser contemporâneo de turma de graduação, auxiliou enormemente na elaboração dos modelos estruturais desta dissertação.

Aos meus colegas da Planservi Engenharia e da Exatidão Engenharia, por todo o apoio prestado e ajuda nas horas de necessidade.

Aos meus pais Valdoir e Fátima, que mesmo longe, sempre estiveram presentes em toda a caminhada.

Aos meus sogros Veríssimo e Lilian, pelo apoio com os meus filhos e com minha esposa.

À minha companheira de vida, Alessandra, por todo o amor, carinho, compreensão, apoio, paciência e incentivos dados ao longo desta jornada. Pessoa esta que nos momentos de falta fez o papel exemplar de mãe e também de pai, possibilitando a elaboração deste trabalho.

Aos meus filhos Sofia e Gustavo, que mesmo sem o discernimento dada à pouca idade, tiveram o pai não tão presente nesta jornada. Porém, eles foram um dos agentes motivadores para a finalização deste trabalho.

## RESUMO

O presente trabalho tem por objetivo contribuir ao estabelecimento de critérios de projeto para o dimensionamento de via permanente de Sistemas de Veículos Leves Sobre Trilhos – VLT, com vistas à sua aplicação em futuros empreendimentos de tal tipo a serem implantados no Brasil. São apresentadas comparações de tecnologia de estruturas de pavimentos de VLT, ferrovias clássicas e pavimentos rodoviários, para embasamento das tomadas de decisão com vistas ao estabelecimento dos critérios de projeto propostos no presente trabalho. São apresentados os conceitos relacionados a cada tipo de dado necessário para a construção do modelo de superestrutura da via permanente, com os parâmetros de cada material e também o embasamento do método de cálculo, através da modelagem da estrutura por elementos finitos. Na sequência são expostas as tecnologias existentes para sistemas de via permanente de sistemas VLT, bem como as normativas ou o conjunto delas que são utilizadas em outros países. Em seguida foi elaborada uma breve coleta dos métodos de cálculo já utilizados em sistemas VLT projetados no Brasil. Com base nesses preceitos, são identificadas as limitações, adaptações e o cenário ideal no quesito disponibilidade de dados e ensaios para o dimensionamento de via permanente de sistemas VLT. Na sequência é apresentada a proposição de aplicação do método dos elementos finitos, bem como a utilização de software para a modelagem e avaliação da solução a ser adotada. Como resultado da modelagem por este método, foram elaborados ábacos que possibilitarão o dimensionamento das estruturas nos projetos a serem elaborados no Brasil, de acordo com parâmetros percorridos nos itens anteriores. Por fim, são apresentados e em seguida detalhados os estudos de caso, primeiro deles para implantação de um trecho de um sistema VLT, em região de relevo levemente ondulado, com parâmetros de solo e carregamentos usualmente considerados para a cidade de São Paulo. O segundo estudo de caso contempla um local de relevo plano e com parâmetros de solo de cidades litorâneas, tais como Santos ou Rio de Janeiro, com a vantagem de que já há sistemas VLT em operação nestes locais.

Palavras chave: Veículo Leve Sobre Trilhos – VLT; Via Permanente; Dimensionamento Estrutural.

## **ABSTRACT**

This work aims to contribute to the development of criteria for the design of Light Rail Transit Systems (LRT) permanent tracks, with focus on systems / projects to be implemented in Brazil. It presents technological comparisons between LRT pavement structures, classic railways and road pavements with the objective to establish a design criteria to support the decision making process. The concepts related to each parameter required for the construction of the superstructure model of permanent tracks are presented. This includes the characteristics of each material and the basis for calculation methods through the finite element structure modeling. The work also presents the existing technologies of permanent tracks for LRT systems, as well as the standards current used in other countries. The different calculation methods already used in the design of LRT systems in Brazil were compiled and compared. Based on these findings, the limitations, adaptations and the ideal scenario in terms of data availability and testing for the design of LRT systems permanent tracks are identified. The work continues by presenting the proposal on how to apply the finite element method in the design, as well as the use of software for modeling and evaluation of the solution to be adopted. As a result of the modeling process, technical charts for the dimensioning of structures in the projects to be developed in Brazil were elaborated. Finally, two case studies were developed. The first one focused on the implementation of a section of a LRT system in a region with slightly undulating terrain and it considers soil parameters and loads from the city of São Paulo. The second case study contemplates a flat terrain and it considers soil parameters of coastal cities, such as Santos or Rio de Janeiro (the existing LRT systems in operation in these locations were considered).

Keywords: Light Rail Train – LRT; Track Structures; structural dimensioning.

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1: Vias em lastro. Fonte: LRT Track Design Manual .....  | 21 |
| Figura 2: Via em fixação direta – Sistema Rheda 2000. Fonte: Railone .....  | 23 |
| Figura 3: Via em fixação direta – Dormente bi-bloco independente. Fonte: LRT Track Design Manual .....  | 23 |
| Figura 4: Via em fixação direta – Laje de travamento concretada e aspecto final da via, com revestimento em bloquetes de concreto. Fonte: Railone ..... | 23 |
| Figura 5: Via embutida. Fonte: LRT Track Design Manual.....   | 25 |
| Figura 6: Seção típica do Sistema CDM. Fonte: Pandrol .....   | 25 |
| Figura 7: Sistema CDM em implantação e após implantado – VLT de Cuiabá. Fonte: Governo do Mato Grosso / KPMG – Relatório de Obras do Sistema VLT .....  | 26 |
| Figura 8: Sistema Edilon Sedra – Seção típica e modelo real. Fonte: Edilon Sedra e o autor .....  | 26 |
| Figura 9: Sistema Edilon Sedra – Aplicação da resina polimérica. Fonte: Edilon Sedra .....  | 26 |
| Figura 10 - Sequência executiva para a substituição de trilhos - Sistema CDM. Fonte: Pandrol .....  | 27 |
| Figura 11 – Truque ferroviário adotado no presente trabalho. Fonte: adaptado de GBMX .....  | 39 |
| Figura 12 – Esquema do modelo utilizado no Software Midas Civil 2019. ....  | 47 |
| Figura 13 – Seção típica adotada. ....  | 47 |
| Figura 14 – Representação da modelagem MEF – Tentativa 1 .....  | 48 |
| Figura 15 – Modelo de elementos rígidos simulando o conjunto de dormentes e trilhos. ....   | 49 |
| Figura 16 – Representação do carregamento do revestimento.....  | 50 |
| Figura 17 – Representação do carregamento espreado .....  | 52 |

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1 - VLT`s no Brasil - Sistemas em operação ou projeto .....   | 15 |
| Tabela 2 - Locais e características de sistemas implantados com o sistema CDM nos anos de 2001 a 2006. Fonte: Pandrol..... | 27 |
| Tabela 3 - Comparação entre sistemas de via permanente .....   | 29 |
| Tabela 4 - Valores calculados para o módulo de reação do solo .....  | 31 |
| Tabela 5 - Classificação dos solos em função de sua capacidade de suporte.<br>.....  | 31 |
| Tabela 6 – Características dos veículos .....  | 34 |
| Tabela 7- Cargas de composições VLT – pesquisa do autor .....  | 37 |
| Tabela 8 - Exemplo de dimensionamento de cargas por eixo de uma composição VLT .....                                       | 38 |
| Tabela 9 – Tensões de tração máxima no concreto de fundação (MPa) .....  | 52 |
| Tabela 10 – avaliação do tamanho da malha MEF modelada.....  | 54 |
| Tabela 11 – Dimensionamento da operação – Estudo de caso 1 .....   | 58 |
| Tabela 12 – Coeficientes de agressividade – Estudo de caso 1 .....   | 59 |
| Tabela 13 – Dimensionamento da operação – Estudo de caso 2 .....   | 61 |
| Tabela 14 – Coeficientes de agressividade – Estudo de caso 1 .....   | 62 |

## SUMÁRIO

|   |    |
|---|----|
| RESUMO .....  | 7  |
| ABSTRACT .....  | 8  |
| LISTA DE FIGURAS .....  | 9  |
| LISTA DE TABELAS .....  | 10 |
| 1 INTRODUÇÃO .....  | 14 |
| 2 ESTRUTURAÇÃO DA PESQUISA.....   | 17 |
| 2.1 OBJETIVOS .....   | 17 |
| 2.2 METODOLOGIA.....  | 18 |
| 2.2.1 Embasamento .....   | 18 |
| 2.2.2 Estudo de caso 1 .....  | 19 |
| 2.2.3 Estudo de caso 2 .....  | 19 |
| PARTE 1 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E DADOS E PARÂMETROS A SEREM<br>UTILIZADOS..... | 20 |
| 3 SISTEMAS DE SUPERESTRUTURA DE VIA PERMANENTE .....                            | 21 |
| 3.1 SUPERESTRUTURA DE VIA PERMANENTE .....                                      | 21 |
| 3.1.1 Sistema com lastro.....   | 21 |
| 3.1.2 Sistema de fixação direta .....   | 22 |
| 3.1.3 Sistema de via embutida .....   | 24 |
| 3.1.4 Comparação dos sistemas de fixação de via .....                           | 28 |
| 3.2 SUBESTRUTURA DE VIA PERMANENTE .....  | 29 |
| 3.3 PARÂMETROS DE SUBLEITO.....   | 30 |
| 3.3.1 Parâmetros de subleito: Correlação CBR e EV2 .....                        | 31 |
| 3.3.2 Parâmetros de subleito: EV2.....  | 32 |

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 3.4   | VEÍCULO DE PROJETO.....  | 34 |
| 4     | DIMENSIONAMENTO UTILIZADO NOS SISTEMAS DE VLT PROJETADOS NO BRASIL.....        | 40 |
|       | PARTE 2 – MODELAGEM ESTRUTURAL E RESULTADOS .....                              | 42 |
| 5     | MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS.....   | 43 |
| 5.1   | SOFTWARE MIDAS CIVIL 2019 (v. 2.2).....  | 44 |
| 6     | MODELAGEM DA VIA PERMANENTE DO SISTEMA VLT.....                                | 45 |
| 6.1   | Premissas: .....   | 45 |
| 6.2   | Parâmetros:.....   | 45 |
| 6.3   | MODELAGEM POR MEF – TENTATIVA 1.....   | 48 |
| 6.4   | MODELAGEM POR MEF – TENTATIVA 2.....   | 50 |
| 6.4.1 | Modelagem por MEF – Resultados da Tentativa 2.....                             | 52 |
| 6.5   | ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO TAMANHO DA MALHA DE ELEMENTOS FINITOS NO MODELO ..... | 54 |
| 7     | DIMENSIONAMENTO DA ESTRUTURA – FADIGA DO CONCRETO.....                         | 55 |
|       | PARTE 3 – ESTUDOS DE CASO.....   | 57 |
| 8     | ESTUDO DE CASO 1 .....   | 58 |
| 9     | ESTUDO DE CASO 2 .....   | 61 |
|       | PARTE 4 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....                                      | 64 |
| 10    | CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....  | 65 |
| 10.1  | CONCLUSÕES.....  | 65 |
| 10.2  | RECOMENDAÇÕES.....   | 65 |
| 11    | BIBLIOGRAFIA .....   | 67 |
|       | ANEXO A – RESULTADOS DAS MODELAGENS.....                                       | 70 |

|   |     |
|---|-----|
| ANEXO B – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DAS DIMENSÕES DOS NÓS DO<br>MODELO ..... | 101 |
|---|-----|

## 1 INTRODUÇÃO

No cenário nacional e internacional são frequentemente noticiados problemas e deficiências nos sistemas de transporte público de cidades de médio e grande porte. Temas como falta de capacidade/superlotação, poluição sonora/visual/ambiental, longos tempos de viagem no deslocamento casa-trabalho-casa e outras mazelas são diariamente abordados nos meios de comunicação e clamam por soluções para a melhoria da qualidade de vida em tais cidades.

Sempre levando em conta as especificidades de cada cidade, as soluções para tais tipos de problemas devem ser analisadas e implementadas através da concepção de um Plano de Mobilidade Urbana. Na formulação de tal plano deve ser definido um conjunto de ações, dentre as quais destacam-se aquelas destinadas à requalificação e/ou implantação e/ou modernização da infraestrutura dos sistemas de transporte público que tornem mais curtas, mais rápidas, confortáveis e seguras as viagens em uma cidade/metrópole.

Em tal contexto, o sistema VLT-Veículo leve sobre trilhos possui características que o credenciam como uma das soluções a serem consideradas no conjunto de ações definidas no Plano de Mobilidade Urbana. Para médias demandas de passageiros, o sistema VLT pode suprir com eficácia as necessidades de deslocamento, sendo que a sua inserção no meio urbano é menos traumática e custosa que outros sistemas sobre trilhos de igual ou maior capacidade como uma linha de metrô e de trens de subúrbio.

As cargas do veículo típico de tal sistema estão na ordem de 12 toneladas por eixo, com grandeza similar dos veículos rodoviários de carga, condição que, associada a outros fatores, permite a sua implantação em vias urbanas sem maiores necessidades de reforços na base de implantação da via permanente. No âmbito nacional, há poucos sistemas VLT em operação, havendo alguns, no entanto, em fase de projeto e/ou construção, conforme indicações da Tabela 1 a seguir:

Tabela 1 - VLT's no Brasil - Sistemas em operação ou projeto

| <b>CIDADE</b>  | <b>STATUS</b>                |
|----------------|------------------------------|
| Rio de Janeiro | Em operação                  |
| Santos         | Em operação                  |
| Cariri         | Em operação                  |
| Cuiabá         | Em construção/paralisado     |
| Fortaleza      | Em construção                |
| Goiânia        | Projeto Executivo/paralisado |
| Brasília       | Em construção/paralisado     |
| Niterói        | Projeto – preliminar         |
| Campinas       | Projeto – preliminar         |

Fonte: O autor.

Para a via permanente de VLT's, há diferentes soluções para sistemas de suporte e assentamento de via. Em sua grande maioria os fabricantes são europeus e auxiliam através de consultoria o dimensionamento da via permanente. Os cálculos geralmente levam coeficientes e parâmetros encontrados na Europa, incorrendo em que a alternativa adotada possa não ser a melhor para as condições nacionais. Outros casos envolvem a utilização de metodologia de dimensionamento para pavimento rodoviário no procedimento de dimensionamento, devido à similaridade da grandeza das cargas envolvidas. Também há casos em que os fornecedores apresentam soluções e dados estabelecidos de forma empírica, sem a memória de cálculo completa, o que inviabiliza o total entendimento da solução.

Também há parâmetros calculados com unidades diferentes das utilizadas no Brasil e provindas de ensaios aqui inexistentes. Utilizam-se fatores de correlação entre ensaios europeus e locais, o que traz incerteza e a não garantia das condições efetivamente modeladas.

Com base neste panorama o objetivo do presente trabalho é a proposição de um procedimento de dimensionamento completo da via permanente utilizando parâmetros dos materiais presentes no território nacional e com avaliação tangível, ou seja, com ensaios passíveis de serem aqui aplicados. A estrutura da via permanente deverá ser definida através da utilização do método de elementos finitos, com situações de diferentes tipos e espessuras de bases cimentadas, diferentes cargas,

arranjos de eixos, etc e serão avaliadas as tensões na estrutura. O procedimento de avaliação será desenvolvido com base em parâmetros já estudados e/ou prescritos em normas e manuais e aqueles utilizados usualmente no Brasil.

Pretende-se com este estudo propor uma metodologia de dimensionamento que possa ser aplicada em todo o território nacional.

## **2 ESTRUTURAÇÃO DA PESQUISA**

### **2.1 OBJETIVOS**

O principal objetivo deste trabalho consiste no estabelecimento de critérios de projeto para o dimensionamento de via permanente de sistemas de Veículos Leves Sobre Trilhos – VLT a serem implantados no Brasil, utilizando coeficientes, normas, ensaios e métodos construtivos já difundidos e passíveis de utilização em território nacional.

Serão feitas ao longo do trabalho comparações de tecnologia de estruturas de pavimento para VLT's, ferrovias clássicas (preferencialmente aquelas de passageiros) e pavimentos rodoviários, tanto em asfalto como em concreto, para embasamento das tomadas de decisão com vistas ao estabelecimento dos critérios de projeto a serem propostos no âmbito dos objetivos estabelecidos.

Serão apresentados e desenvolvidos os conceitos relacionados a cada tipo de dado necessário para a construção do modelo de superestrutura da via permanente, abordando os valores usuais e esperados, parâmetros de cada material e também o embasamento do método de cálculo, através da modelagem da estrutura por elementos finitos.

Na sequência, serão expostas as tecnologias existentes para a implantação da via permanente de sistemas VLT, bem como as normativas ou o conjunto delas que são utilizadas em outros países. Serão apresentadas considerações daquelas que podem ser aplicadas diretamente no caso de sistemas no Brasil e porventura as adaptações/considerações necessárias para aplicabilidade em nosso país.

Para embasar e validar os conceitos discorridos no presente trabalho, serão apresentados dois estudos de caso e, onde possível, a comparação dos dados gerados pela metodologia proposta neste trabalho com casos já projetados ou implantados no Brasil.

## 2.2 METODOLOGIA

### 2.2.1 Embasamento

De início serão mostrados os itens com relevância para o dimensionamento de uma via permanente de VLT. Serão analisados os itens relacionados à influência do material rodante em tal dimensionamento, com a apresentação de dimensões típicas, configuração e modulação das composições e principalmente pesos e carregamentos máximos, importantes para o embasamento deste trabalho.

Outro aspecto relevante refere-se às soluções típicas usualmente concebidas para a via permanente. Há a configuração clássica, com lastro, dormentes e trilhos (pouco usadas em sistemas VLT), assim como os sistemas onde os componentes da via permanente são concretados em uma laje única ou vigamento e também os sistemas em que os trilhos são embutidos em canaletas com preenchimento de resinas poliméricas. Serão apresentados os modelos de cada tipo, vantagens, desvantagens, aplicações, parâmetros requisitados e demais dados necessários para o dimensionamento estrutural destes sistemas.

O embasamento metodológico abordará também os parâmetros do subleito, item de grande relevância neste trabalho devido às condições diferentes dos solos brasileiros (chamados de tropicais) em relação àqueles presentes na América do Norte ou Europa, por exemplo. Serão apresentados os ensaios normatizados que são utilizados no Brasil e em outros países, além das possíveis adaptações/correlação com ensaios existentes, porém não normatizados no Brasil.

Também será elaborada uma breve coleta dos métodos de cálculo já utilizados em sistemas VLT projetados no Brasil. Serão apresentadas as limitações, as adaptações e também o cenário que seria ideal no quesito disponibilidade de dados e ensaios para o dimensionamento de via permanente de sistemas VLT.

Por fim, será apresentado o método dos elementos finitos, assim como o software que será utilizado para a modelagem e avaliação da solução a ser adotada. Na sequência será então apresentado o resultado da modelagem pelo método proposto, com a apresentação de ábacos que possibilitarão o dimensionamento das

estruturas para uma gama de situações típicas que ocorrem nos projetos elaborados no Brasil, de acordo com os parâmetros discutidos nos itens anteriores.

Para validar as soluções apresentadas neste trabalho, serão apresentados 2 estudos de caso.

### **2.2.2 Estudo de caso 1**

Construída toda a base supracitada, passar-se-á ao primeiro estudo de caso. Será apresentado um trecho de um sistema VLT, de topografia levemente ondulada, com parâmetros de solo e carregamento considerando a cidade de São Paulo. Como trata-se de trecho típico, não será necessário apresentar projetos de traçado ou outras particularidades. Os tipos de solo são bem conhecidos na cidade e possuem ampla literatura disponível, porém, haverá a necessidade de adaptações para os parâmetros necessários à modelagem que será desenvolvida em capítulo específico.

### **2.2.3 Estudo de caso 2**

O segundo estudo de caso será desenvolvido em local de topografia plana e com parâmetros de solo de cidades litorâneas, tais quais Rio de Janeiro e Santos. Estas localidades possuem a vantagem de que já há sistemas de VLT operando e, caso sejam disponibilizados dados pelos órgãos competentes, possibilitarão a comparação do projeto implantado com o projeto de acordo com a metodologia aqui desenvolvida.

Entende-se que estes dois casos englobam grande parte dos potenciais sistemas VLT a serem implantados no território nacional.

**PARTE 1 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E DADOS E PARÂMETROS A SEREM UTILIZADOS**

### 3 SISTEMAS DE SUPERESTRUTURA DE VIA PERMANENTE

Os sistemas VLT, por se tratarem de modal ferroviário, possuem diversos tipos e arranjos da superestrutura de via permanente. Os principais tipos são descritos a seguir.

#### 3.1 SUPERESTRUTURA DE VIA PERMANENTE

##### 3.1.1 Sistema com lastro

Este sistema é clássico e utilizado desde os primórdios nas ferrovias, composto por trilhos afixados em dormentes, apoiados em lastro e sublastro, que tem a função de dissipar os esforços e carregamentos ao subleito, em níveis de tensão toleráveis pelo mesmo.

Apresenta-se na Figura 1 ilustração desse modelo de sistema.

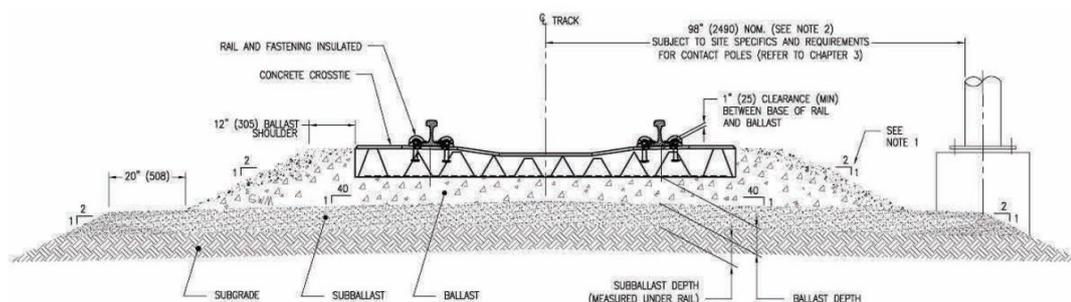


Figura 1: Vias em lastro. Fonte: LRT Track Design Manual

Tal sistema tem como vantagem a possibilidade de ajuste da geometria e de recuperação dos componentes, como a troca dos dormentes, lastro e sublastro. Porém, há a desvantagem de não permitir o tráfego de veículos e até mesmo de pessoas sobre o mesmo. Por este motivo o mesmo não é tão utilizado em sistemas VLT, que em grande parte das vezes estão situados em áreas urbanas.

O sistema com lastro também apresenta a necessidade de manutenções de grande vulto com determinada frequência, inclusive com a sua troca. Com o tempo, os carregamentos repetitivos quebram os grãos do lastro, aumentando a sua rigidez e alterando o módulo de via, necessitando assim de ações corretivas para trazer novamente os parâmetros da via dentro dos valores estipulados em projeto.

O sistema com lastro também tem seu desempenho diretamente ligado à drenagem do subleito. Em casos urbanos, em que é desejável que os trilhos estejam no mesmo nível do seu entorno (ou com pequenas diferenças de nível), a manutenção e a limpeza do sistema de drenagem são dificultadas, podendo degradar mais rapidamente os parâmetros da via. Em ferrovias de carga geralmente não ocorre esse tipo de problema, pois a plataforma ferroviária normalmente encontra-se acima do nível do entorno e, conseqüentemente, permite o escoamento das águas que adentram à plataforma ferroviária.

### **3.1.2 Sistema de fixação direta**

É o sistema mais comumente utilizado em sistemas VLT, no qual em sua quase totalidade de casos, utiliza-se rede aérea de tração, inclusive no interior de túneis. Também é utilizado em áreas onde pode ser dificultada a manutenção da geometria de vias com lastro, optando-se por este sistema.

Há distintas tecnologias e modos de fixação dos mesmos, alguns de domínio público e outros comerciais. A designação “fixação direta” vem do fato das cargas serem transferidas a uma laje ou vigas de concreto, sem a utilização de dormentes comuns e lastro.

Um sistema comercial de grande utilização em linhas de VLT é o Rheda 2000, fornecido pela empresa Railone. Consiste em dormentes bi-bloco unidos por treliça metálica, com pós concretagem da laje contínua armada unindo os dormentes. Utiliza fixações de trilho (elásticas) comuns, por se tratar de dormentes. Sua modelagem estrutural se dá através de apoios discretos.

Durante a implantação dos mesmos há o nivelamento geométrico espacial (direções x, y e z) através de gabaritos ou parafusos de nivelamento que se apoiam na laje inferior. Após a concretagem é garantida a estabilidade geométrica da via, configurando uma vantagem frente aos sistemas com lastro.

As Figuras 2 a 4 a seguir ilustram os componentes deste tipo de via permanente e seu aspecto final.

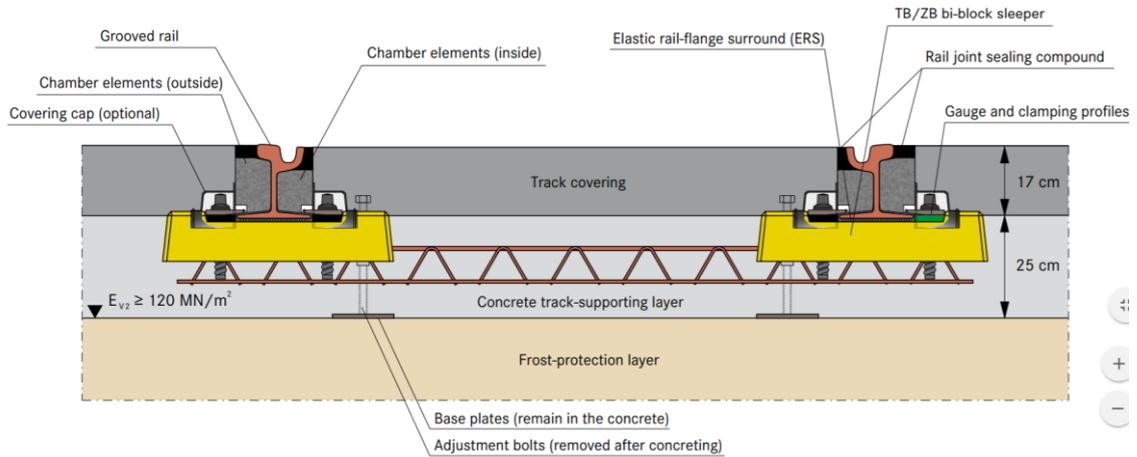


Figura 2: Via em fixação direta – Sistema Rheda 2000. Fonte: Railone

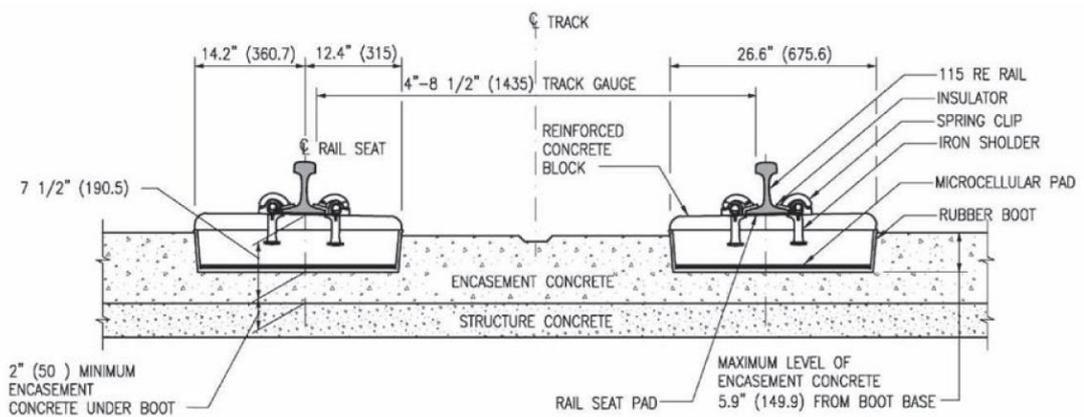


Figura 3: Via em fixação direta – Dormente bi-bloco independente. Fonte: LRT Track Design Manual



Figura 4: Via em fixação direta – Laje de travamento concretada e aspecto final da via, com revestimento em bloquetes de concreto. Fonte: Railone

A fim de que a implantação de um sistema VLT apresente uma boa inserção urbana, com o transporte ao nível do pedestre, o revestimento pode ser por grama ou por blocos intertravados, concreto estampado, etc. Geralmente a primeira alternativa é utilizada quando não é desejável a circulação de pedestres, enquanto que, no segundo caso, é permitida a circulação de pedestres nas travessias (faixas de pedestres) e em centros urbanos. Nestes casos, a velocidade deve ser reduzida, visando evitar acidentes.

A título de informação, este tipo de via também é utilizado em Sistemas TGV/TAV (Trens de Grande/Alta Velocidade), pois não há o fenômeno de arrancamento de lastro devido aos fatores aerodinâmicos quando da passagem do trem (vórtices laterais causados pela resistência do ar à passagem do trem). Para sistemas de metrô subterrâneos esta solução tem grande aceitação, pois os sistemas com lastro têm como efeito secundário a geração de pó com as quebras dos agregados, o que pode trazer problemas de visibilidade no interior de túneis.

### **3.1.3 Sistema de via embutida**

Do inglês *embedded*, esse sistema comumente é traduzido para o Português como “embebido”, o qual, na visão do autor, não corresponde à melhor definição para este sistema de via permanente. Dentre as alternativas, entende-se o termo “embutido” como a melhor definição para este sistema de via. TCRP (2012) define este sistema como aquele em que a via está completamente embutida - exceto o topo e a lateral de contato dos trilhos – dentro do pavimento.

Dos sistemas comerciais oferecidos, a fabricante Pandrol oferece o sistema *CDM Q-track*, que é um sistema de suporte de via permanente com a utilização de vigas de concreto contínuas em “U”, com os trilhos afixados através de uma jaqueta polimérica, também contínua. Sua modelagem estrutural se dá através de apoio contínuo.

Também há a solução concebida por um fabricante alemão (Edilon Sedra), que consiste em um sistema de suporte de via permanente com utilização de vigas contínuas em “U” e com os trilhos afixados com resina polimérica ou jaquetas coladas.





Figura 7: Sistema CDM em implantação e após implantado – VLT de Cuiabá. Fonte: Governo do Mato Grosso / KPMG – Relatório de Obras do Sistema VLT

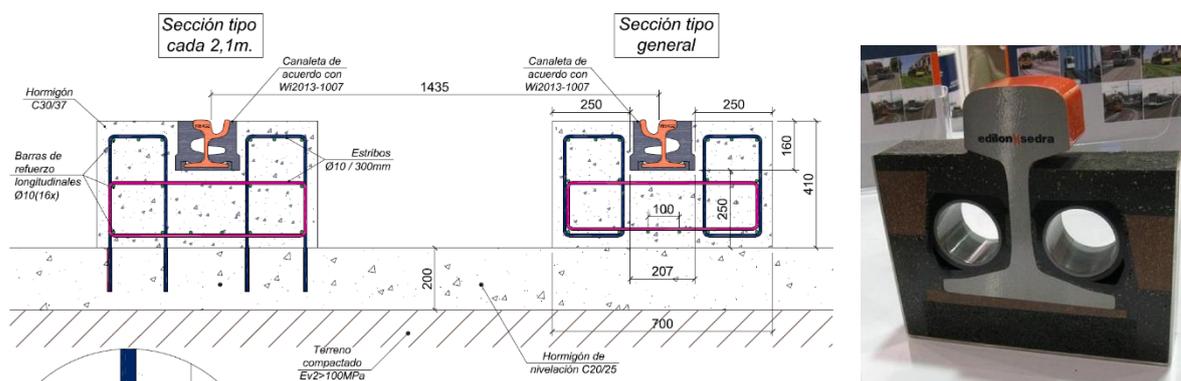


Figura 8: Sistema Edilon Sedra – Seção típica e modelo real. Fonte: Edilon Sedra e o autor



Figura 9: Sistema Edilon Sedra – Aplicação da resina polimérica. Fonte: Edilon Sedra

No tocante à manutenção do sistema CDM, em uma eventual troca de trilhos (fato comum, devido ao desgaste proporcionado pelo contato roda-trilho) é necessário

o corte da jaqueta polimérica a colocação de uma nova jaqueta afixada com cunhas de resina elastomérica.

A seguir é apresentada a Figura 10 na qual está ilustrada a sequência executiva da troca de trilhos:



Figura 10 - Sequência executiva para a substituição de trilhos - Sistema CDM. Fonte: Pandrol

Para o sistema CDM, há um questionamento quanto à longevidade do mesmo, bem como a falta de séries históricas, por se tratar de um sistema recente. De acordo com material disponibilizado pela Pandrol, o primeiro caso de utilização desta tecnologia foi em 2001 e em um trecho de apenas 750 metros, o que torna essa solução muito recente quando comparada às soluções em lastro e com fixação direta.

Na Tabela 2 são apresentados os sistemas VLT com tecnologia CDM implantados de 2001 a 2006.

Tabela 2 - Locais e características de sistemas implantados com o sistema CDM nos anos de 2001 a 2006. Fonte: Pandrol

| Ano  | Rede    | Trecho                     | Tipo de via | Carga  | Total (m) |
|------|---------|----------------------------|-------------|--------|-----------|
| 2001 | FR RATP | Paris                      | Tramway     | 120 kN | 750       |
| 2003 | FR RATP | Paris: Line T1 - Extension | Tramway     | 120 kN | 508       |
| 2004 | FR RATP | Paris: Place de la Liberté | Tramway     | 120 kN | 360       |

| Ano  | Rede               | Trecho  | Tipo de via | Carga  | Total (m)       |
|------|--------------------|---|-------------|--------|-----------------|
|      | GR TRAMSA          | Paris: Tramway des Maréchaux Sud<br>Athens: Athens Tramway      | Tramway     | 120 kN | 55100           |
| 2005 | BE MIVB/STIB       | Brussels:   | Tramway     | 100 kN | 466             |
|      | De Lijn            | Brussels:   | Tramway     | 100 kN | 535             |
|      |                    | Gent: Gr. Britt. Laan + K. Albertlaan                           | Tramway     | 100 kN | 6.929           |
|      | FR RATP            | Paris: Tramway des Maréchaux Sud                                | Tramway     | 120 kN | 315             |
| 2006 | BE MIVB/STIB       | Brussels:   | Tramway     | 100 kN | 1.672           |
|      | ES Metro de Madrid | Madrid: Depot Hortaleza 1 Madrid:<br>Depot Hortaleza 4          | Metro       | 155 kN | 5.538           |
|      | Tranvía Parla      | Madrid: ML1 Metro Ligerero Sanchinarro                          | Metro       | 155 kN | 1.521           |
|      | Tranvía Parla      | Madrid: ML2 Metro Ligerero Pozuelo                              | Tramway     | 120 kN | 8.118           |
|      | Tranvía Parla      | Madrid: ML3 Metro Ligerero Boadilla                             | Tramway     | 120 kN | 3.492           |
|      | Tranvía Parla      | Madrid: ML3 Cocheras Metro Ligerero Boadilla                    | Tramway     | 120 kN | 17.362          |
|      | Tranvía Parla      | Madrid: Tramway Parla   | Tramway     | 120 kN | 28.002<br>3.735 |
|      | FR RATP            | Paris: Renovation T1  | Tramway     | 120 kN | 1.475           |
|      | Saint Etienne      | Paris: Tramway des Maréchaux Sud<br>Saint Etienne: Place Carnot | Tramway     | 120 kN | 1.100           |
|      | PT STCP            | Porto: Praça da Liberdade                                       | Tramway     | 100 kN | 515             |
|      | AR Subterráneos    | Buenos Aires: Crossings   | Tramway     | 120 kN | 157             |

Observa-se nesta solução que os sistemas de “Tramway” ou VLT foram dimensionados para cargas de 100 kN e 120 kN (10 a 12 tf) e o sistema de metrô leve para um carregamento de 155 kN.

Igual dificuldade de manutenção ocorre com o sistema Edilon-Sedra, com a dificuldade para a troca de trilhos. Neste caso, porém, a resina para travamento e fixação dos trilhos é do tipo polimérica, havendo assim uma melhor aderência entre o “novo/velho”, sendo que devido a este mecanismo, o autor entende que os parâmetros originais possam ser mantidos.

### 3.1.4 Comparação dos sistemas de fixação de via

O autor, com base no estudo das soluções de fixação de vias utilizadas para Sistemas VLT e com auxílio de consultores especializados no tema, apresenta a tabela comparativa dos sistemas de via permanente.

Tabela 3 - Comparação entre sistemas de via permanente

| Aspectos técnicos considerados na comparação   | Sistema de via com lastro | Sistema de via com dormente bi-bloco | Sistema de via com trilho embutido |
|--|---------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|
| Sistema de construção  | Convencional              | Top Down                             | Top Down                           |
| Precisão de instalação   | Boa                       | Boa                                  | Boa                                |
| Facilidade de instalação   | Boa                       | Boa                                  | Boa                                |
| Rapidez de construção  | Boa                       | Boa                                  | Boa                                |
| Preservação da bitola da via   | Boa                       | Boa                                  | Regular                            |
| Preservação do nivelamento longitudinal e transversal  | Regular                   | Boa                                  | Regular                            |
| Resistências aos esforços transversais devidos à circulação dos trens (principalmente em curvas) | Boa                       | Boa                                  | Regular                            |
| Facilidade de troca de trilho  | Boa                       | Boa                                  | Regular                            |
| Resistência ao descarrilamento dos trens   | Boa                       | Boa                                  | Boa                                |
| Vida útil  | Longa (> 30 anos)         | Longa (> 30 anos)                    | Indefinida                         |

### 3.2 SUBESTRUTURA DE VIA PERMANENTE

Motta (2017) define como subestrutura a região composta por lastro, sublastro, subleito e drenagem, bem como a superestrutura como sendo composta por trilhos, dormentes, fixações e AMV's (aparelhos de mudança de via). Em uma analogia desta classificação, podemos inferir que as lajes são da superestrutura e as camadas inferiores, granulares ou cimentadas, bem como o subleito compõem a infraestrutura (ou subestrutura) da via permanente.

Para sistemas ferroviários voltados ao transporte de carga, geralmente a estrutura ferroviária é composta de lastro e sublastro (camadas granulares) e é incomum a utilização de camadas cimentadas (BGTC – brita graduada tratada com cimento e CCR – concreto compactado a rolo), principalmente por questões ligadas ao módulo de elasticidade da via. Nestes sistemas a carga é da ordem de 30 ton/eixo, chegando a extremos como 40 ton/eixo, como por exemplo nos estudos para a ferrovia do Carajás, operada pela Vale.

No presente trabalho serão modeladas e avaliadas distintas combinações de espessuras de lajes de concreto, com ou sem camada cimentada, bem como as tensões no topo do subleito da plataforma ferroviária, a fim de se dimensionar a via permanente de um sistema VLT.

### 3.3 PARÂMETROS DE SUBLEITO

Especial atenção deve ser dada aos parâmetros do subleito. No Brasil são utilizados ensaios do tipo CBR para a determinação da capacidade de suporte. Por outro lado, na Europa é utilizado o ensaio de carregamento estático de placa, normatizado pela norma NF P94 117-1: “*Sols: reconnaissance et essais - Portance des plates-formes - Partie 1: module sous chargement statique à la plaque (EV2)*” (solos: reconhecimento e teste - Plataforma elevatória - Parte 1: módulo sob carga estática (EV2) – tradução livre do autor).

Segundo Morais, Minhoto e Paula (2015, p.3) “O módulo de deformabilidade  $E_{v2}$  é correspondente ao segundo ciclo de carga do ensaio de carga em Placa, calculados através da solução de Boussinesq, para o carregamento estático sobre uma placa circular rígida em meio elástico linear.”

A determinação do módulo de reação do solo a partir do módulo  $E_{v2}$ , segundo a norma NF P94 117-1, é dada pela fórmula:

$$k = \frac{4E_{v2}}{\pi d(1 - \nu^2)}$$

Onde:

**d** = diâmetro da placa usada para realização do ensaio = 600 mm;

**v** = coeficiente de Poisson = 0,35.

Os valores típicos calculados para o módulo de reação são os seguintes:

Tabela 4 - Valores calculados para o módulo de reação do solo

| Módulo Ev2<br>MPa | Módulo de reação do solo<br>k MPa/m |
|-------------------|-------------------------------------|
| 20                | 49                                  |
| 35                | 85                                  |
| 50                | 121                                 |
| 80                | 194                                 |
| 120               | 290                                 |

### 3.3.1 Parâmetros de subleito: Correlação CBR e EV2

Especial atenção será dada a este assunto, visto que os projetos rodoviários e ferroviários desenvolvidos no Brasil utilizam majoritariamente em seu dimensionamento o módulo CBR para determinação da capacidade de suporte do subleito. Para tanto, citamos algumas bibliografias que abordam a conversão entre os dois parâmetros.

Há o documento técnico “*Voirie à faible trafic en béton. Conception et dimensionnement*” - (Estradas de concreto de baixo tráfego. Projeto e dimensionamento – *tradução livre do autor*), de dezembro de 2002 e apresentado na Tabela 5:

Tabela 5 - Classificação dos solos em função de sua capacidade de suporte.

| p         | Exame visual (eixo de 13 t)                          | CBR          | Módulo de deformação<br>EV2 (MPa) |
|-----------|--|--------------|-----------------------------------|
| p0        | circulação impossível, solo inapto, muito deformável | CBR ≤ 3      | EV2 ≤ 15                          |
| p1        | deformação da trilha de roda do eixo de 13 ton       | 3 < CBR ≤ 6  | 15 < EV2 ≤ 20                     |
| p2 ou PF1 | deformável   | 6 < CBR ≤ 10 | 20 < EV2 ≤ 50                     |

| p         | Exame visual (eixo de 13 t)                |                        | CBR           | Módulo de deformação EV2 (MPa) |
|-----------|--|------------------------|---------------|--------------------------------|
| p3 ou PF2 | nenhuma deformação atrás do eixo de 13 ton | pouco deformável       | 10 < CBR ≤ 20 | 50 < EV2 ≤ 120                 |
| p4 ou PF3 |  | muito pouco deformável | 20 < CBR ≤ 50 | 120 < EV2 ≤ 200                |
| p5 ou PF4 |  | muito pouco deformável | CBR > 50      | EV2 > 200                      |

Minhoto (2014) avaliou a correlação entre o módulo CBR e o módulo EV2 em 9 pontos de ensaio. “O estudo permitiu comparar os resultados com as relações de caracterização mecânica da fundação (E vs CBR) preconizadas no âmbito da metodologia de concepção de pavimentos flexíveis, proposta pela Shell.”

Shell (1985) propôs que:

$$E_{sf} (MPa) = 10 \times CBR (\%)$$

Minhoto (2014) concluiu que o coeficiente de relação entre o módulo EV2 e o CBR com valor médio de 6,76. Este coeficiente diverge do valor médio proposto pela Shell (igual a 10), porém, dentro do intervalo da publicação original, entre 5 e 20.

Novamente Minhoto (2015) refinou a pesquisa elaborada no ano anterior. Desta vez foram levantados 19 pontos de ensaio e o coeficiente auferido da relação entre o módulo EV2 e o CBR obteve valor médio de 6,83, muito próximo do trabalho do ano anterior.

Comparando-se os valores do documento técnico de 2002 com os obtidos por Minhoto, verifica-se que os coeficientes se situam entre 4 a 7 vezes, distantes daqueles preconizados por Shell (1985), porém, dentro do intervalo de confiança.

O autor considera que esta não é a melhor solução para o dimensionamento, que pode trazer incertezas para o modelo e, conseqüentemente, para a estrutura a ser calculada.

### 3.3.2 Parâmetros de subleito: EV2

Já no Brasil uma alternativa seria a utilização do módulo de reação, determinado através da Norma DNIT 055/2004-ME – “Pavimento rígido - Prova de carga estática para determinação do coeficiente de recalque de subleito e sub-base em projeto e

avaliação de pavimentos - Método de ensaio”. Esta norma é baseada na norma americana ASTM-D-1196/93.

Segundo esta norma, uma placa circular com área mínima de 0,5 m<sup>2</sup> é carregada em sucessivos incrementos de carga de 0,15 a 0,20 kgf/cm<sup>2</sup> até atingir o carregamento de 1,8 kgf/cm<sup>2</sup>. O descarregamento é feito em estágios. Por fim, com a plotagem dos dados obtidos no ensaio, obtém-se a curva carga x recalque e obtêm-se o coeficiente de deformabilidade do solo (ks) do material ensaiado.

Balbo (2009) afirma que o termo dado a este coeficiente, também tratado pela norma Brasileira como “coeficiente de recalque” é errôneo, visto que o termo original definido por Westergaard diz respeito, conceitualmente, à deformação elástica, enquanto que recalque diz respeito à deformação plástica.

A norma Francesa NF P94 117-1, também conhecida por “ensaio de Westergaard” tem sua metodologia de ensaio semelhante ao método preconizado na norma DNIT 055/2004-ME, com variações no critério de parada e nos incrementos de carregamento.

Ao longo dos estudos do autor, que visava propor adaptações das normativas brasileiras a fim de possibilitar o ensaio de parâmetros do subleito para permitir o dimensionamento baseado em métodos europeus, o DNIT colocou para consulta pública em agosto de 2016 e publicou em março de 2017 a norma DNIT 410/2017 – ME – “Solos - Prova de carga estática em placa para controle de qualidade na execução de aterros solo-enrocamento - Método de Ensaio”, na qual consta :

“A presente Norma foi preparada pelo Instituto de Pesquisas Rodoviárias–IPR/DPP para servir como documento base para a determinação do Módulo de Deformabilidade (EV2) utilizando o ensaio de carga estática sobre placa. O ensaio pode ser realizado para controle da qualidade das camadas de solo-enrocamento utilizadas na construção de aterros.”

Ou seja, agora há uma normativa brasileira que prevê o segundo ciclo de carregamento (o módulo EV2 da Norma Francesa), tão importante e utilizado nos métodos de dimensionamento de vias de VLT europeias. Outro fator facilitador é que o equipamento utilizado é o mesmo a ser utilizado para os ensaios preconizados na

NBR 6022 - Projeto e execução de fundações, diminuindo os custos dos ensaios por importação de equipamentos, por exemplo.

### 3.4 VEÍCULO DE PROJETO

Os veículos componentes de um sistema de VLT, por serem fabricados por diversas empresas concorrentes que buscam continuamente a apresentação de novas tecnologias, possuem uma grande variedade de características.

Entre as principais características que possuem variações e que possam influenciar o dimensionamento de via destacam-se as dimensões e pesos (cargas) dos mesmos e para o dimensionamento de uma via permanente o fator preponderante é o peso por eixo. Outros parâmetros tais como a taxa de aceleração e desaceleração, velocidade máxima e raios de curvas horizontais e verticais não influem no dimensionamento estrutural da via permanente. Estes parâmetros são importantes principalmente para o projeto do traçado geométrico, onde a inadequação de algum parâmetro requerido pode trazer consequências, principalmente na ocorrência de acidentes.

A título de exemplo, a Tabela 6 apresenta veículos de sistemas VLT operados nos Estados Unidos e Europa:

Tabela 6 – Características dos veículos

| Cidade    | Fabricante     | Ano de Entrega | Peso Vazio - AW0 | Carregamento máximo | Comprimento | Configuração     | Nível do Piso |
|-----------|----------------|----------------|------------------|---------------------|-------------|------------------|---------------|
|           |                |                | (tf)             | eixo (tf)           | (m)         |                  |               |
| Baltimore | ABB            | 1989/1995      | 48,98            | 10,89               | 28,96       | 6-eixos 2-carros | Elevado       |
| Boston KS | KS             | 1982           | 38,55            | 8,48                | 22,56       | 6-eixos 2-carros | Elevado       |
|           | Breda          | 2000           | 39,14            | 8,62                | 22,56       | 6-eixos 2-carros | 50% Baixo     |
| Buffalo   | Tokyu          | 1985           | 32,2             | 9,98                | 20,12       | 4-eixos 1-carros | Elevado       |
| Calgary   | Siemens SD 160 | 1999/2008      | 40,64            | 8,89                | 24,69       | 6-eixos 2 carros | Elevado       |
| Charlotte | Siemens S 70   | 2004/2008      | 43,9             | 9,71                | 28,35       | 6 eixos 3 carros | 70% Baixo     |
| Cleveland | Breda          | 1982           | 41,41            | 8,89                | 24,38       | 6-eixos 2-carros | Elevado       |
| Dallas    | KS 1           | 1998           | 48,98            | 10,52               | 28,04       |                  | Elevado       |
|           | KS 2           | 2007           | 63,5             | 13,77               | 37,49       | 8-eixos 3-carros | Baixo         |

| Cidade       | Fabricante      | Ano de Entrega | Peso Vazio - AW0 | Carregamento máximo | Comprimento | Configuração               | Nível do Piso |
|--------------|-----------------|----------------|------------------|---------------------|-------------|----------------------------|---------------|
|              |                 |                | (tf)             | eixo (tf)           | (m)         |                            |               |
| Denver       | Siemens SD 100  | 1995           | 39,91            | 8,75                | 24,69       | 6-eixos 2-carros           | Elevado       |
|              | Siemens SD 160  | 2008           | 39,91            | 8,75                | 24,69       | 6-eixos 2-carros           | Elevado       |
| Edmonton     | Duewag U 2      | 1982           | 30,52            | 7,17                | 24,08       | 6-eixos 2-carros           | Elevado       |
|              | Siemens SD-160  | 2009           | 41,59            | 9,04                | 24,69       | 6-eixos 2-carros           | Elevado       |
| Houston      | Siemens S 70    | 2004           | 44,67            | 9,93                | 29,26       | 6-eixos 3-carros           | 70% Baixo     |
| Los Angeles  | Nippon          | 1992           | 44,45            | 9,71                | 27,13       | 6-eixos 2-carros           | Elevado       |
|              | Siemens SD100   | 1993           |                  | -                   | -           | 6-eixos 2-carros           | Elevado       |
|              | Siemens P2000   | 1999           | 44,45            | 9,71                | 27,13       | 6-eixos 2-carros           | Elevado       |
|              | Breda 2550      | 2008           | 40,37            | 9,04                | 27,43       | 6-eixos 2-carros           | Elevado       |
| Minneapolis  | BBD Flexity     | 2004           | 44,98            | 9,92                | 28,65       | 6 eixos 3-carros           | 70% Baixo     |
| New Jersey   | Kinki Sharyo    | 2000           | 42,41            | 9,39                | 27,43       | 6 eixos 3-carros           | 70% Baixo     |
|              | BBD (DMU)       | 2005           | 53,97            | 16,33               | 31,09       | 6 eixos 3-carros           | 70% Baixo     |
| Norfolk      | Siemens S 70    | 2008           | 43,9             | 9,73                | 28,35       | 6-eixos 3-carros           | 70% Baixo     |
| Philadelphia | City            | 1982           | 25,99            | 5,62                | 15,24       | 4-eixos 1-carro Single end | Elevado       |
|              | Suburban        | 1982           | 25,99            | 5,62                | 15,24       | Double end                 | Elevado       |
| Phoenix      | Kinki Sharyo    | 2008           | 46,27            | 10,07               | 27,74       | 6-eixos 3-carros           | 70% Baixo     |
| Pittsburgh   | Duewag /CAF     | 1984/R2005     | 44,00            | 9,53                | 25,60       | 6-eixos 2-carros           | Elevado       |
|              | CAF             | 2004           | 45,36            | 9,74                | 25,60       | 6-eixos 2-carros           | Elevado       |
| Portland     | Bombardier      | 1986           | 41,80            | 9,25                | 27,13       | 6-eixos 2-carros           | Elevado       |
|              | Siemens SD 660  | 2000           | 49,44            | 10,61               | 28,04       | 6-eixos 2-carros           | Elevado       |
|              | Siemens S 70    | 2009           | 44,91            | 9,97                | 29,26       | 6-eixos 3-carros           | 70 % Baixo    |
|              | Skoda Inekon    | 2006           | 25,40            | 8,90                | 20,12       | 4-eixos 3-carros           | 50% Baixo     |
| Sacramento   | Siemens SD 100  | 1991           | 35,01            | 7,88                | 24,08       | 6-eixos 2-carros           | Elevado       |
|              | CAF             | 2003           | 42,52            | 9,24                | 25,30       | 6-eixos 2-carros           | Elevado       |
|              | UTDC            | 1989           | 44,77            | 9,74                | 26,82       | 6-eixos 2-carros           | Elevado       |
| St. Louis    | Siemens SD100-1 | 1993           | 41,00            | 9,14                | 27,13       | 6-eixos 2-carros           | Elevado       |
|              | Siemens SD100-2 | 2001           | 42,18            | 9,33                | 27,13       | 6-eixos 2-carros           | Elevado       |

| Cidade         | Fabricante         | Ano de Entrega | Peso Vazio - AW0 | Carregamento máximo | Comprimento | Configuração     | Nível do Piso |
|----------------|--------------------|----------------|------------------|---------------------|-------------|------------------|---------------|
|                |                    |                | (tf)             | eixo (tf)           | (m)         |                  |               |
| Salt Lake      | Siemens SD 100     | 2002           | 39,92            | 8,75                | 24,69       | 6-eixos 2-carros | Elevado       |
|                | UTDC               | 1989           | 44,77            | 9,74                | 26,82       | 6-eixos 2-carros | Elevado       |
|                | Siemens S70        | 2010           |                  |                     |             | 6-eixos 3-carros | 60% Baixo     |
| Seattle        | Kinki Sharyo       | 2008           | 46,27            | 10,16               | 28,96       | 6-eixos 3-carros | 70% Baixo     |
| San Diego      | Siemens U2         | 1989           | 32,57            | 7,48                | 24,08       | 6-eixos 2-carros | Elevado       |
|                | Siemens SD100      | 1996           | 39,92            | 8,75                | 24,69       | 6-eixos 2-carros | Elevado       |
|                | Siemens S 70       | 2005           | 43,32            | 9,56                | 27,43       | 6-eixos 3-carros | 70% Baixo     |
| San Francisco  | Breda              | 1998           | 35,38            | 7,83                | 22,86       | 6-eixos 2-carros | Elevado       |
| San Jose       | Kinki Sharyo       | 2001           | 45,35            | 9,88                | 27,43       | 6-eixos 2-carros | Elevado       |
| Toronto        | UTDC CLRV          | 1982           | 23,13            | 7,81                | 15,85       | 4-eixos 1-carro  | Elevado       |
|                | UTDC ALRV          | 1987           | 35,65            | 7,94                | 23,47       | 6-eixos 2-carros | Elevado       |
| Outlook        | Bombardier Flexity | 1999           |                  |                     | 40,00       | 4-eixos 1 carro  | 70% Baixo     |
| Lodz           | Bombardier Flexity | 2000           |                  |                     | 29,50       | 3-eixos 1 carro  | 70% Baixo     |
| Genebra        | Bombardier Flexity | 2002           |                  |                     | 42,00       | 4-eixos 1 carro  | 70% Baixo     |
| Bruxelas       | Bombardier Flexity | 2003           |                  |                     | 32,00       | 4-eixos 1 carro  | 70% Baixo     |
| Porto          | Bombardier Flexity | 1998           |                  |                     | 35,00       | 4-eixos 1 carro  | 70% Baixo     |
| Milão          | Bombardier Flexity | 1996           |                  |                     | 34,10       | 4-eixos 1 carro  | 70% Baixo     |
| Frankfurt      | Bombardier Flexity | 2002           |                  |                     | 30,00       | 4-eixos 1 carro  | 70% Baixo     |
| Rotterdam      | Bombardier Flexity | 2005           |                  |                     | 42,00       | 4-eixos 1 carro  | 70% Baixo     |
| Rio de Janeiro | Alstom Citadis     | 2014           |                  | 12,5                | 44,00       | 4-eixos 1 carro  | 70% Baixo     |
| Goiania        | Alstom Citadis     |                |                  |                     | 64,00       | 6-eixos 2-carros | 70% Baixo     |

Fonte: TCRP (2012)

Pode-se verificar que o peso do veículo (AW0) varia entre 23.133 e 53.977 quilogramas-força. Já o carregamento por roda, um dos fatores a serem utilizados para o dimensionamento da via varia de 5.624 a 10.886 kgf por eixo. O documento frisa que esta tabela contempla tanto veículos de sistemas VLT como também sistemas de bondes, por isto a diferença entre os máximos e mínimos.

De acordo com a nomenclatura padrão utilizada para o projeto de veículos para sistemas VLT, são usuais as seguintes designações:

**AW0:** Veículo vazio, sem carregamento de passageiros;

**AW1:** Veículo com passageiros ocupando todos os assentos;

**AW2:** Veículo com passageiros ocupando todos os assentos acrescido da ocupação de 4 passageiros por m<sup>2</sup> na área útil do veículo;

**AW3:** Veículo com passageiros ocupando todos os assentos acrescido da ocupação de 6 passageiros por m<sup>2</sup> na área útil do veículo;

**AW4:** Veículo com passageiros ocupando todos os assentos acrescido da ocupação de 8 passageiros por m<sup>2</sup> na área útil do veículo.

Em termos de carregamento, o VLT tem cargas menores que as consideradas comumente no dimensionamento de obras de arte especiais rodoviárias. Considerando os VLTs comercializados, os carregamentos por eixo (AW3) são inferiores à 11tf. A Tabela 7 apresenta as cargas típicas de composições VLT de 4 fabricantes.

Tabela 7- Cargas de composições VLT – pesquisa do autor

| Fabricante /modelo     | Peso vazio – AW0 (tf) | Peso pax (tf) | Peso total – AW3 (tf) | Número de eixos | Peso por eixo (tf) |
|------------------------|-----------------------|---------------|-----------------------|-----------------|--------------------|
| Siemens                | 38,9                  | 10            | 48,9                  | 6               | 8,2                |
| Siemens U4 (Frankfurt) | 37,4                  | 12            | 49,4                  | 6               | 8,2                |
| SD 160                 | 42                    | 16            | 58                    | 6               | 9,7                |
| INEKON                 | 36                    | 15            | 51                    | 6               | 8,5                |
| CAF                    | 47                    | 17            | 64                    | 6               | 10,7               |

Fontes:

<http://www.lightrail.net/carspecpages/frankfurtcarspecs.htm>

[http://www.calgarytransit.com/html/technical\\_information.html](http://www.calgarytransit.com/html/technical_information.html)

<http://www.sacrt.com/lightrail.stm>

[http://www.inekon-trams.com/pento\\_low-floor\\_tram\\_tech\\_specs.html](http://www.inekon-trams.com/pento_low-floor_tram_tech_specs.html)

Partindo-se da hipótese de que as estruturas existentes foram projetadas para um trem tipo igual ou superior o TT36 (TT45, por exemplo) é possível concluir que

estas estruturas estariam aptas a receber os carregamentos gerados pelos veículos do VLT.

Na Tabela 8 abaixo apresenta-se um exemplo de dimensionamento dos carregamentos para um VLT projetado para o Brasil:

Tabela 8 - Exemplo de dimensionamento de cargas por eixo de uma composição VLT

| Peso (kgf)                                    | Composição     |            |                |            |                |            | Total por Veículo |
|---|----------------|------------|----------------|------------|----------------|------------|-------------------|
|   | Truque Motor 1 |            | Truque Reboque |            | Truque Motor 2 |            |                   |
|   | EIXO 1         | EIXO 2     | EIXO 1         | EIXO 2     | EIXO 1         | EIXO 2     |                   |
| <b>Veículo em condição de rodar (Tara)</b>    | 7.565          | 7.565      | 6.597          | 6.597      | 6.983          | 6.983      | 42.289            |
| <b>Carga normal 4 pass/m<sup>2</sup></b>      | 9.754          | 9.754      | 9.843          | 9.843      | 9.312          | 9.312      | 57.818            |
| <b>Carga máxima 6 pass/m<sup>2</sup></b>      | 10.50<br>8     | 10.50<br>8 | 11.10<br>3     | 11.10<br>3 | 10.14<br>8     | 10.14<br>8 | 63.517            |
| <b>Carga excepcional 8 pass/m<sup>2</sup></b> | 11.29<br>2     | 11.29<br>2 | 12.38<br>4     | 12.38<br>4 | 10.93<br>2     | 10.93<br>2 | 69.217            |

Portanto, verifica-se que o veículo utilizado no Brasil possui média de 7.048 kg/eixo na condição AW0, portanto, está dentro da faixa daqueles utilizados na América do Norte e Europa (ver Tabela 6).

A carga de dimensionamento da via permanente (AW4) média é de 11.536 kg/eixo, a qual para os nossos cálculos, será adotado 12 tf/eixo. Uma variação

pequena no carregamento poderá ser calculada através de regra de três simples, aplicadas à leitura das tensões verificadas no subleito ou na sub-base no ábaco a ser apresentado no próximo capítulo.

Verifica-se que o carregamento de um veículo do sistema VLT é próximo ao do veículo rodoviário, onde para o dimensionamento de obras de arte especiais, a NBR-7188 utiliza carga pontual de 10 ton/eixo para o TB-45 acrescida da carga de multidão.

As normativas brasileiras para o dimensionamento de pavimentos flexíveis utilizam o eixo padrão de 8,2 toneladas, enquanto que as normas europeias utilizam eixos-padrão com carregamento por volta de 10 toneladas.

O truque ferroviário possui 4 rodas, sendo dois eixos com espaçamento longitudinal de 1,60 m entre eles e espaçamento das rodas do mesmo eixo de 1,435 m (bitola internacional, comumente utilizada em sistemas VLT).

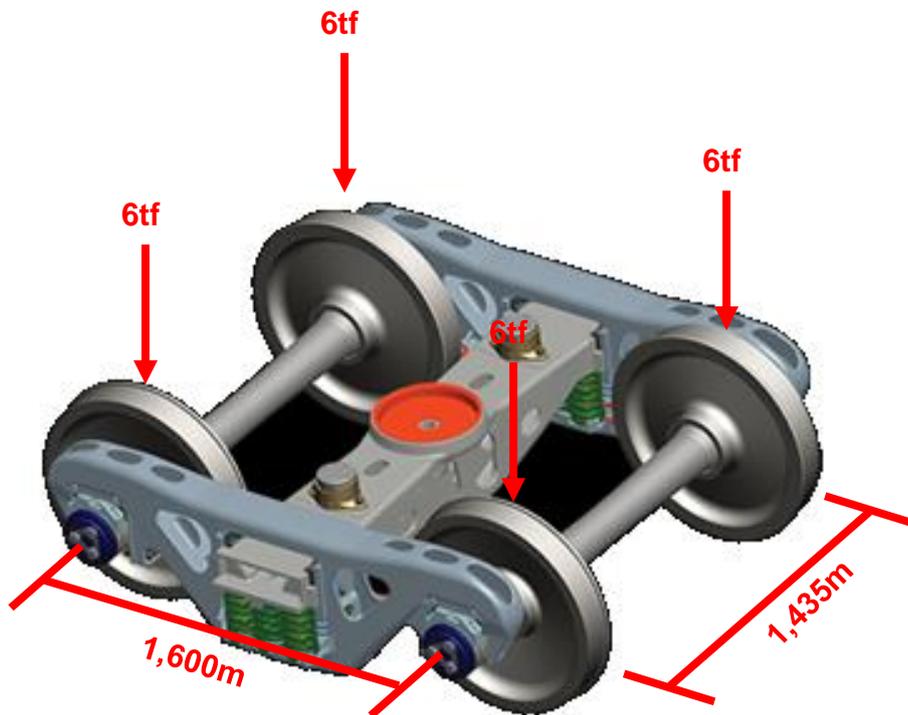


Figura 11 – Truque ferroviário adotado no presente trabalho. Fonte: adaptado de GBMX

#### **4 DIMENSIONAMENTO UTILIZADO NOS SISTEMAS DE VLT PROJETADOS NO BRASIL**

O dimensionamento da via permanente em sistemas VLT projetados ou implantados no Brasil utiliza em sua grande maioria metodologias francesas, provavelmente devido à disseminação de sistemas VLT naquele país.

Como exemplo podemos citar a fabricante de material ferroviário Alstom, de nacionalidade francesa e que implantou uma fábrica para construção de composições VLT no município de Taubaté, estado de São Paulo. Cita-se os VLT's de Goiânia (projeto) e do Rio de Janeiro (já implantado) que utilizam/utilizariam material rodante da Alstom.

Boa parte das normas para VLT na Europa (hoje em processo de unificação pelo Eurocode) possui origem em normas francesas e também grandes empresas de consultoria de engenharia ferroviária são francesas. Com isto os projetos já elaborados no Brasil utilizaram metodologias francesas para o dimensionamento de via permanente.

Algumas simplificações dos métodos originais foram feitas para o Brasil, como a utilização de métodos mecanicistas de dimensionamento de pavimentos, baseados em normas rodoviárias e também a correlação do módulo EV2 com o índice de suporte CBR, este normatizado por norma NBR vigente (à época do desenvolvimento dos projetos). A utilização de normas rodoviárias de dimensionamento de pavimentos foi possível face às grandezas dos carregamentos, acima de 8 ton/eixo para pavimentos rodoviários e cerca de 12 ton/eixo para sistemas VLT.

Para os critérios de fadiga da laje da via permanente, utiliza-se a normativa francesa de dimensionamento de pavimentos flexíveis e rígidos.

Os materiais foram adaptados para aqueles utilizados no Brasil, principalmente nos requisitos das características dos concretos e aços aqui utilizados, a fim de serem cobertos pelas normativas brasileiras vigentes.

A questão de trilhos e tipos de fixação geralmente não são abordadas no dimensionamento da estrutura ferroviária, pois os dados são fornecidos pelos

fabricantes dos sistemas que atestam as resistências aos carregamentos a que serão submetidos. Desta forma, o presente trabalho não abordará este assunto com profundidade.

Os projetos aqui desenvolvidos geralmente seguem a seguinte lógica:

1. **Objeto do documento:** onde é definido o escopo do dimensionamento;
2. **Normas técnicas:** são citadas as normativas brasileiras que o projeto deve atender;
3. **Crítérios de dimensionamento:** define o número de eixos passantes, o tipo de veículo, o sistema de alimentação da via, o tipo de assentamento da via e outros pormenores;
4. **Procedimento de homologação:** deveria apresentar os procedimentos de homologação dos modelos de acordo com normativas locais. Como não existem estas normativas, este item é apenas citado nos projetos, sem desenvolvimento do mesmo;
5. **Especificações técnicas:** discorre sobre os critérios a serem utilizados, mesclando os itens 3 e 4 acima, com as devidas adaptações que deverão ser utilizadas;
6. **Dimensionamento:** neste item são justificados o tipo de assentamento de via, o tráfego solicitante, a avaliação das tensões admissíveis na estrutura e a avaliação das tensões solicitantes na estrutura;
7. **Implementação, controle de qualidade e condições gerais dos produtos:** nesta etapa são descritas em forma de memorial as especificações e os controles de qualidade a que devem ser submetidos os insumos.

## **PARTE 2 – MODELAGEM ESTRUTURAL E RESULTADOS**

## 5 MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

Reddy (2006) indica que o Método de Elementos Finitos (MEF) é um procedimento numérico para determinar soluções aproximadas de problemas de valores sobre o contorno de equações diferenciais. Grande parte destas análises é realizada através de softwares computacionais, pois a resolução de um sistema com poucas variáveis necessita de processamento e roteiros de cálculo em quantidade suficiente para inibir a tentativa de resolver os cálculos de forma braçal.

Para utilizar o método a geometria é dividida em partes menores, de tamanhos conhecidos, daí a designação de “elementos finitos”.

O método propõe que um número infinito de variáveis desconhecidas possa ser substituído por um número limitado de elementos de características determinadas. Mirlisenna (2016) definiu que:

Os elementos finitos são conectados entre si por pontos, os quais são denominados de nós ou pontos nodais. Ao conjunto de todos esses itens – elementos e nós – dá-se o nome de malha. Em função dessas subdivisões da geometria, as equações matemáticas que regem os comportamentos físicos não serão resolvidas de maneira exata, mas de forma aproximada por este método numérico. A precisão do Método dos Elementos Finitos depende da quantidade de nós e elementos, do tamanho e dos tipos de elementos da malha. Ou seja, quanto menor for o tamanho e maior for o número deles em uma determinada malha, maior a precisão nos resultados da análise.

O MEF é uma ferramenta utilizada rotineiramente para a solução de projetos de engenharia e, boa parte das equações de dimensionamento de pavimentos presentes em manuais e normativas utilizaram em sua formulação a metodologia por elementos finitos.

O presente trabalho avaliará a estrutura de via permanente por este método, através do Software Midas Civil 2019 (v.2.2), produzido pela MIDAS Information Technology Co., Ltd.

## 5.1 SOFTWARE MIDAS CIVIL 2019 (v. 2.2)

Trata-se de um software de análise de estruturas com foco em pontes e estruturas para engenharia civil.

O software teve seu desenvolvimento iniciado em 1989 na Coreia do Sul, inicialmente para edificações e sempre utilizando a metodologia MEF.

O mesmo possui número ilimitado de nós e elementos, bem como algumas facilidades para o dimensionamento de estruturas, como por exemplo parâmetros pré-definidos de resistências e módulos de materiais comumente utilizados para a construção civil.

Há a possibilidade de se utilizar análises de carregamentos estáticos e dinâmicos, através da utilização de trem-tipo definido pelo usuário.

Rapidamente, sem adentrar muito nas funções do software, os passos para a modelagem são os seguintes:

1. Definição dos materiais e seções;
2. Modelagem da estrutura (tipo);
3. Definição do grupo estrutural;
4. Definição dos limites estruturais;
5. Definição dos grupos de carregamento;
6. Entrada dos carregamentos.
7. Definição das propriedades dos materiais dependentes de tempo (não utilizado);
8. Processamento da análise estrutural;
9. Plotagem dos resultados, análise e revisão estrutural.

## 6 MODELAGEM DA VIA PERMANENTE DO SISTEMA VLT

Após instalado o software de modelagem por MEF, a estrutura da plataforma foi modelada simplificada para efetuar os testes iniciais. As seguintes hipóteses foram admitidas:

### 6.1 Premissas:

1. Por questões de representatividade, foi simulado o método de fixação de via direta, semelhante ao sistema comercial Railone Rheda 2000, com dormentes bi-bloco;
2. Todos os esforços provenientes dos eixos de 12 toneladas são transmitidos do trilho para os dormentes e destes para as bases de concreto, sem atenuação;
3. A área de transmissão dos carregamentos é a base do dormente bi-bloco, igualmente distribuída;
4. A espessura do concreto de travamento dos dormentes é constante, com 17 cm de espessura;
5. Serão variadas as resistências dos concretos, a espessura do concreto de fundação e a resistência do solo de fundação.

### 6.2 Parâmetros:

Os materiais possuem as seguintes características:

- Concreto estrutural:  $f_{ck} \geq 30$  MPa
- Aço para concreto armado: CA 50A
- Cargas acidentais:

Móvel:

Veículo – truque ferroviário com carga de 12 tf/eixo, espaçamento longitudinal de 1,60 m e espaçamento transversal de 1,435 m.

- Coeficientes de segurança:

Majoração das ações:

Carga móvel:  $\gamma_f = 1,50$  ou  $\gamma_f = 0$

Carga permanente:  $\gamma_f = 1,35$  ou  $\gamma_f = 1,0$

Vento:  $\gamma_f = 1,40$  ou  $\gamma_f = 0$

Temperatura:  $\gamma_f = 1,20$  ou  $\gamma_f = 0$

Minoração da resistência:

Aço:  $\gamma_s = 1,15$

Concreto:  $\gamma_c = 1,40$

- Pesos específicos adotados:

Concreto armado: 2,50 tf/m<sup>3</sup>

Revestimento: 2,00 tf/m<sup>3</sup>

Solo: 1,80 tf/m<sup>3</sup>

Quanto às cargas acidentais foi utilizado o trem-tipo padrão para veículos tipo VLT demonstrado no item 3.4 - VEÍCULO DE PROJETO.

A partir destas hipóteses simplificadoras, foi modelada uma estrutura semelhante à da Figura 12 a seguir.

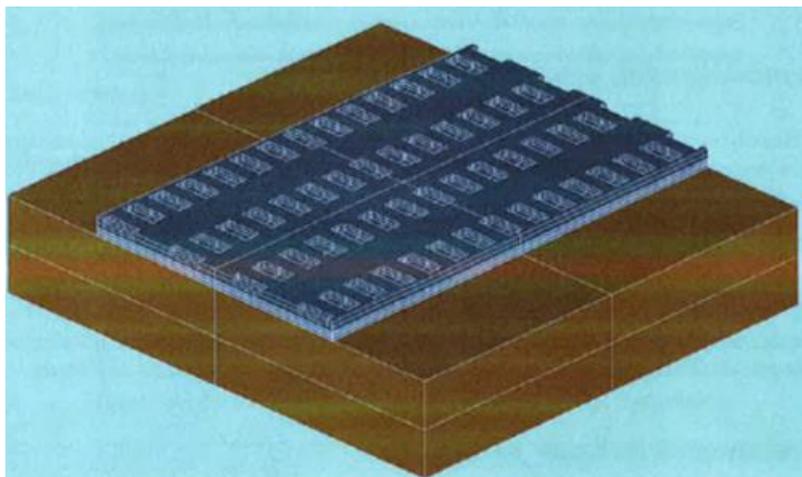


Figura 12 – Esquema do modelo utilizado no Software Midas Civil 2019.

A determinação das espessuras da laje de fundação e da laje de travamento foram de acordo com a seguinte seção típica:

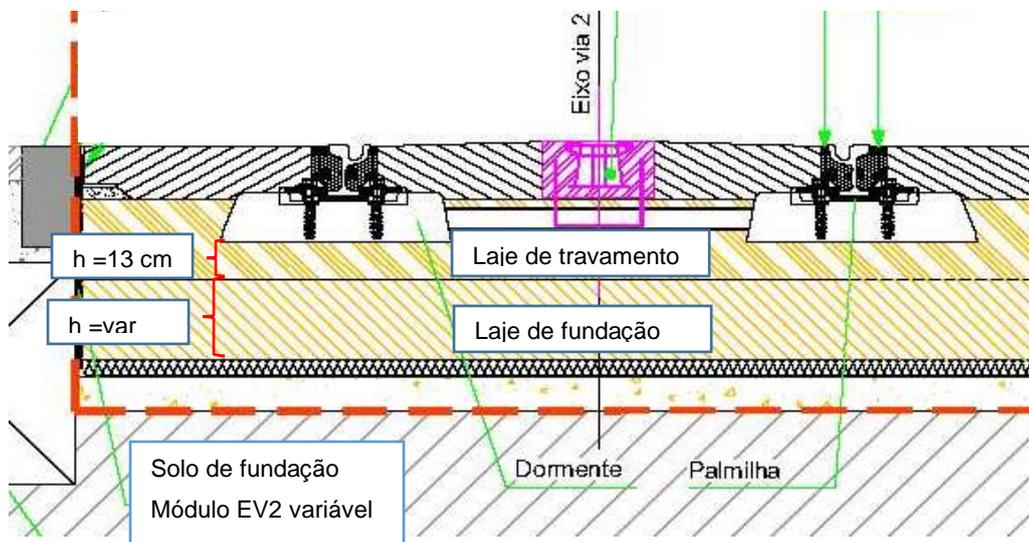


Figura 13 – Seção típica adotada.

Da figura acima, para o dimensionamento serão utilizados 3 parâmetros.

1. A altura da laje de travamento sob o dormente de concreto será de 13 cm;
2. A laje de fundação terá altura variável, e este será o parâmetro principal a ser dimensionado;

3. O solo de fundação será modelado em 5 distintas classes de EV2: 20 MPa, 35 MPa, 50 MPa, 80 MPa e 110 MPa.

O resultado do modelo será a tensão máxima de tração no concreto de fundação.

### 6.3 MODELAGEM POR MEF – TENTATIVA 1

Inicialmente, modelou-se a laje com elementos de placa, de aproximadamente 5cm x 5cm, com as devidas propriedades, apoiada sobre base elástica. Os valores de resistência (Ev2) e coeficientes de reação vertical (Kv) do solo são tratados no item 3.3. Abaixo segue representação das placas, com os coeficientes de reação vertical do solo aplicados.

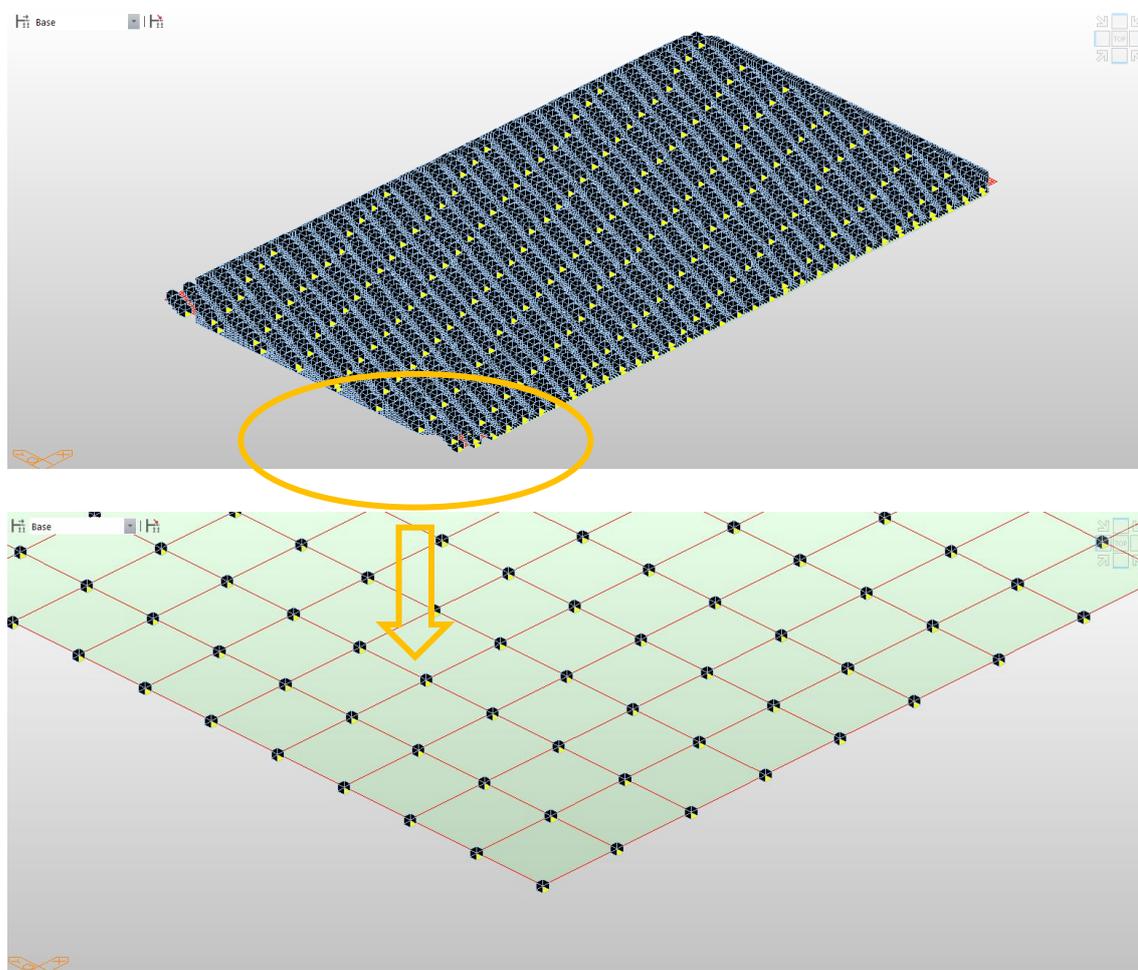


Figura 14 – Representação da modelagem MEF – Tentativa 1

Inicialmente, modelou-se a placa e, para a inserção da carga do Veículo Tipo, inseriu-se elementos rígidos simulando o conjunto dormentes + trilho. Este modelo, contudo, não se mostrou muito realista, pois apresentava picos de tensão, e não havia uma boa distribuição das cargas do VT na laje.

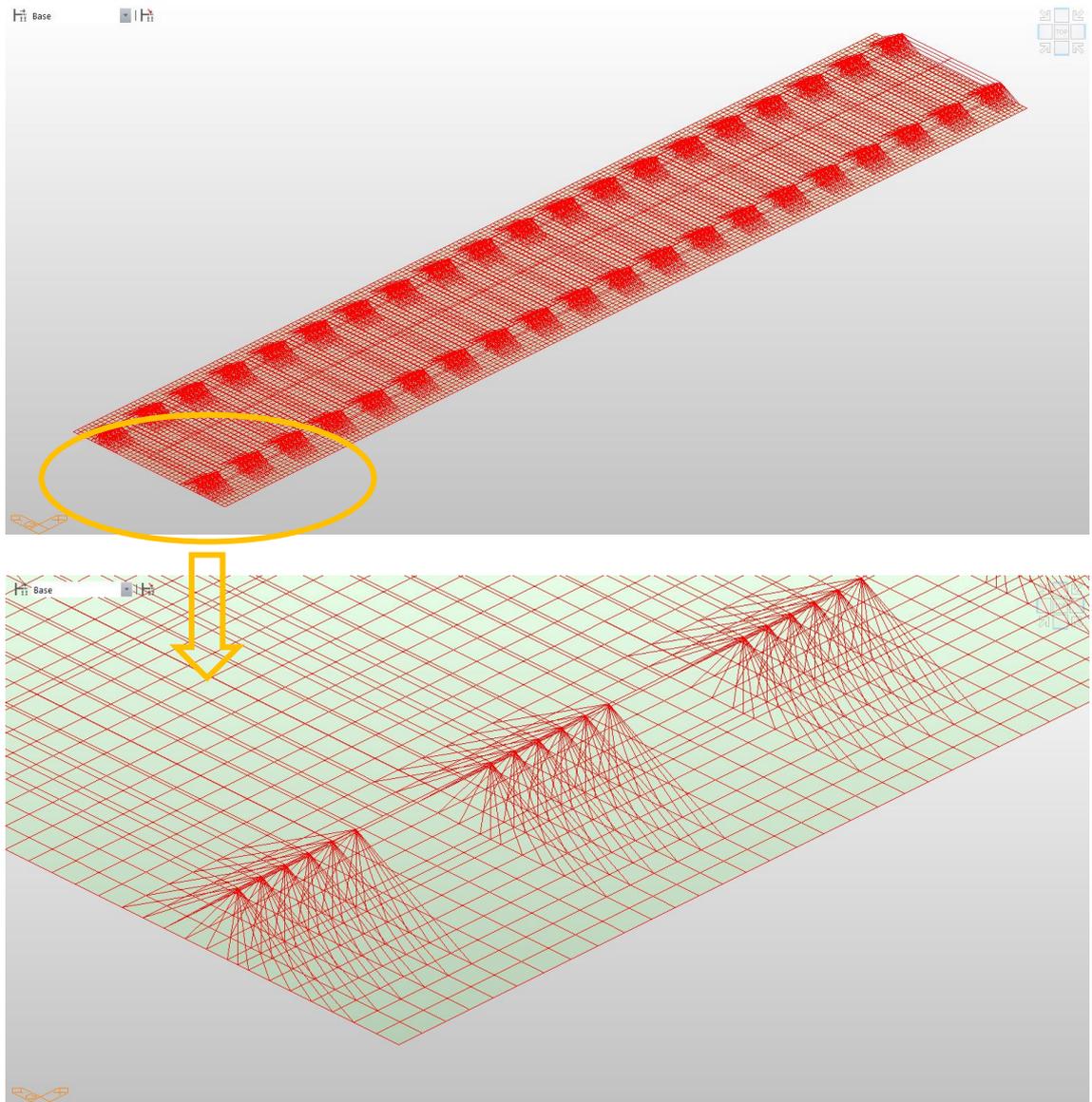


Figura 15 – Modelo de elementos rígidos simulando o conjunto de dormentes e trilhos. Então, passou-se à tentativa 2, com outro método de modelagem.

## 6.4 MODELAGEM POR MEF – TENTATIVA 2

O peso-próprio da laje foi aplicado automaticamente pelo programa de análise de elementos finitos.

Carga distribuída de  $3,4\text{kN/m}^2$ , aplicada sobre toda a laje:

*Espessura do revestimento final =  $0,17\text{m}$*

*Peso do revestimento final =  $20,0\text{kN/m}^3$*

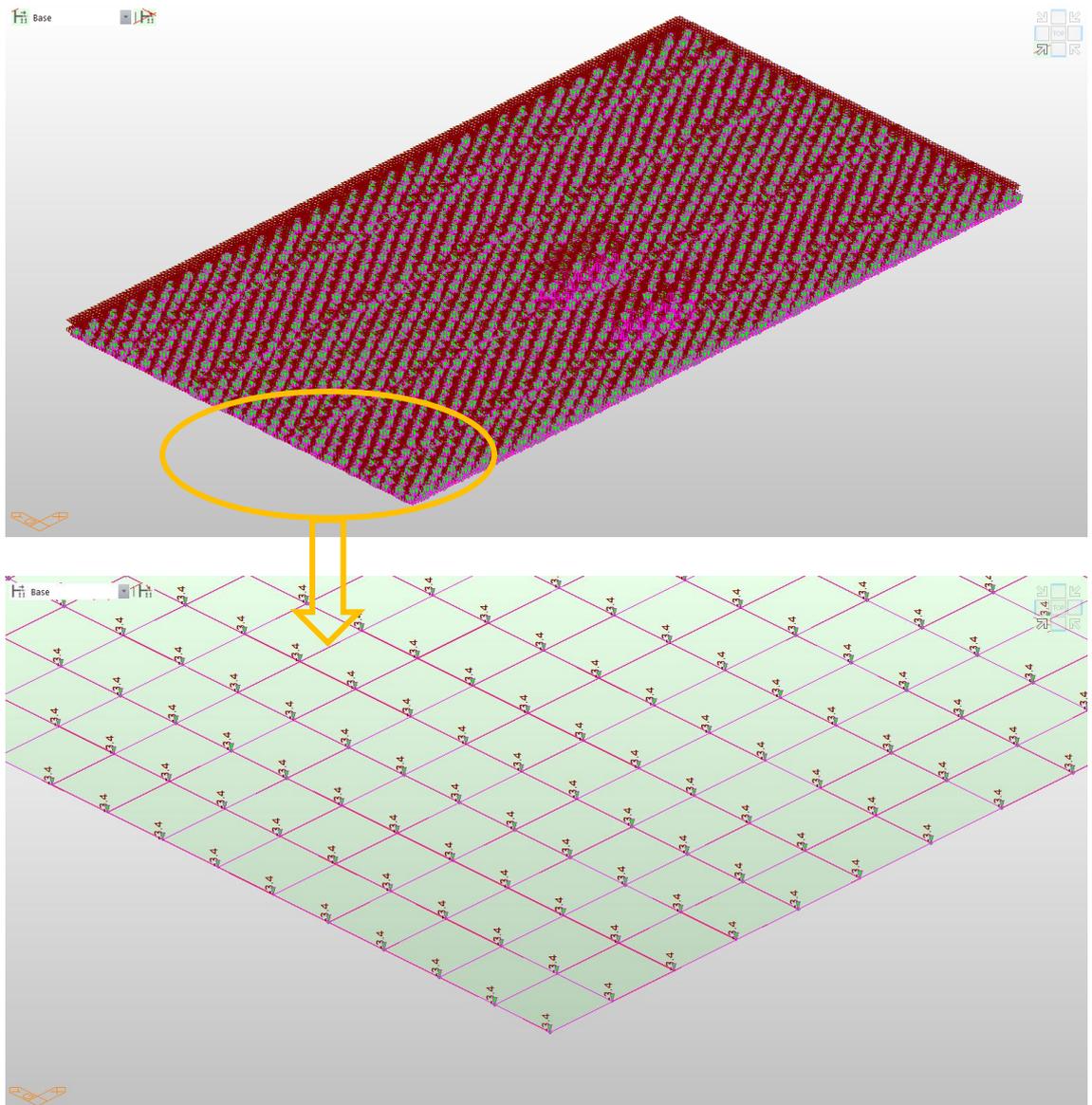


Figura 16 – Representação do carregamento do revestimento

Considerou-se a hipótese de que o VT distribui as cargas para a laje através do sistema de trilhos e dormentes, assumindo-se que esta carga será espraída. Considerou-se a área de espraimento das cargas da seguinte maneira:

55cm – Largura do dormente

148cm – Comprimento entre eixos (aproximado, para adequar à grelha do modelo de 5 cm)

Além disso, verificou-se a posição onde o VT gera resultados mais críticos para a laje, adotando a posição como padrão para todas as análises aqui apresentadas.

Estas premissas (conservadoras e simplificadas) tornam o processamento e adequação do modelo mais fácil. Para aplicação da carga, utilizou-se o fator de impacto ( $\Phi$ ) apresentado na NBR7187:2003 e o fator de majoração ( $Y_f$ ) de cargas móveis apresentado na NBR8681:2003:

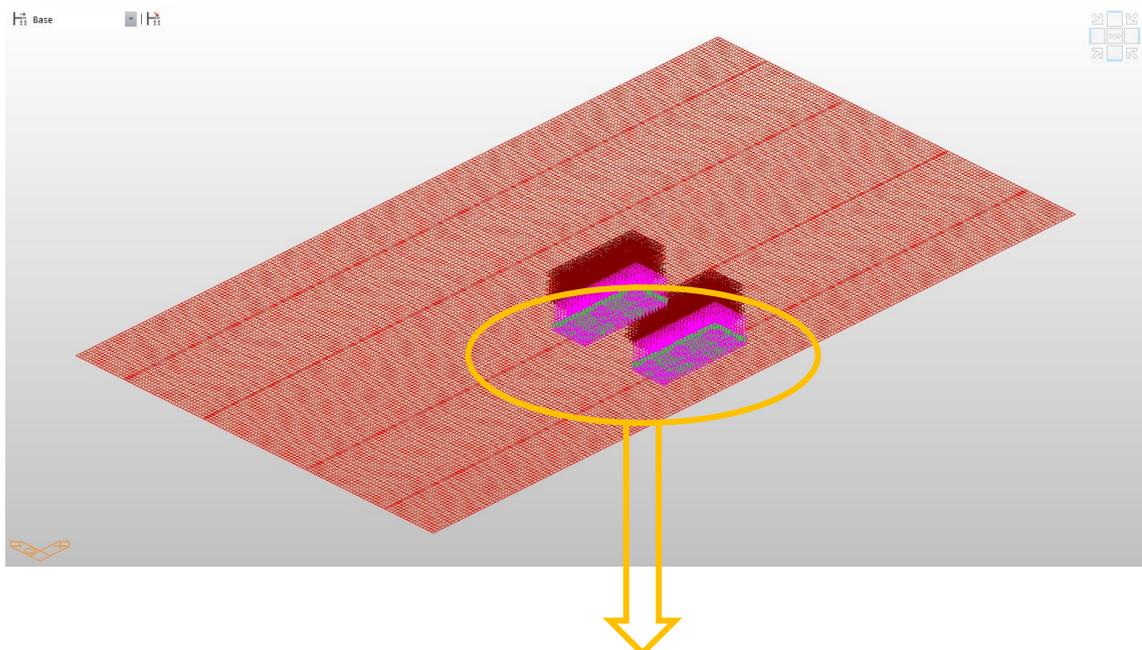
$$P = 2 \times 60kN$$

$$\Phi = 0,001 \times (1600 - 60 \times \sqrt{L} + 2,25 \times L) = 1,42 \quad (L = 12,0m)$$

$$Y_f = 1,50$$

$$A = 0,55m \times 1,48m = 0,81m^2$$

Assim, adotou-se uma carga de 320kN/m<sup>2</sup>.



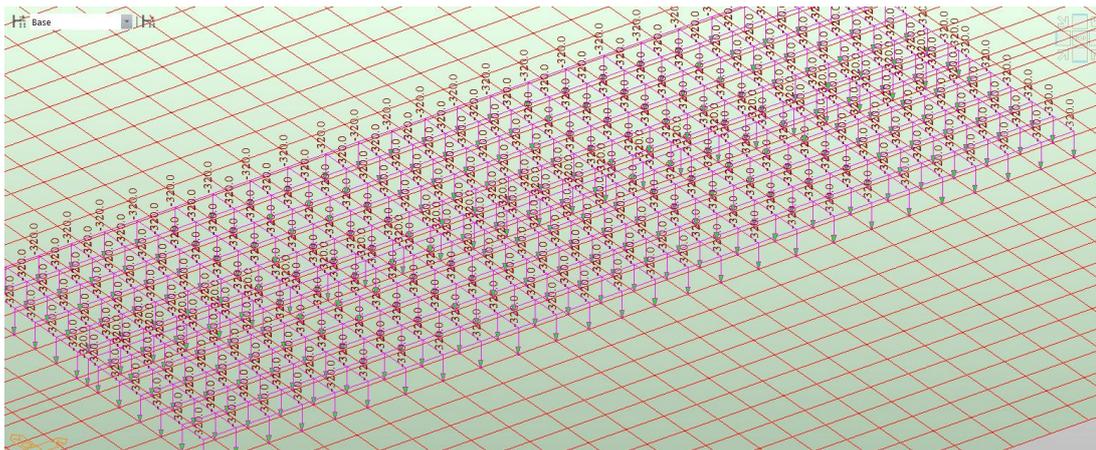


Figura 17 – Representação do carregamento espreado

De posse deste modelo e após as validações, foram efetuadas diversas etapas de processamento, variando-se a espessura do concreto de fundação e as resistências do solo.

#### 6.4.1 Modelagem por MEF – Resultados da Tentativa 2

Foram efetuadas 30 rodadas, onde foram variados os módulos EV2 do solo e as espessuras da laje de fundação, conforme tabela a seguir:

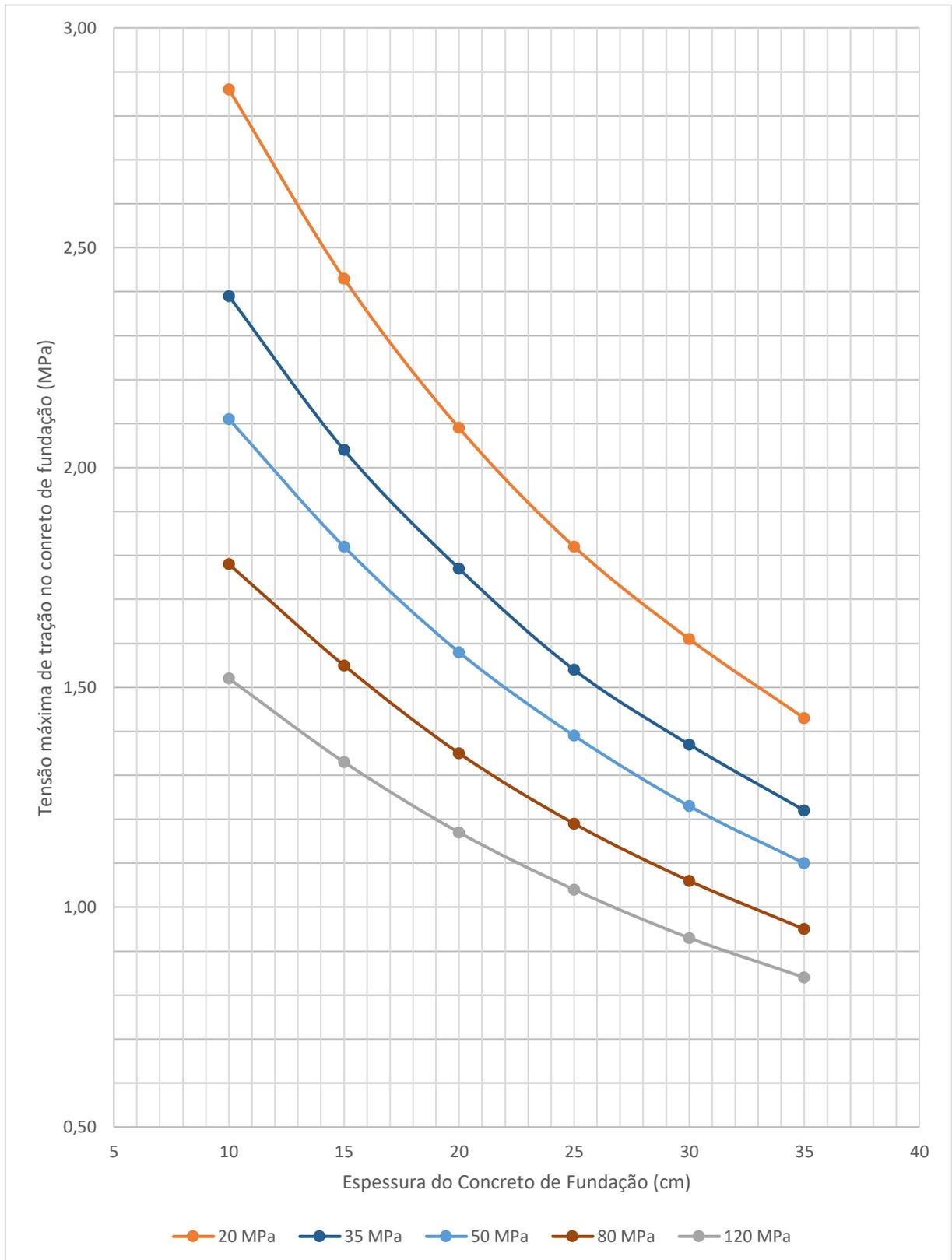
Tabela 9 – Tensões de tração máxima no concreto de fundação (MPa)

| Espessura da laje de fundação (cm) | Módulo do subleito (MPa) |      |      |      |      |
|------------------------------------|--------------------------|------|------|------|------|
|                                    | 20                       | 35   | 50   | 80   | 120  |
| 10                                 | 2,86                     | 2,39 | 2,11 | 1,78 | 1,52 |
| 15                                 | 2,43                     | 2,04 | 1,82 | 1,55 | 1,33 |
| 20                                 | 2,09                     | 1,77 | 1,58 | 1,35 | 1,17 |
| 25                                 | 1,82                     | 1,54 | 1,39 | 1,19 | 1,04 |
| 30                                 | 1,61                     | 1,37 | 1,23 | 1,06 | 0,93 |
| 35                                 | 1,43                     | 1,22 | 1,1  | 0,95 | 0,84 |

As saídas da modelagem (mapa de calor) com as tensões de tração no concreto de fundação serão apresentadas no anexo A.

E, conjuntamente com a tabela, os gráficos (ábacos) para dimensionamento.

Gráfico 1 – Ábaco para dimensionamento da via permanente de VLT.



## 6.5 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO TAMANHO DA MALHA DE ELEMENTOS FINITOS NO MODELO

Na modelagem por MEF, uma das interrogações é quanto à dimensão da malha de elementos finitos no modelo. Malhas com dimensões exíguas apresentam melhor aderência do modelo, porém, um grande tempo de processamentos.

Já uma malha muito aberta apresenta uma maior rapidez na modelagem, porém, uma menor aderência do modelo.

Para tanto, foi adotada a situação central, com 20 cm de espessura no concreto de fundação e módulo EV2 de 50 MPa para avaliar a sensibilidade da dimensão da malha.

Simulou-se 4 tamanhos de malha, com 1, 2,5, 5 e 10 cm de lado e os resultados são apresentados na tabela a seguir.

Tabela 10 – avaliação do tamanho da malha MEF modelada

|                           | <b>TENSÃO (MPa)</b> | <b>Desvio em relação à menor malha</b> |
|---------------------------|---------------------|--|
| MALHA 1 (1.0cm x 1.0cm)   | 1,58                | 0,00%                                  |
| MALHA 2 (2.5cm x 2.5cm)   | 1,53                | -3,16%                                 |
| MALHA 3 (5.0cm x 5.0cm)   | 1,53                | -3,16%                                 |
| MALHA 4 (10.0cm x 10.0cm) | 1,56                | -1,27%                                 |

Portanto, foi adotada a malha 3 para a confecção dos modelos. Ela possui um tempo de processamento 8 x menor que a malha de 1,0 x 1,0 cm e apenas 3,16% de desvio no resultado.

As figuras são apresentadas no Anexo B.

## 7 DIMENSIONAMENTO DA ESTRUTURA – FADIGA DO CONCRETO

Para o dimensionamento da estrutura no ábaco, é necessário o conhecimento da resistência do concreto em tração à fadiga.

Conforme NBR6118:2014, temos que a resistência do concreto em tração à fadiga (item 23.5.4.2) é:

$$\sigma_{ct,m\acute{a}x} \leq 0,3x f_{ctd,inf}$$
$$f_{ctd,inf} = \frac{0,7x0,3x^3 \sqrt{f_{ck}^2}}{1,00}$$

Assim, para um concreto classe C30, temos que:

$$\sigma_{ct,m\acute{a}x} \leq 0,61MPa$$

Lembrando que no ábaco de tensões apresentados, as tensões de tração estão majoradas pelo  $Y_f = 1,50$ . Desta maneira, deve-se dividi-las por 1,50 ao se comparar com a tensão máxima de fadiga à tração.

Porém, o autor entende que esta situação é deveras conservadora, pois a laje sempre está apoiada em solo, o que não traz uma situação de perigo causada pela ruptura de uma viga por exemplo.

A própria norma explica isto em seu item 23.5.3.2 – Modelo de cálculo:

“O critério estabelecido para a verificação da fadiga decorrente de força cortante nas vigas se baseia na redução da contribuição do concreto e de esquemas alternativos, avaliada a partir da redução da resistência à tração do concreto sob carga cíclica, equivalente a adotar, para 107 ciclos, 50 % da resistência à tração estática. Isso corresponde a reduzir o valor  $V_c$  da contribuição do concreto de 50 % do seu valor estático.”

Portanto, julgamos mais prudente utilizar a formulação para cálculo da tensão admissível na estrutura de plataforma determinado sobre o princípio de um cálculo na fadiga, tal como praticado para os pavimentos rodoviários franceses.

Segundo Balay et al (2012), é possível se adaptar as diretrizes dos pavimentos franceses para os países sulamericanos, de acordo com a seguinte formulação:

$$\sigma_{adm} = \sigma_6 \left( \frac{CAM \times N}{10^6} \right) \times K_r \times K_s \times K_c \times K_d$$

Onde:

$\sigma_6$  - resistência a fadiga do material, obtido em laboratório

CAM – Coeficiente de agressividade do tráfego

N – número de eixos passantes

Kr – coeficiente de risco

Ks – penalização da resistência do material pelas características do subleito

Kc – ajuste global do modelo

Kd – descontinuidade e temperatura

Os valores tem a seguinte variação:

$\sigma_6$  – adotado para os concretos brasileiros a média entre os tipos BC5 (2,15 MPa) e BC3 (1,63 MPa) = 1,89 MPa

Kr - para risco de 5% e intervalo de confiança de 98% = 0,768

Ks - Subleito 20 MPa = 1/1,2

Subleito 50 MPa = 1/1,1

Subleito 120 MPa = 1

Subleito 200 MPa = 1

Kc – 1,5 (concreto)

Kd – 1,0 (sem descontinuidades e arestas devido ao trilho e isolamento)

Portanto, com estes valores é possível a utilização nos estudos de caso.

## **PARTE 3 – ESTUDOS DE CASO**

## 8 ESTUDO DE CASO 1

Para o primeiro estudo de caso, foi utilizado como caso a Cidade de São Paulo e uma linha com demanda de 410.000 passageiros/dia (demanda no horário de pico de 45.000 passageiros), com fator de pico de 11%.

Avaliando-se a geologia da cidade de São Paulo, de acordo com o MAPA GEOLÓGICO DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO – ADA, propõe-se uma linha no centro da cidade, com formações do tipo Resende, composta de lamitos, arenitos e conglomerados. Para este tipo de solo, com os valores de CBR característicos, estima-se um módulo EV2 de 80 MPa.

Para tanto, foi elaborada uma tabela contendo o dimensionamento da operação.

Tabela 11 – Dimensionamento da operação – Estudo de caso 1

| Por linha (min)               | 5h00-7h00 | 7h00-9h30  | 9h30-14h00 | 14h00-17h00 | 17h00-19h30 | 19h30-22h00 | 22h00-24h00 | 24h00-5h00 |              |
|-------------------------------|-----------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------------|--------------|
| Intervalo dia ordinário       | 5         | 3          | 5          | 5           | 3           | 5           | 8           | 16         |              |
| Intervalo sábado              | 5         | 3          | 5          | 5           | 3           | 5           | 11          | 16         |              |
| Intervalo domingo e feriados  | 11        | 11         | 11         | 11          | 11          | 11          | 11          | 16         |              |
| Por linha (tram/h)            | 5h00-7h00 | 7h00-9h30  | 9h30-14h00 | 14h00-17h00 | 17h00-19h30 | 19h30-22h00 | 22h00-24h00 | 24h00-5h00 |              |
| Frequência dia ordinário      | 12        | 20         | 12         | 12          | 20          | 12          | 8           | 4          |              |
| Frequência sábado             | 12        | 20         | 12         | 12          | 20          | 12          | 5           | 4          |              |
| Frequência domingo e feriados | 5         | 5          | 5          | 5           | 5           | 5           | 5           | 4          |              |
| Por linha (tram/h)            | 5h00-7h00 | 7h00-9h30  | 9h30-14h00 | 14h00-17h00 | 17h00-19h30 | 19h30-22h00 | 22h00-24h00 | 24h00-5h00 |              |
| Frequência dia ordinário      | 24        | 40         | 24         | 24          | 40          | 24          | 15          | 8          |              |
| Frequência sábado             | 24        | 40         | 24         | 24          | 40          | 24          | 11          | 8          |              |
| Frequência domingo e feriados | 11        | 11         | 11         | 11          | 11          | 11          | 11          | 8          |              |
| <b>horas</b>                  | <b>2</b>  | <b>2,5</b> | <b>4,5</b> | <b>3</b>    | <b>2,5</b>  | <b>2,5</b>  | <b>2</b>    | <b>5</b>   | <b>total</b> |
| Trens intervalo ord           | 24        | 50         | 54         | 36          | 50          | 30          | 15          | 19         | 278          |
| Trens intervalo sabado        | 24        | 50         | 54         | 36          | 50          | 30          | 11          | 19         | 274          |
| Trens intervalo domingo       | 11        | 14         | 25         | 16          | 14          | 14          | 11          | 19         | 122          |

| Semana       | dias | trens       |
|--------------|------|-------------|
| dias úteis   | 5    | 1389        |
| sábado       | 1    | 274         |
| domingo      | 1    | 122         |
| <b>total</b> |      | <b>1785</b> |

| Ano     |           |
|---------|-----------|
| Semanas | 52,14     |
| Trens   | 93.064,33 |

| Horizonte             |                      |
|-----------------------|----------------------|
| 30 anos               | 2.791.930,03         |
| Cada trem             | 8 eixos              |
| <b>Total de eixos</b> | <b>22.335.440,26</b> |

Com isto, aplicando-se as cargas e admitindo as frequências como 2% dos trens vazios, 51% dos trens com condição AW2, 25% com condição AW3 e 22% com condição AW4, tem se os seguintes fatores:

Tabela 12 – Coeficientes de agressividade – Estudo de caso 1

| Agressividade                   | Carga (tf) | % PESO | % Frequencia | Coeficiente |
|---------------------------------|------------|--------|--------------|-------------|
| AW0                             | 7          | 54%    | 2%           | 0,01        |
| AW2                             | 10         | 83%    | 51%          | 0,43        |
| AW3                             | 11         | 92%    | 25%          | 0,23        |
| AW4                             | 12         | 100%   | 22%          | 0,22        |
|                                 |            |        |              | 0,89        |
| Ajuste eixo padrão 13<br>t/12tf |            | 92%    | COEF         | 0,82        |

Portanto, o número de eixos equivalentes é de 18.246.336,58 para o horizonte de 30 anos.

Assim, aplicando-se a fórmula da fadiga no pavimento, obtém-se a tensão de 1,65 MPa.

Parâmetros utilizados:

$$\sigma_6 = 1,89 \text{ MPa}$$

$$K_r = 0,768$$

$$K_s - \text{Subleito } 80 \text{ MPa} - \text{utilizar } 50 \text{ MPa} = 1/1,1$$

$$K_c - 1,5 \text{ (concreto)}$$

$$K_d - 1,0$$

Do ábaco:

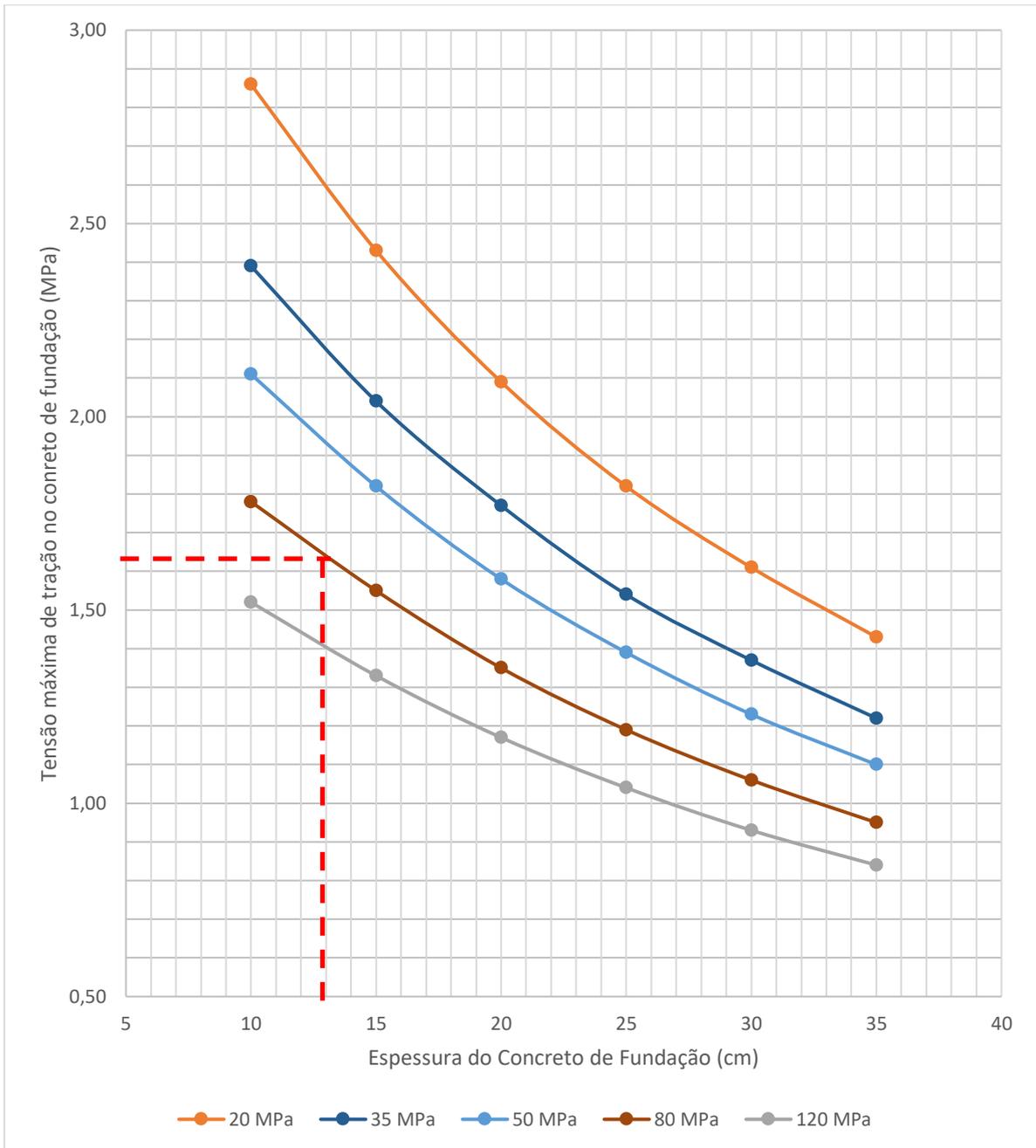


Gráfico 2 – Ábaco de dimensionamento – Estudo de caso 1

Portanto, será necessária espessura de 13 cm para o concreto de fundação.

## 9 ESTUDO DE CASO 2

Para o primeiro estudo de caso, foi utilizado como caso uma cidade litorânea (Rio de Janeiro ou Santos) e uma linha com demanda de 220.000 passageiros/dia (demanda no horário de pico de 24.000 passageiros), com fator de pico de 11%.

Para este tipo de solo com formações que possibilitam recalques, estima-se um módulo EV2 de 35 MPa.

Para tanto, foi elaborada uma tabela contendo o dimensionamento da operação.

Tabela 13 – Dimensionamento da operação – Estudo de caso 2

| Por linha (min)               | 5h00-7h00 | 7h00-9h30 | 9h30-14h00 | 14h00-17h00 | 17h00-19h30 | 19h30-22h00 | 22h00-24h00 | 24h00-5h00 |
|-------------------------------|-----------|-----------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------------|
| Intervalo dia ordinário       | 10        | 6         | 10         | 10          | 6           | 10          | 15          | 30         |
| Intervalo sábado              | 10        | 6         | 10         | 10          | 6           | 10          | 20          | 30         |
| Intervalo domingo e feriados  | 20        | 20        | 20         | 20          | 20          | 20          | 20          | 30         |
| Por linha (tram/h)            | 5h00-7h00 | 7h00-9h30 | 9h30-14h00 | 14h00-17h00 | 17h00-19h30 | 19h30-22h00 | 22h00-24h00 | 24h00-5h00 |
| Frequência dia ordinário      | 6         | 10        | 6          | 6           | 10          | 6           | 4           | 2          |
| Frequência sábado             | 6         | 10        | 6          | 6           | 10          | 6           | 3           | 2          |
| Frequência domingo e feriados | 3         | 3         | 3          | 3           | 3           | 3           | 3           | 2          |
| Por linha (tram/h)            | 5h00-7h00 | 7h00-9h30 | 9h30-14h00 | 14h00-17h00 | 17h00-19h30 | 19h30-22h00 | 22h00-24h00 | 24h00-5h00 |
| Frequência dia ordinário      | 12        | 20        | 12         | 12          | 20          | 12          | 8           | 4          |
| Frequência sábado             | 12        | 20        | 12         | 12          | 20          | 12          | 6           | 4          |
| Frequência domingo e feriados | 6         | 6         | 6          | 6           | 6           | 6           | 6           | 4          |

| horas                   | 2  | 2,5 | 4,5 | 3  | 2,5 | 2,5 | 2 | 5  | total |
|-------------------------|----|-----|-----|----|-----|-----|---|----|-------|
| Trens intervalo ord     | 12 | 25  | 27  | 18 | 25  | 15  | 8 | 10 | 140   |
| Trens intervalo sabado  | 12 | 25  | 27  | 18 | 25  | 15  | 6 | 10 | 138   |
| Trens intervalo domingo | 6  | 8   | 14  | 9  | 8   | 8   | 6 | 10 | 67    |

| Semana     | dias | trens |
|------------|------|-------|
| dias úteis | 5    | 700   |
| sábado     | 1    | 138   |
| domingo    | 1    | 67    |
| total      |      | 905   |

| Ano     |           |
|---------|-----------|
| Semanas | 52,14     |
| Trens   | 47.189,29 |

| Horizonte      |               |
|----------------|---------------|
| 30 anos        | 1.415.678,57  |
| Cada trem      | 8 eixos       |
| Total de eixos | 11.325.428,57 |

Com isto, aplicando-se as cargas e admitindo as frequências como 2% dos trens vazios, 51% dos trens com condição AW2, 25% com condição AW3 e 22% com condição AW4, tem se os seguintes fatores:

Tabela 14 – Coeficientes de agressividade – Estudo de caso 1

| Agressividade                   | Carga (tf) | % PESO | % Frequencia | Coeficiente |
|---------------------------------|------------|--------|--------------|-------------|
| AW0                             | 7          | 54%    | 2%           | 0,01        |
| AW2                             | 10         | 83%    | 51%          | 0,43        |
| AW3                             | 11         | 92%    | 25%          | 0,23        |
| AW4                             | 12         | 100%   | 22%          | 0,22        |
|                                 |            |        |              | 0,89        |
| Ajuste eixo padrão 13<br>t/12tf |            | 92%    | COEF         | 0,82        |

Portanto, o número de eixos equivalentes é de 9.252.003,96 para o horizonte de 30 anos.

Assim, aplicando-se a fórmula da fadiga no pavimento, obtém-se a tensão de 1,58 MPa.

Parâmetros utilizados:

$$\sigma_6 = 1,89 \text{ MPa}$$

$$K_r = 0,768$$

$$K_s - \text{Subleito 35 MPa} - \text{utilizar 20 MPa} = 1/1,2$$

$$K_c - 1,5 \text{ (concreto)}$$

$$K_d - 1,0$$

Do ábaco:

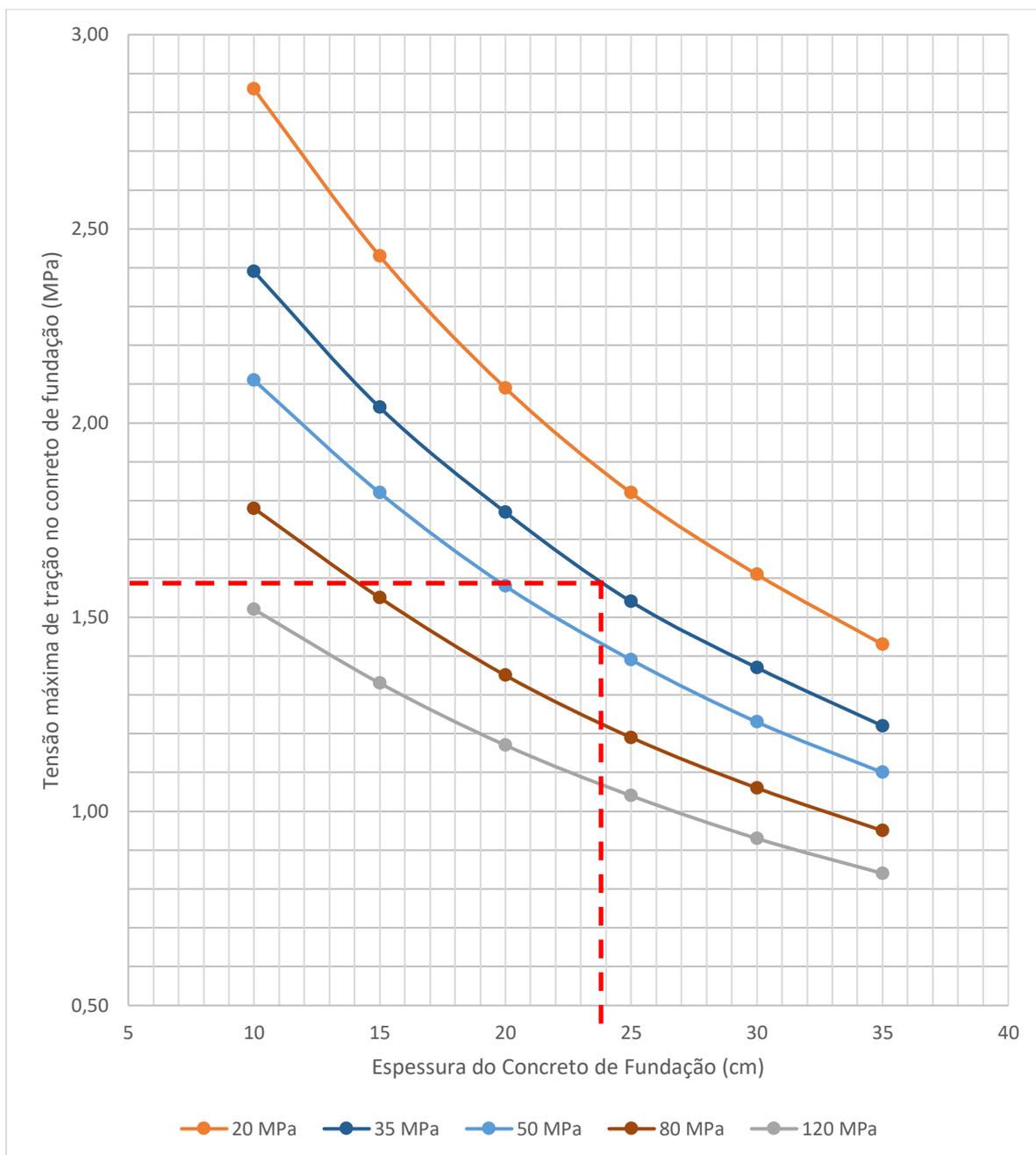


Gráfico 3 – Ábaco de dimensionamento – Estudo de caso 1

Portanto, será necessária espessura de 24 cm para o concreto de fundação.

## **PARTE 4 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES**

## **10 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES**

### **10.1 CONCLUSÕES**

Como visto ao longo do trabalho, o sistema de Veículo Leve Sobre Trilhos apresenta importância no contexto atual. Os VLTs são uma solução tecnológica viável e com potencial para captação de passageiros, com diversas vantagens nos quesitos ambientais e sustentáveis, além de promover a requalificação urbana do seu entorno.

As análises efetuadas permitiram, até o presente momento, um maior entendimento do mecanismo de modelagem e dimensionamento de vias permanentes de sistemas VLT. Percebe-se também que, por se tratar de tecnologia pouco difundida no Brasil, a literatura técnica nacional acerca do tema é escassa e incompleta, o que leva invariavelmente à necessidade de consulta da literatura estrangeira a respeito. E também é somente nela que se encontram informações sobre soluções tecnológicas mais recentes, como é o caso dos sistemas de fixação de via.

Com a base teórica apresentada, abrangendo tanto o entendimento dos conceitos e aspectos voltados aos sistemas VLT e como todas as implicações específicas das condições de solos e materiais no Brasil, passou-se à formulação da metodologia de dimensionamento e posteriormente à sua aplicação por meio de estudos de caso.

O autor buscou, ao término dos trabalhos desta dissertação, uma compilação dos conhecimentos de engenharia ferroviária de sistemas VLT, ligados aos tópicos de dimensionamento de via permanente. O trabalho, em alguns pontos, poderá contribuir à comunidade acadêmica brasileira, principalmente por meio de um método de dimensionamento de vias permanentes de sistemas VLT adaptado e com validade no território nacional.

### **10.2 RECOMENDAÇÕES**

Conforme descrito no decorrer do trabalho, existem alguns pontos em que há a necessidade de um aprofundamento tanto das simulações quanto do estudo dos parâmetros do modelo.

Portanto, seguem algumas recomendações para o desenvolvimento de trabalhos futuros.

- Estudos comparativos dos módulos EV2 e CBR, visto que agora há a normativa do DNIT que versa sobre o assunto, sendo um ensaio homologado no Brasil;
- Método de cálculo da fadiga do concreto em tração em lajes apoiadas no solo;
- Aprimoramentos dos modelos e ábacos com variação de outros parâmetros, tais como resistência do concreto (C25, C35 e C40, por exemplo), variação das características de sub-base cimentada, por BGTC ou por CCR;
- Novos modelos com outros carregamentos e dimensões dos eixos, compreendendo VLTs comercializados por outros fabricantes;
- Cálculo de modelos estruturais de outras tecnologias de via permanente.

## 11 BIBLIOGRAFIA

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIAL – AASHTO. **Guide for design of pavement structures**. Washington D.C., 1993.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIAL – AASHTO. **Mechanistic-empirical design of new and rehabilitated pavement structures**. Design Guide, Project I-37A, National Cooperative Highway Research Program. Washington D.C., 1993.

AMERICAN SOCIETY OF TESTING MATERIALS. ASTM D1196-93: **Nonrepetitive Static Plate Load Tests of Soils and Flexible Pavement Components, for use in Evaluation and Design of Airport and Highway Pavements**. Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimentos. NBR 6118**, Rio de Janeiro, 2014.

\_\_\_\_\_. **Projeto e execução de fundações. NBR 6122**, Rio de Janeiro, 2010.

\_\_\_\_\_. **Carga móvel rodoviária e de pedestres em pontes, viadutos, passarelas e outras estruturas. NBR 7188**, Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIATION FRANCAISE DE NORMALISATION. NF p 94-117-1. **Portance des plates-formes. Partie1: Module sous chargement statique à la plaque (EV2)**. AFNOR. Paris, 2000.

BALAY, J. M., BROSSEAUD, Y., BARA, B., CASTANEDA, E. **Adaptation of the French pavement design to countries in South America. Congrès 8eme jornadas international des Asfalto**, França, 2012.

BALBO, J. T. **Aplicação do método dos elementos finitos na avaliação estrutural de pavimentos rígidos rodoviários**. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1989.

BLANCO-LORENZO, J., SANTAMARIA, J., VADILLO, E.G., OYARZABAL, O.,  
**Dynamic comparison of different types of slab tracks and ballasted track using a flexible track model.** Proc. IMechE Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, Vol. 225, pp. 574-592. 2011

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT.  
ISF-212: **Projeto de Superestrutura da Via Permanente.** Brasilia, 2015.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT  
055/2004-ME: **Pavimento rígido – Prova de carga estática para determinação do coeficiente de recalque de subleito e sub-base em projeto e avaliação de pavimentos - Método de ensaio.** Rio de Janeiro: IPR, 2004.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT  
410/2017-ME: **Solos - Prova de carga estática em placa para controle de qualidade na execução de aterros solo-enrocamento - Método de Ensaio.** Rio de Janeiro: IPR, 2017.

DEUTSCHES INSTITUT FUR NORMUNG. DIN 18134. **Soil-Testing Procedures and Testing Equipment – Plate load Test.** DIN. Berlin, 2012

MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS: O QUE É?. Produzido por Giuseppe Mirlisenna. Disponível em: <<https://www.esss.co/blog/metodo-dos-elementos-finitos-o-que-e/>>. Acesso em: 14 fev. 2018.

MORAIS, H. M. M. e MINHOTO, M. J. **Relação entre Módulo de Deformabilidade e CBR no estudo da Fundação dum Pavimento Rodoviário Flexível.** 7<sup>o</sup> Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia - IV Congresso de Engenharia de Moçambique. Inhambane, Moçambique, 2014.

MORAIS, H. M. M., MINHOTO, M. J e PAULA, A. M. **Relação entre módulo de Deformabilidade e CBR para Caracterização Mecânica da Fundação de Pavimentos.** Instituto Politécnico de Bragança, Portugal, 2015.

MOTTA, R. **Notas de Aula da Disciplina PTR-5919.** Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo: Escola Politécnica da USP, 2017.

PORTO, T. G.; KABBACH, F. I. **Notas de aula da disciplina PTR-2302 Projeto de Infraestrutura de vias de transportes terrestres**. São Paulo: Escola Politécnica da USP, 2007.

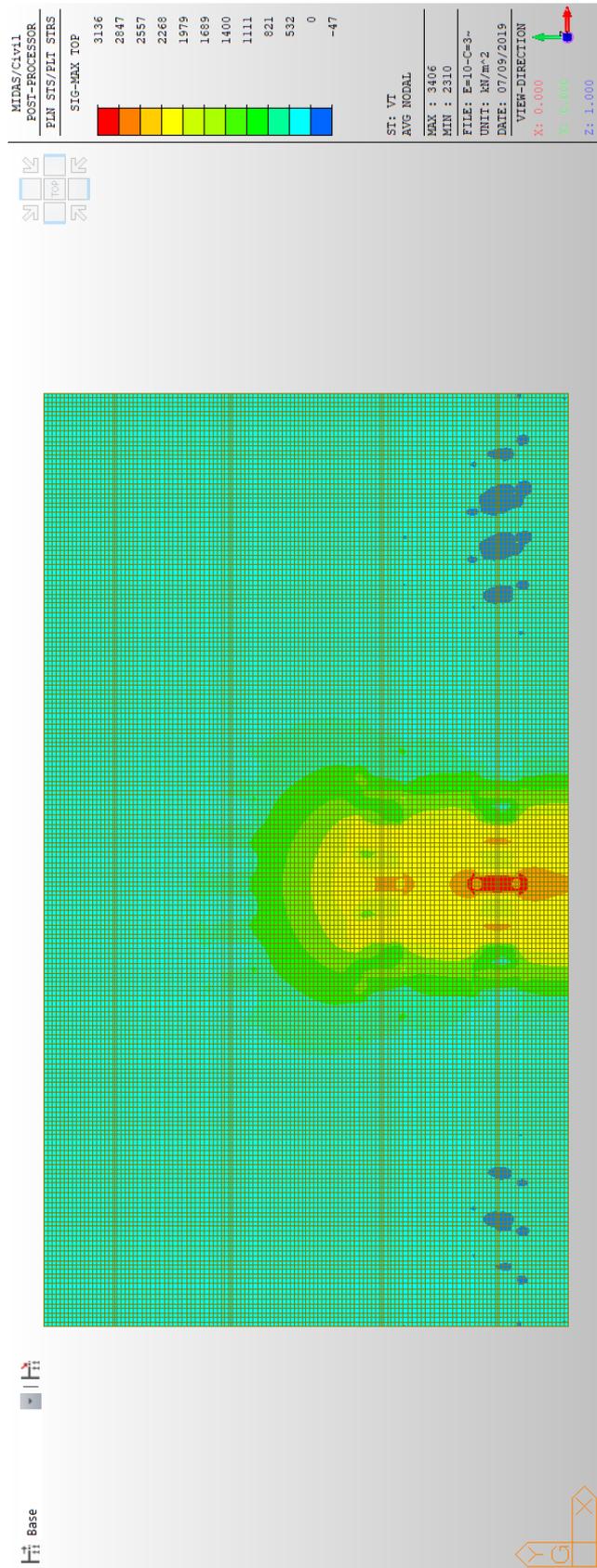
REDDY, J.N. **An Introduction to the Finite Element Method** Third ed. [S.l.]: McGraw-Hill, 2006.

Shell - **Shell Pavement Design Manual - Asphalt Pavements and Overlays of road Traffic**. Shell International Petroleum, Londres, 1985.

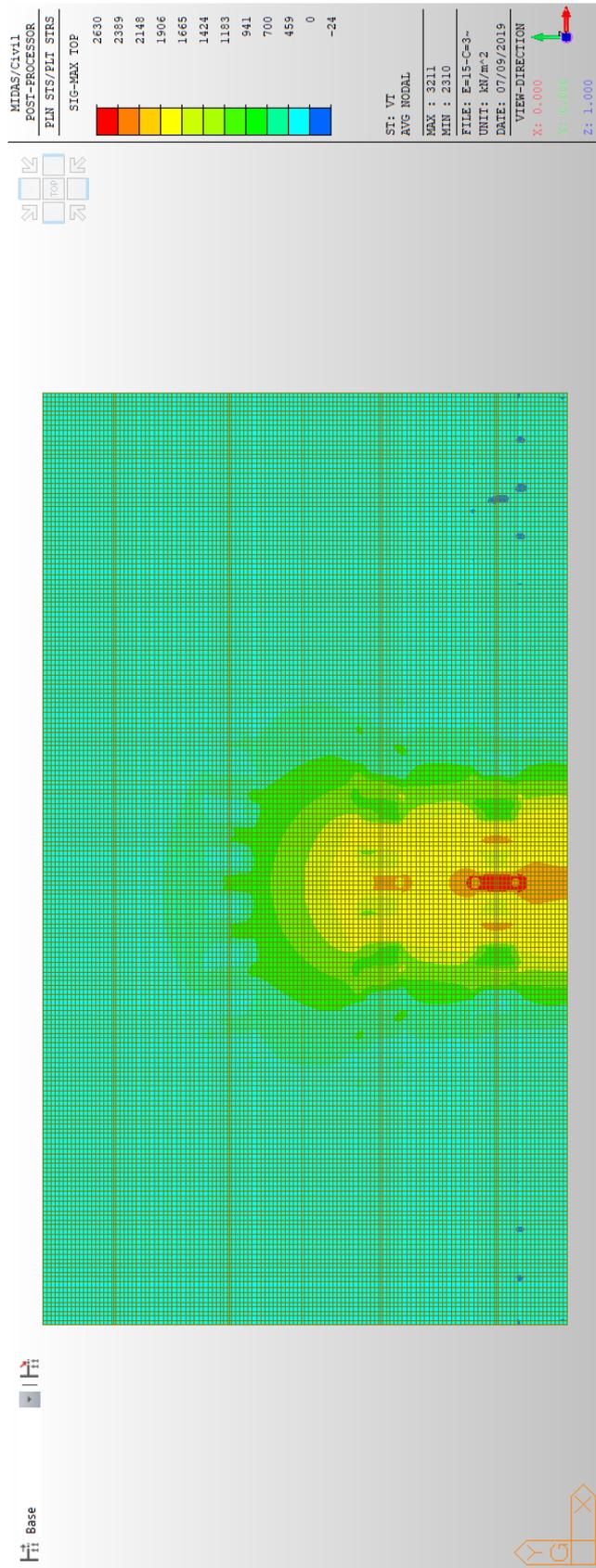
TRANSIT COOPERATIVE RESEARCH PROGRAM – TCRP. **Track Design Handbook for Light Rail Transit**. Second Edition, 2012

## **ANEXO A – RESULTADOS DAS MODELAGENS**

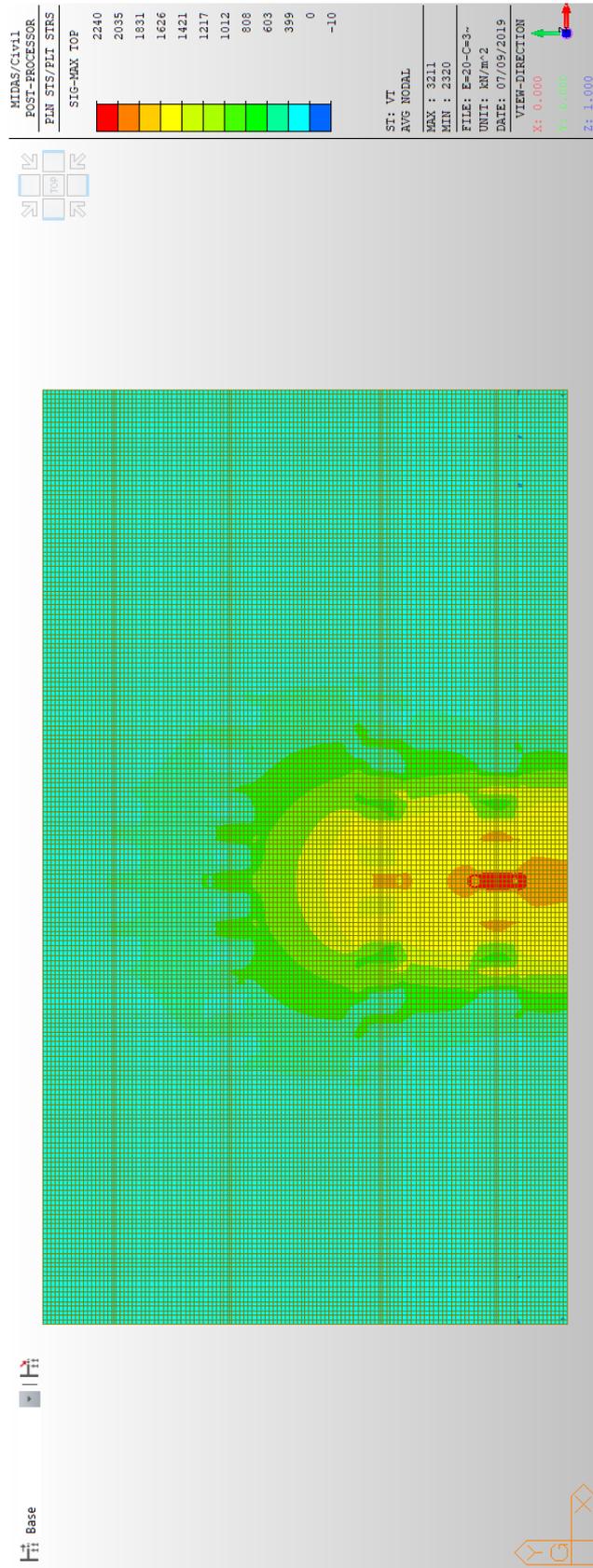
EV2 = 20 MPa; E = 10cm



EV2 = 20 MPa; E = 15cm

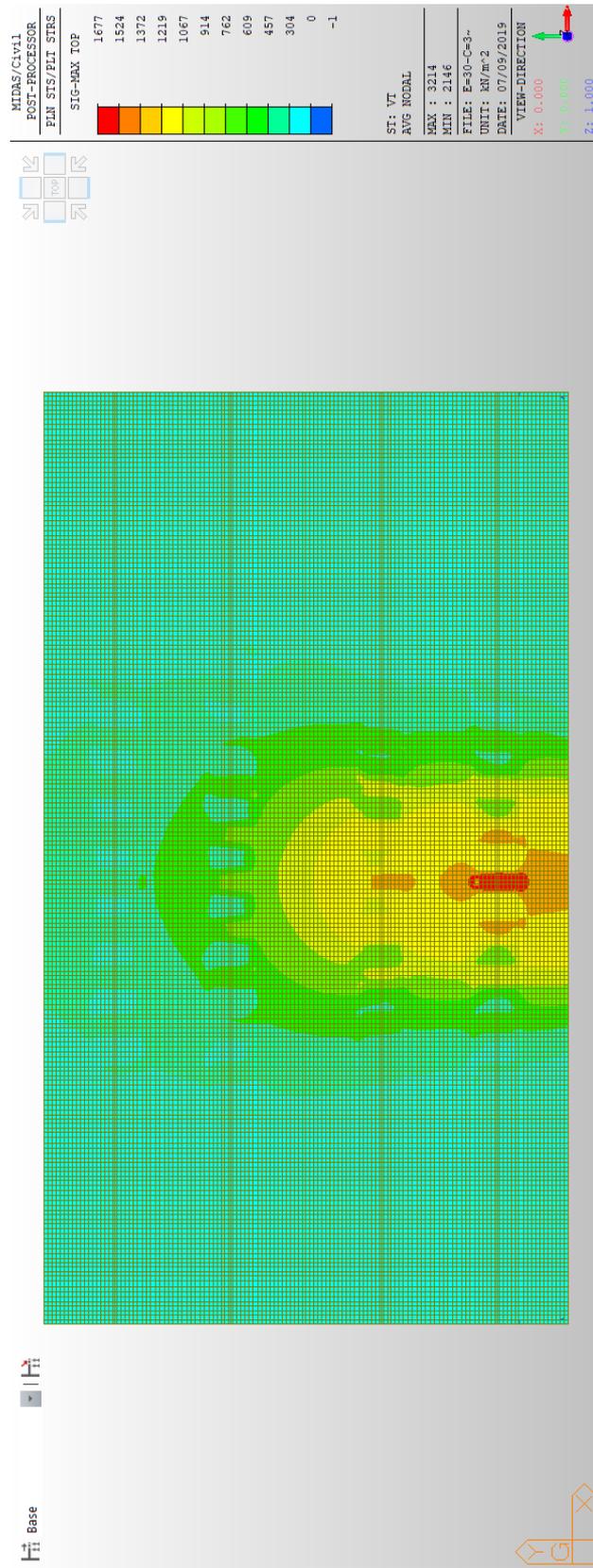


EV2 = 20 MPa; E = 20cm

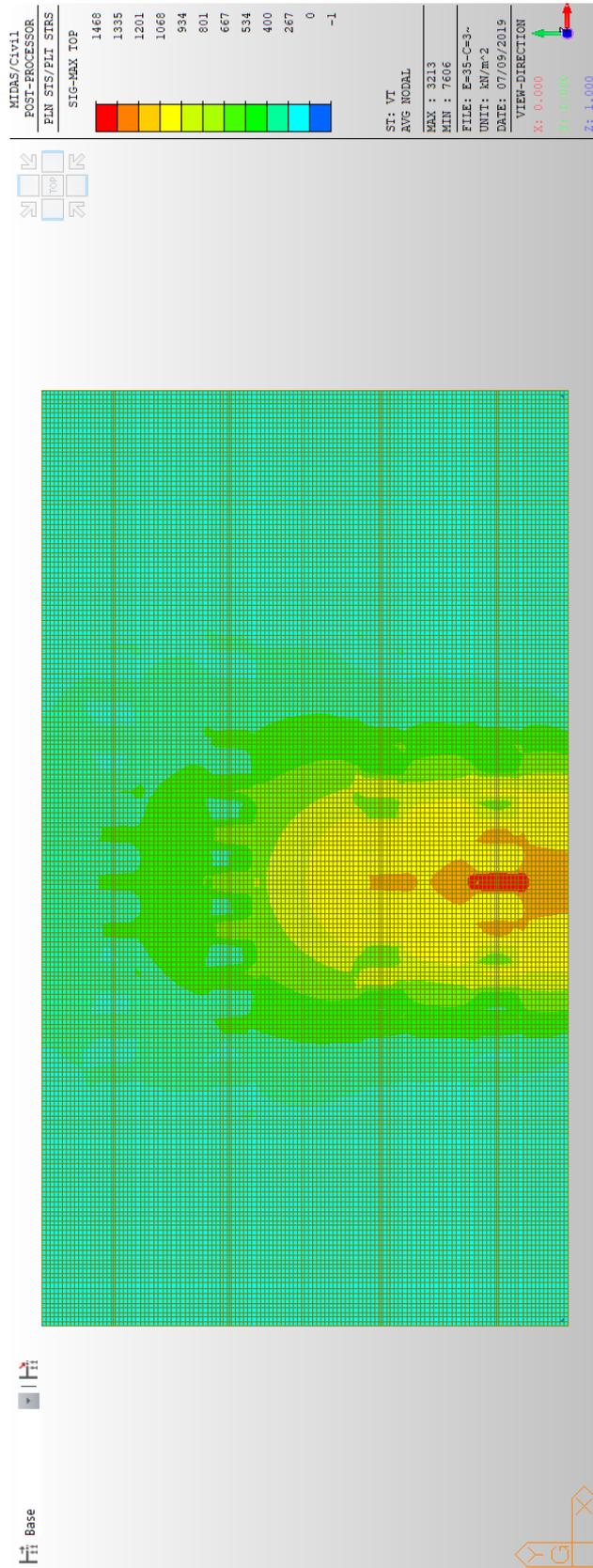




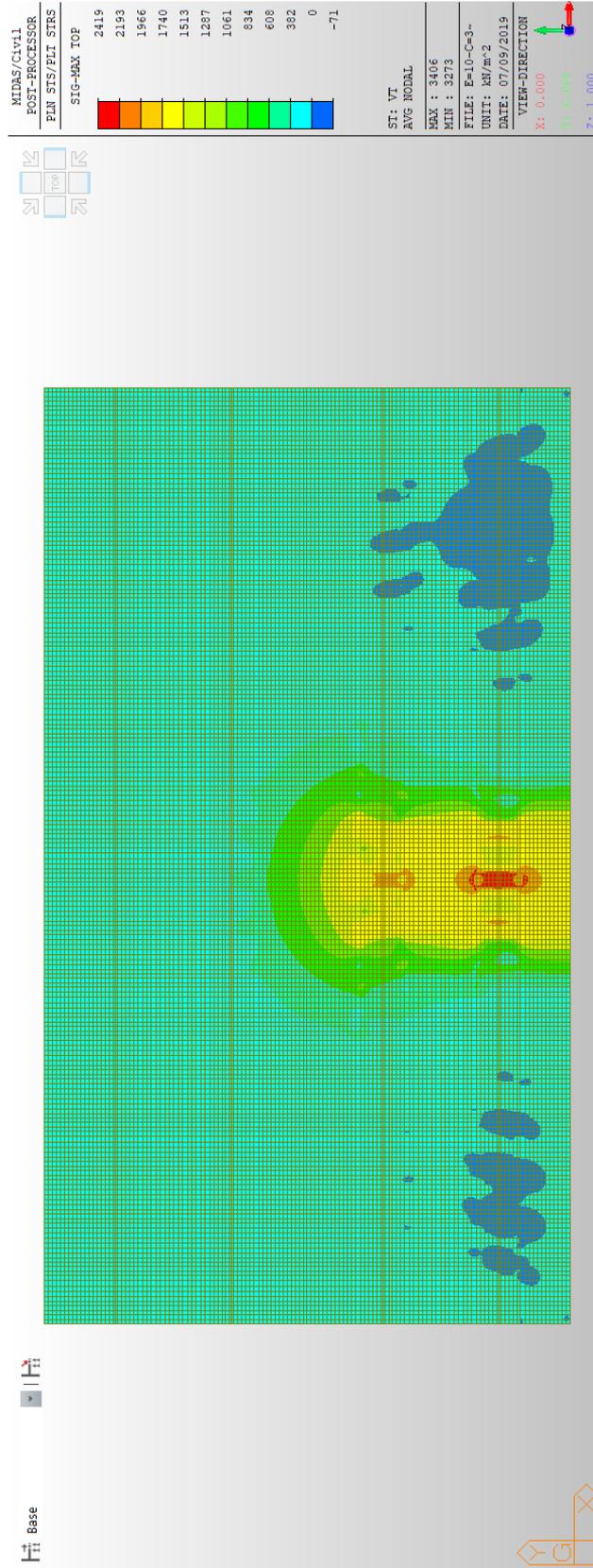
EV2 = 20 MPa; E = 30cm



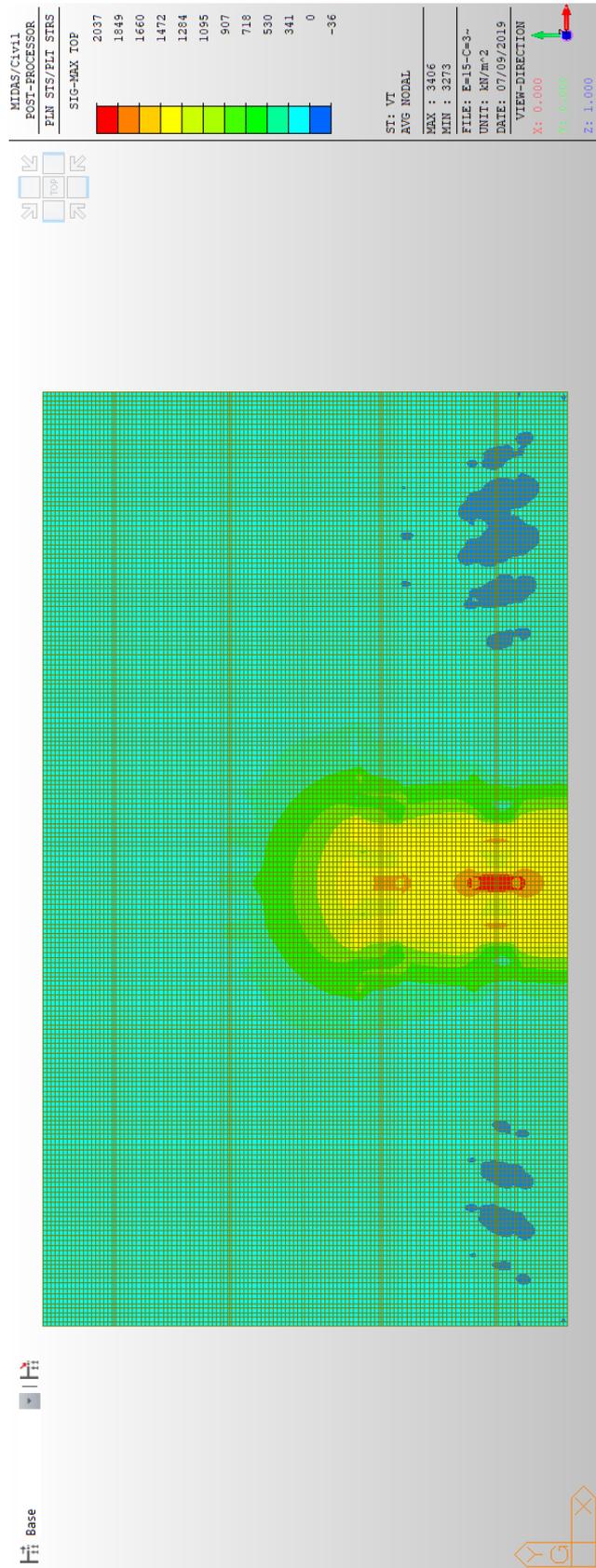
EV2 = 20 MPa; E = 35cm



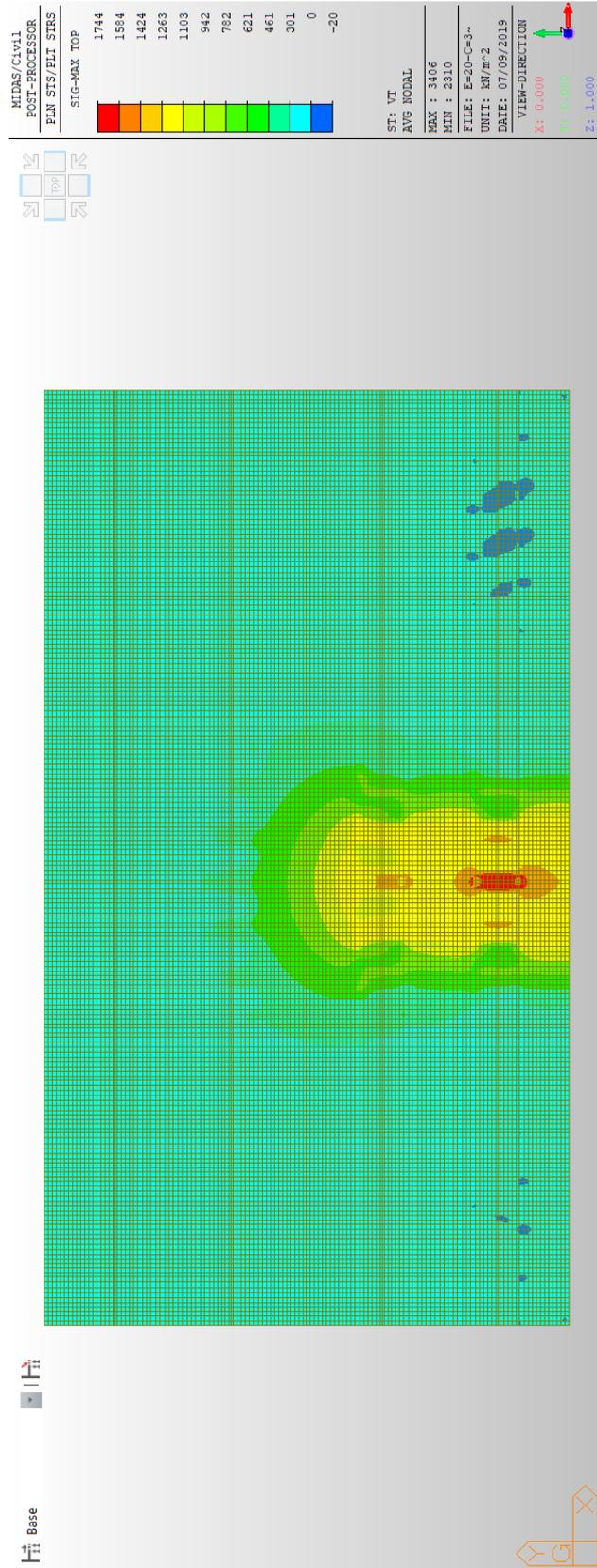
EV2 = 35 MPa; E = 10cm



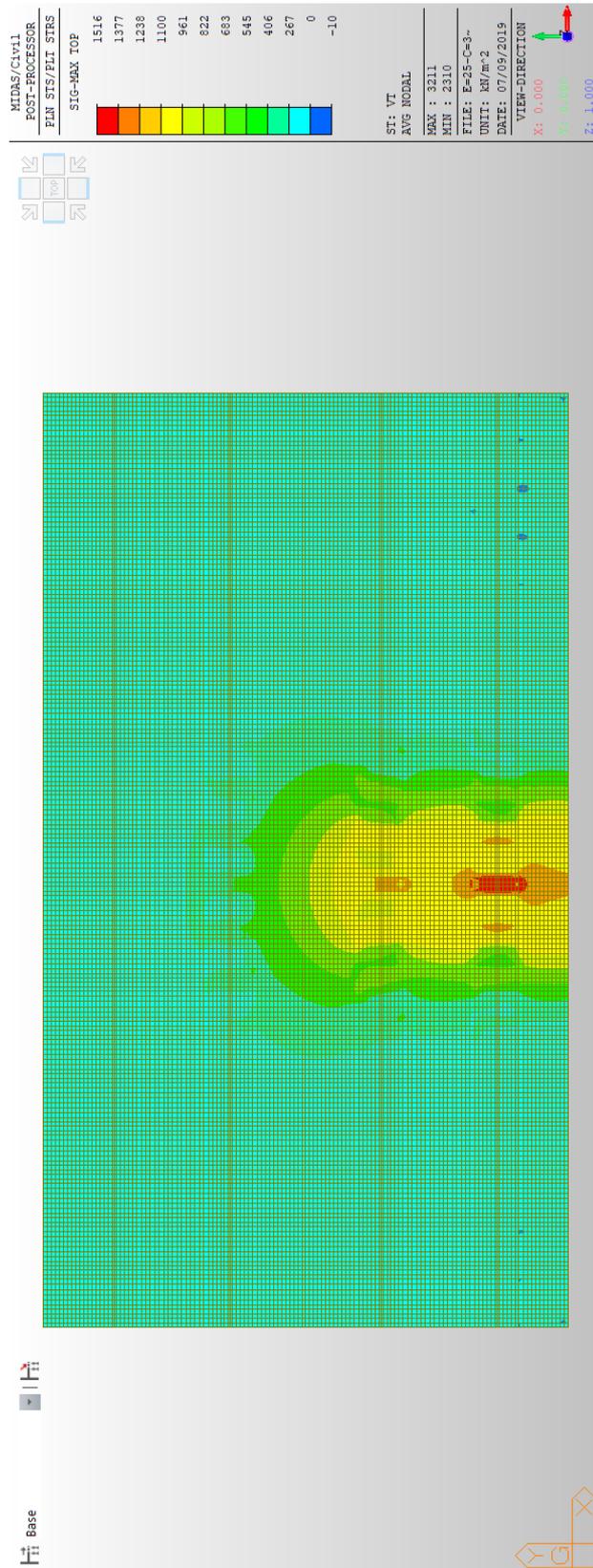
EV2 = 35 MPa; E = 15cm



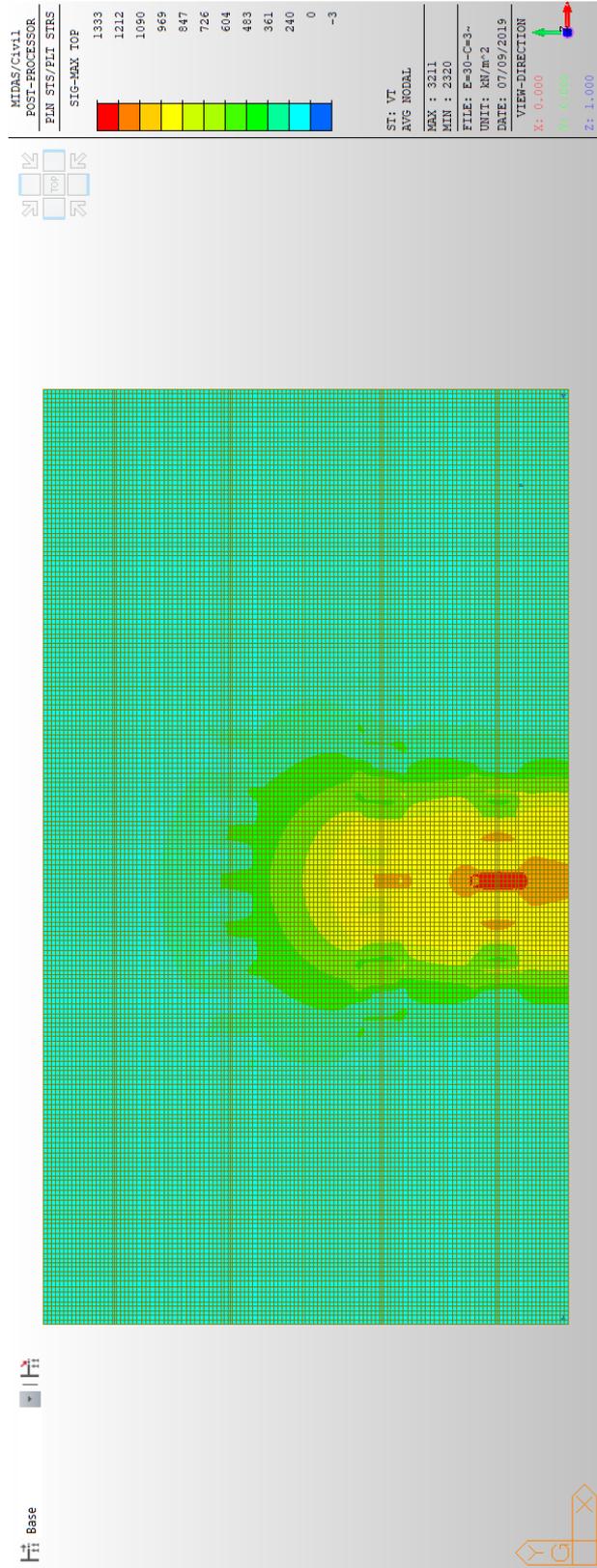
EV2 = 35 MPa; E = 20cm



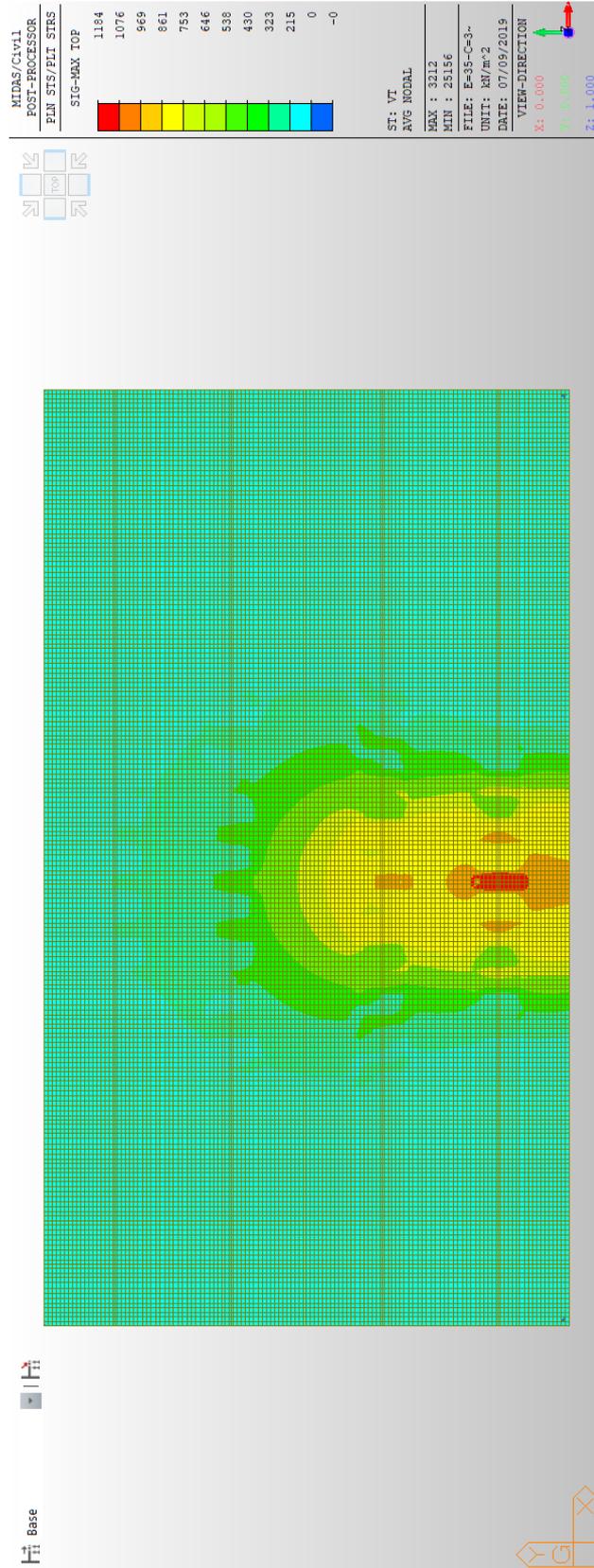
EV2 = 35 MPa; E = 25cm



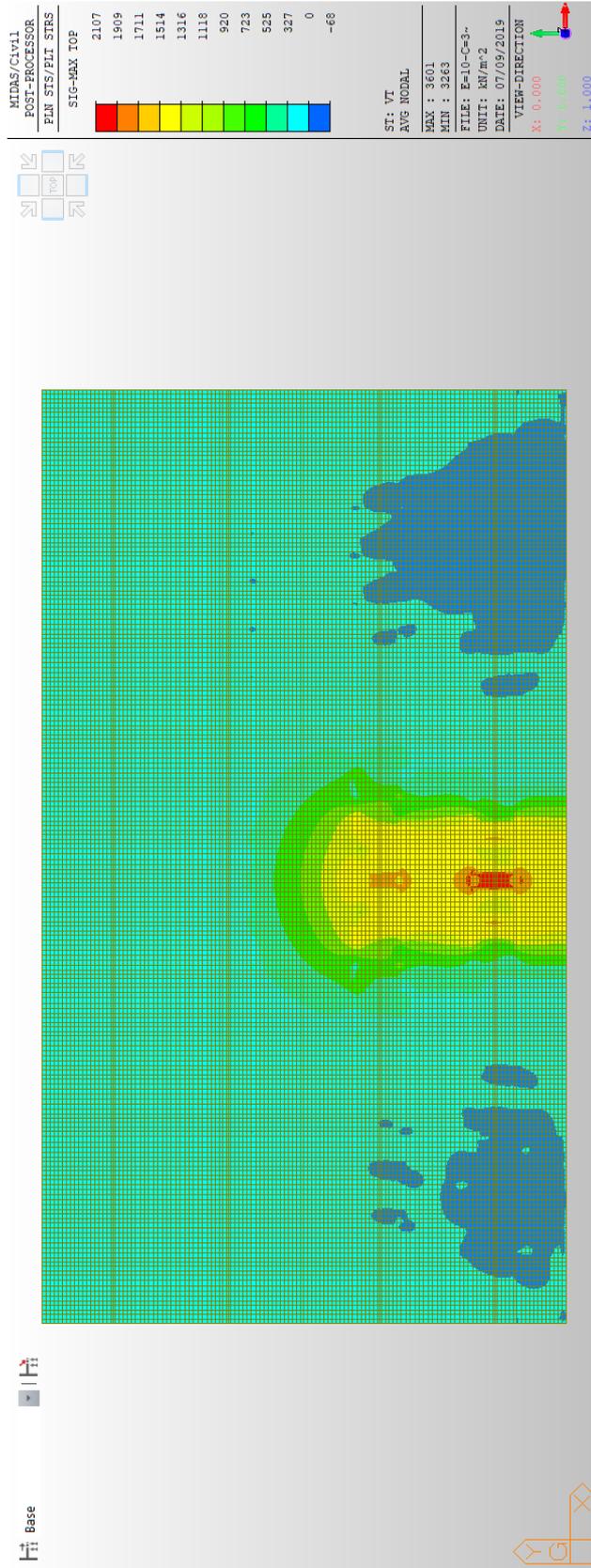
EV2 = 35 MPa; E = 30cm



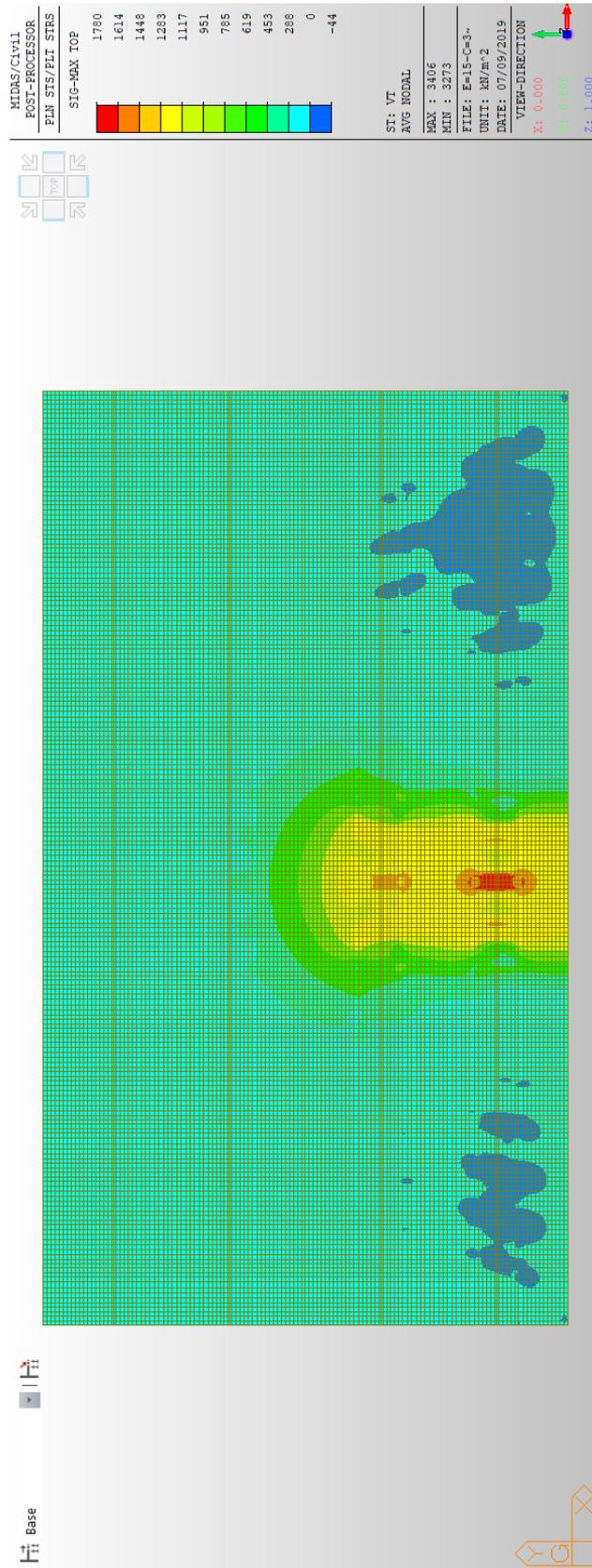
EV2 = 35 MPa; E = 35cm



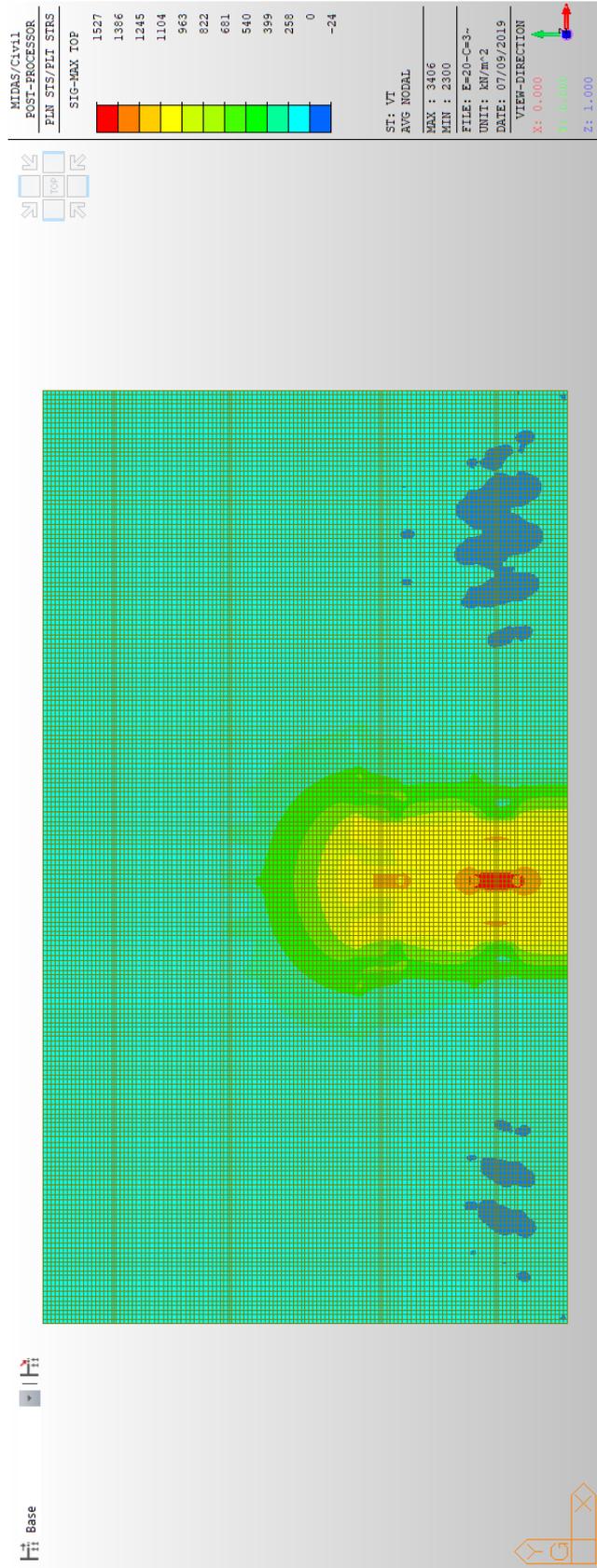
EV2 = 50 MPa; E = 10cm



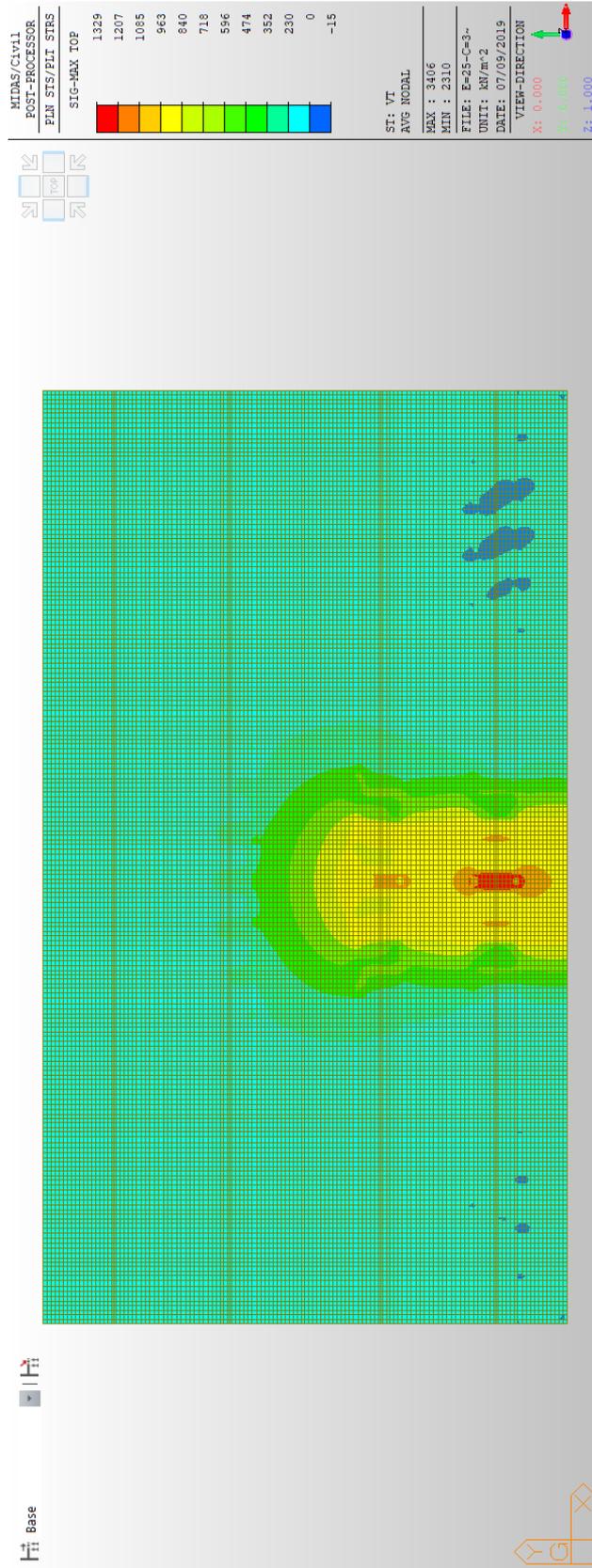
EV2 = 50 MPa; E = 15cm



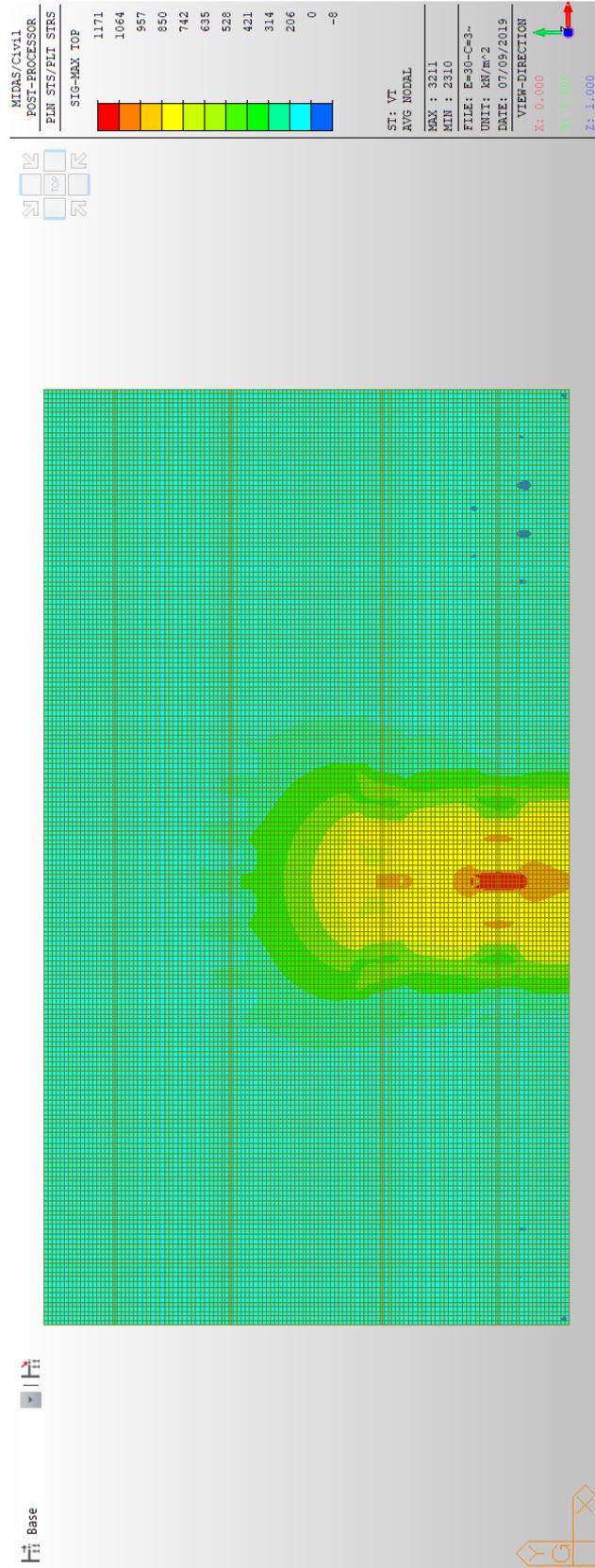
EV2 = 50 MPa; E = 20cm



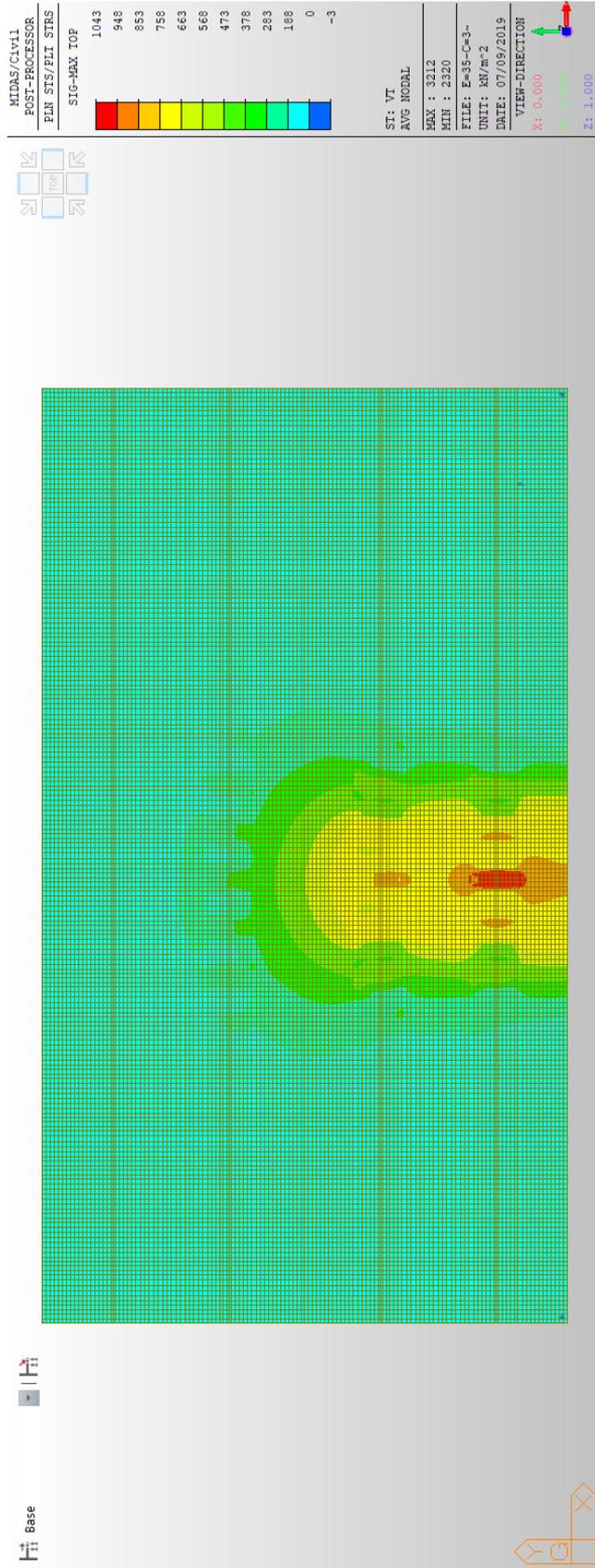
EV2 = 50 MPa; E = 25cm



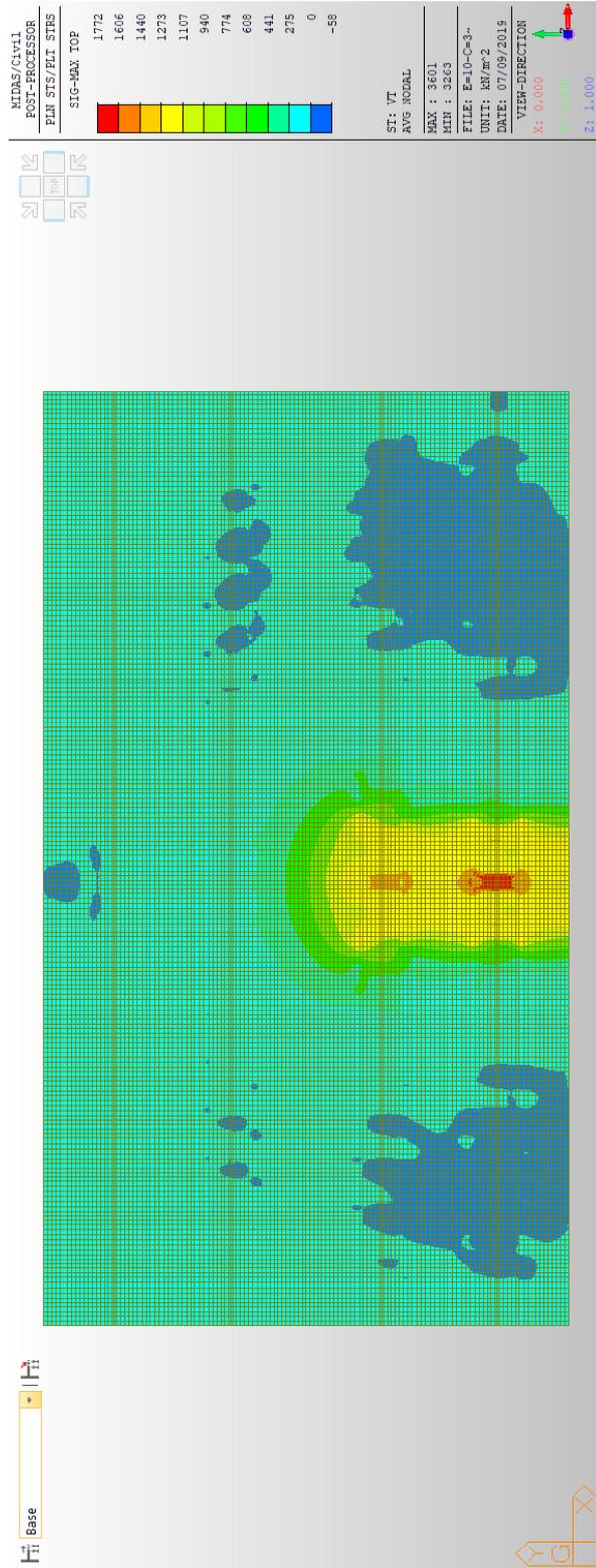
EV2 = 50 MPa; E = 30cm



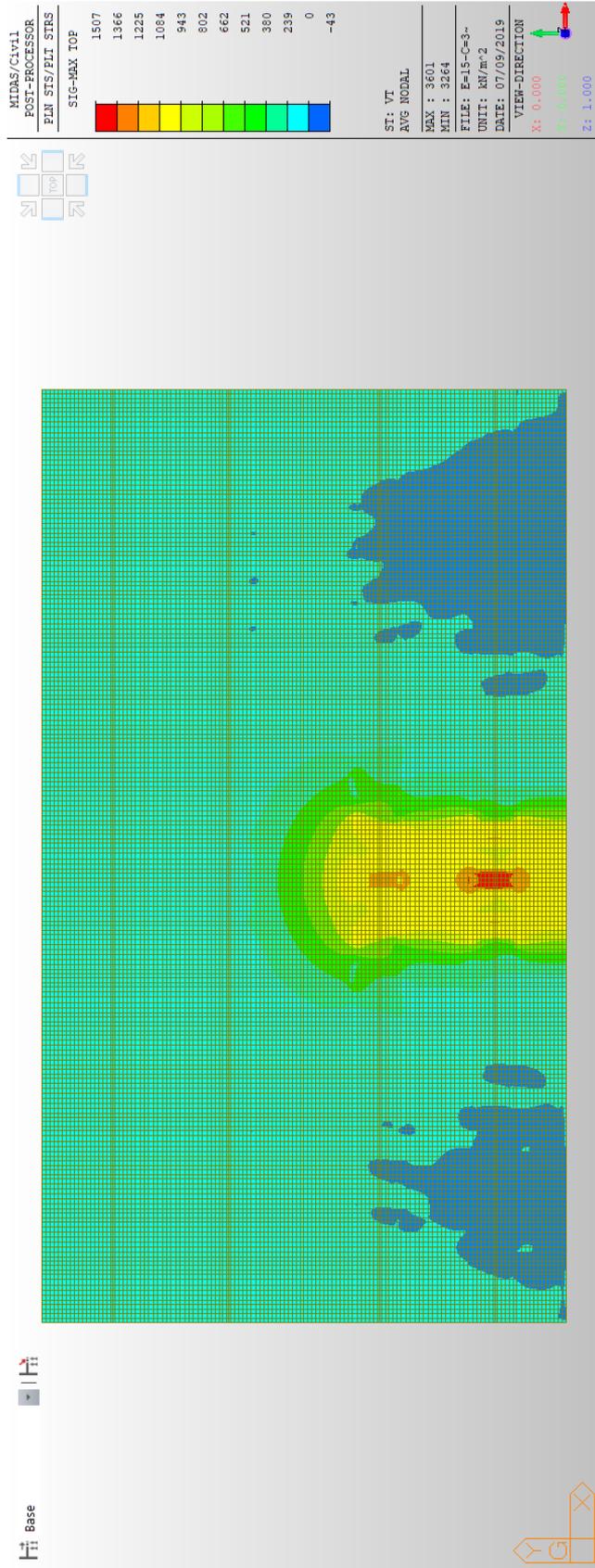
EV2 = 50 MPa; E = 35cm



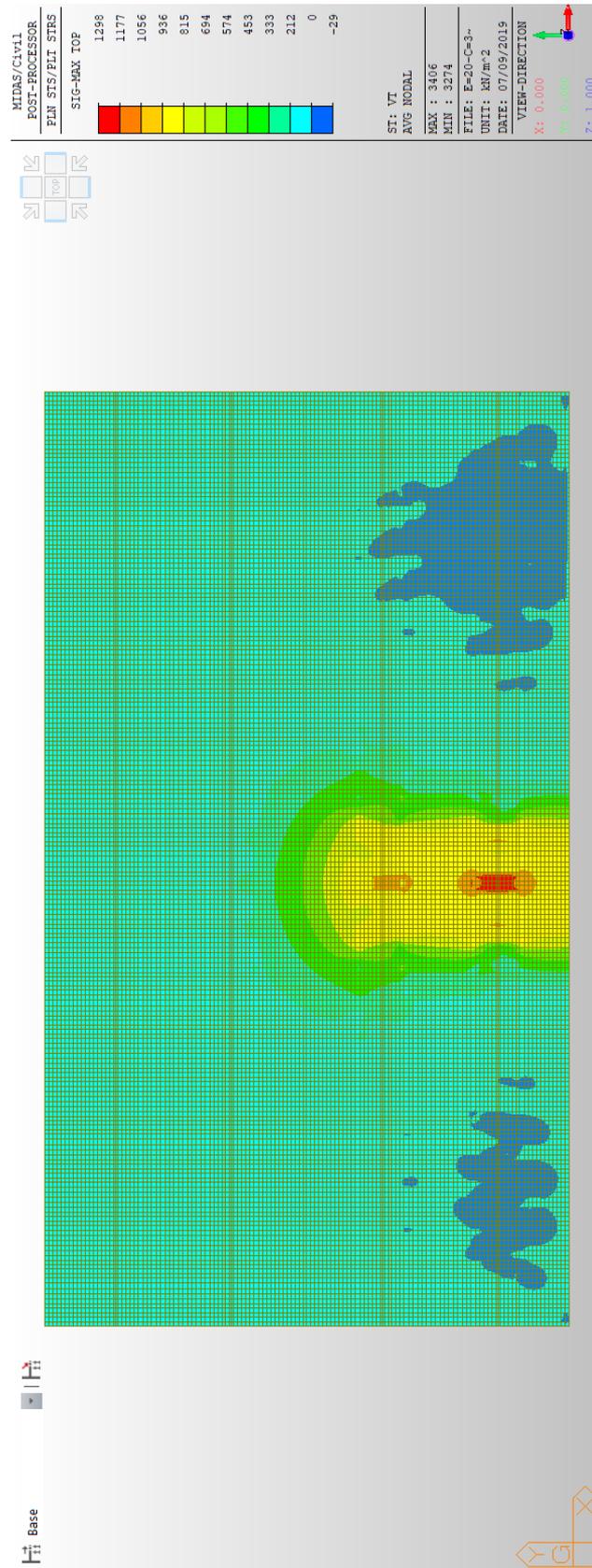
EV2 = 80 MPa; E = 10cm



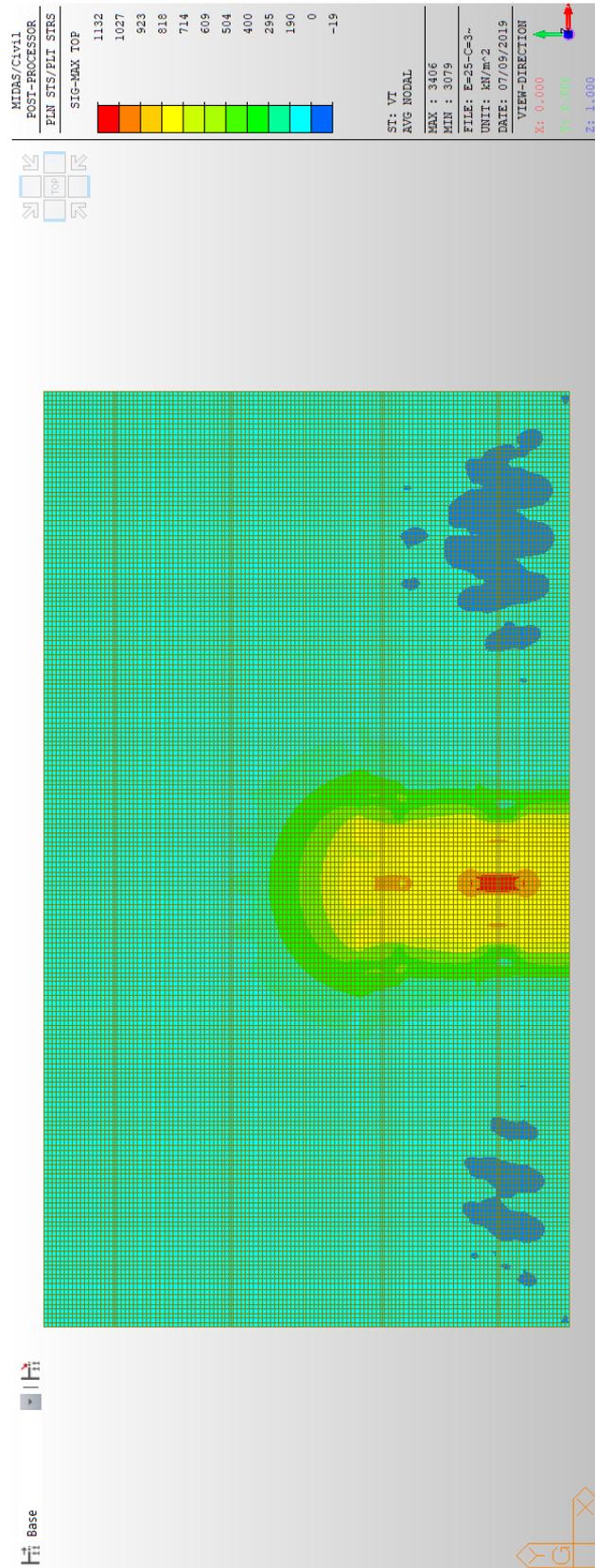
EV2 = 80 MPa; E = 15cm



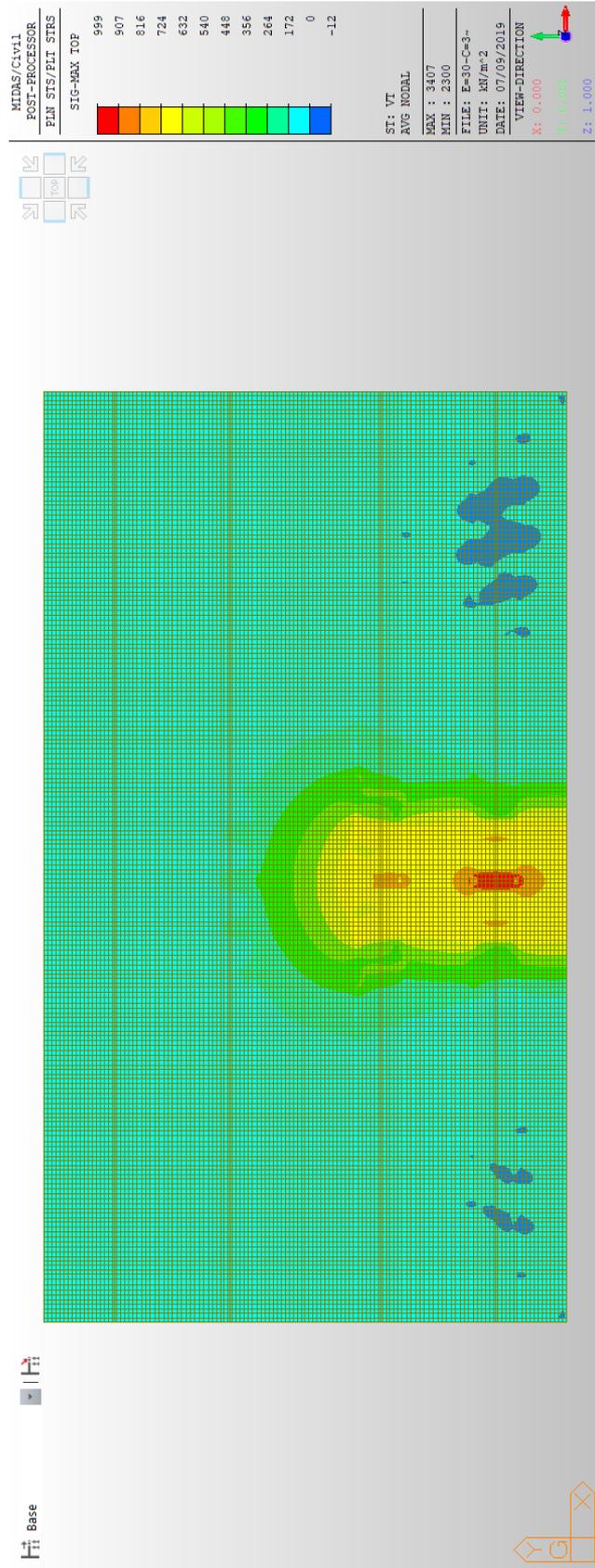
EV2 = 80 MPa; E = 20cm



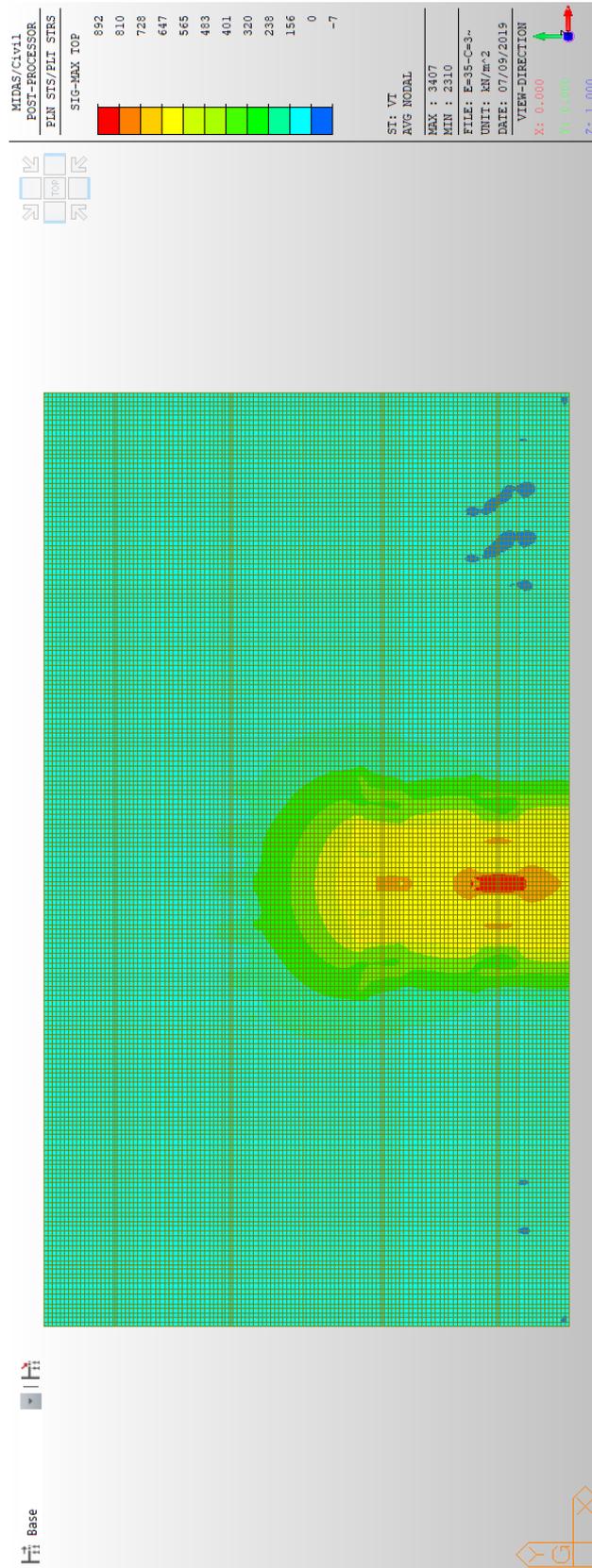
EV2 = 80 MPa; E = 25cm



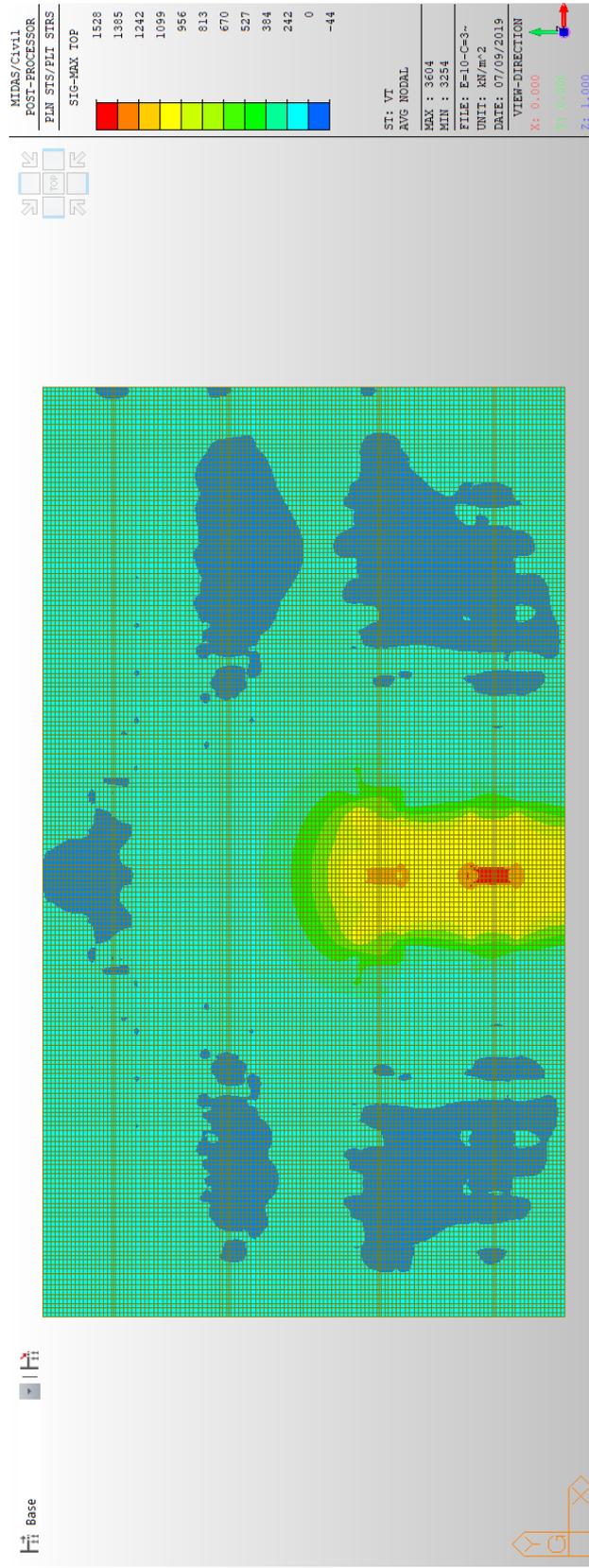
EV2 = 80 MPa; E = 30cm



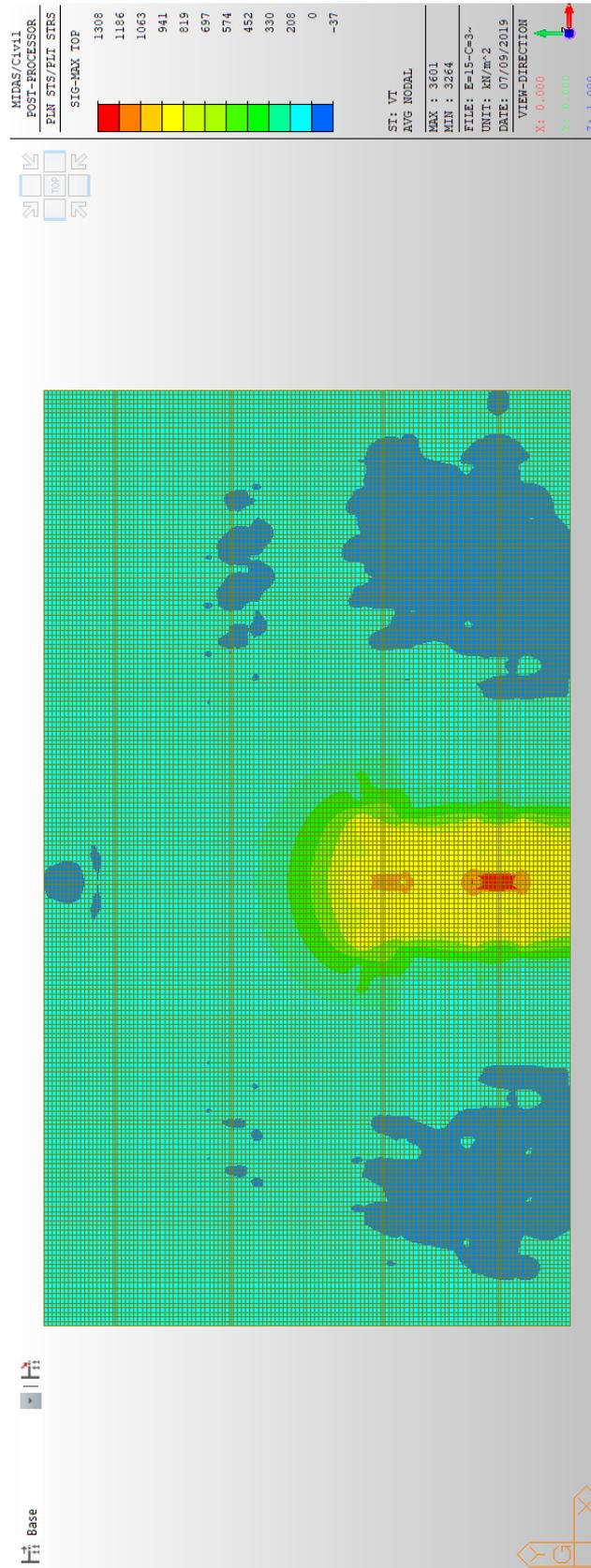
EV2 = 80 MPa; E = 35cm



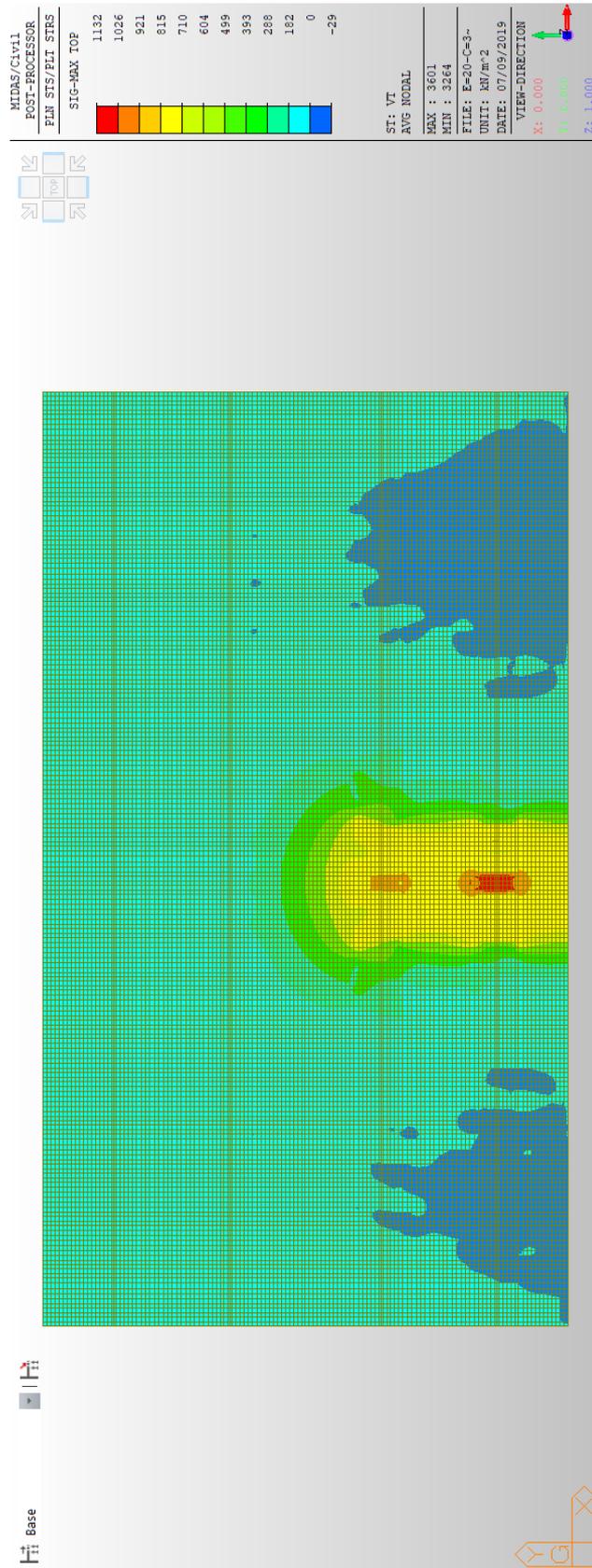
EV2 = 120 MPa; E = 10cm



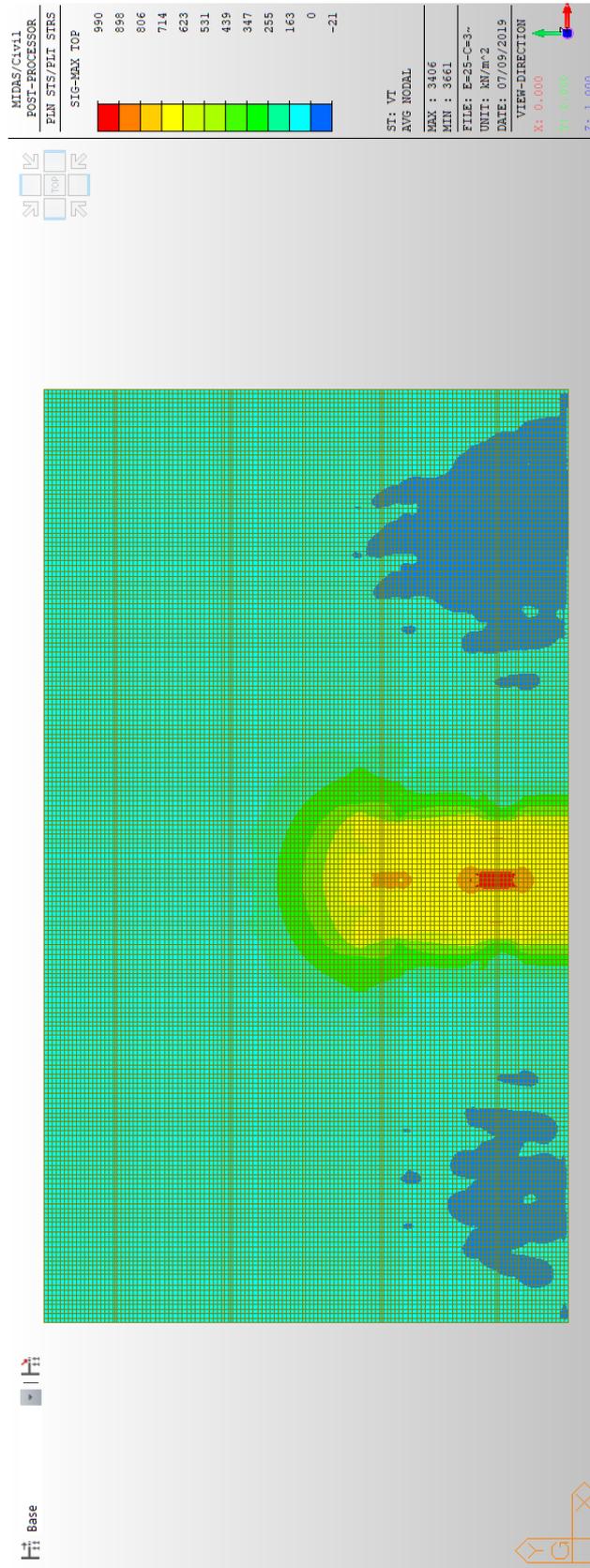
EV2 = 120 MPa; E = 15cm



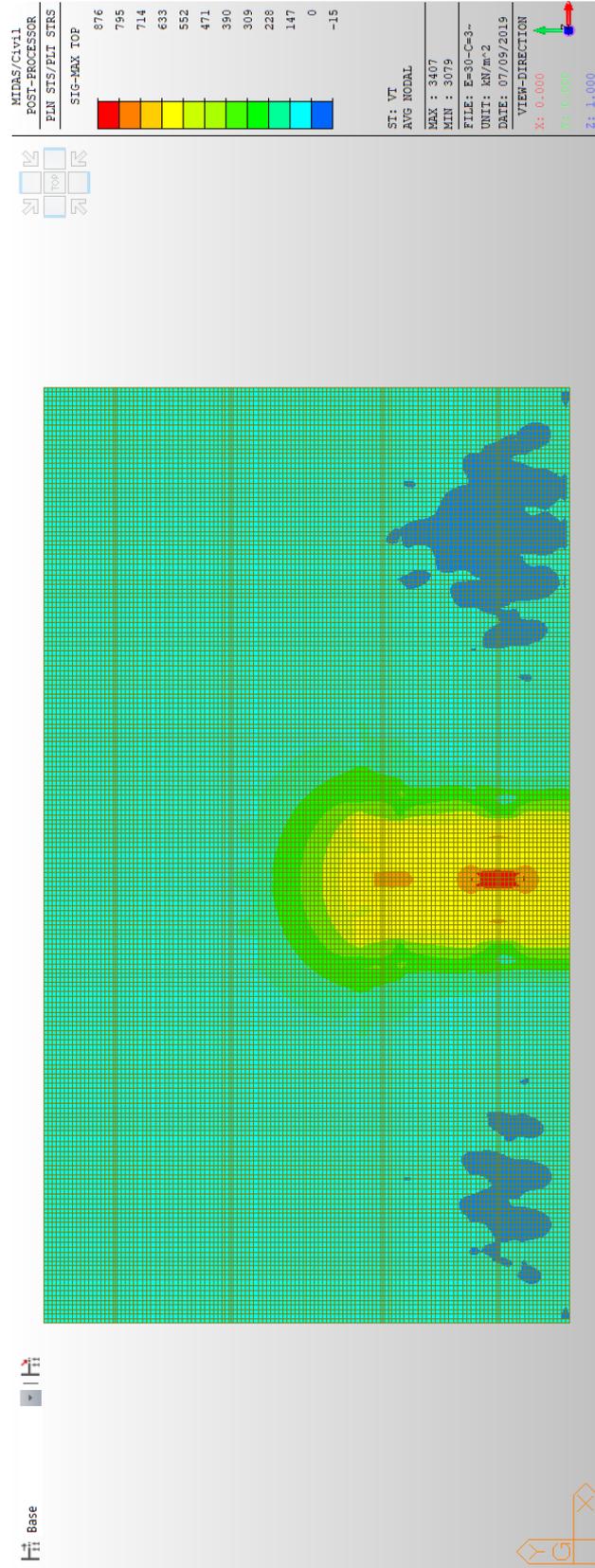
EV2 = 120 MPa; E = 20cm



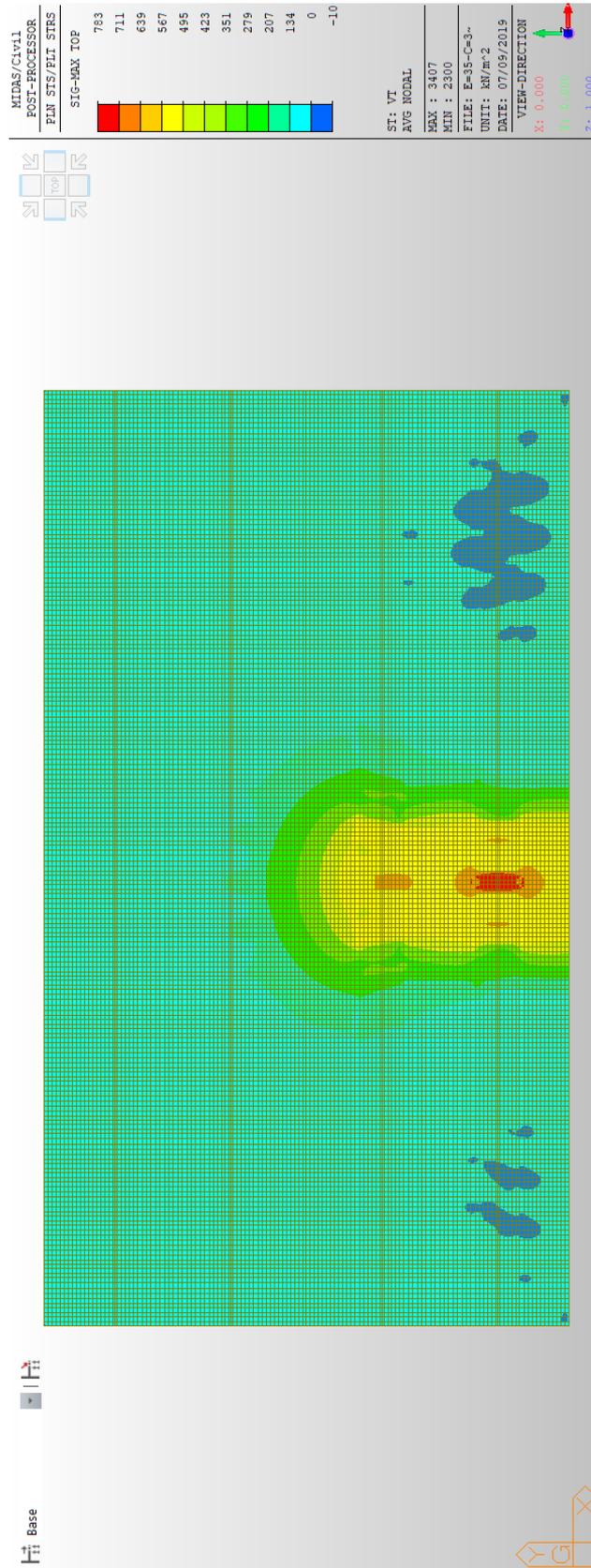
EV2 = 120 MPa; E = 25cm



EV2 = 120 MPa; E = 30cm

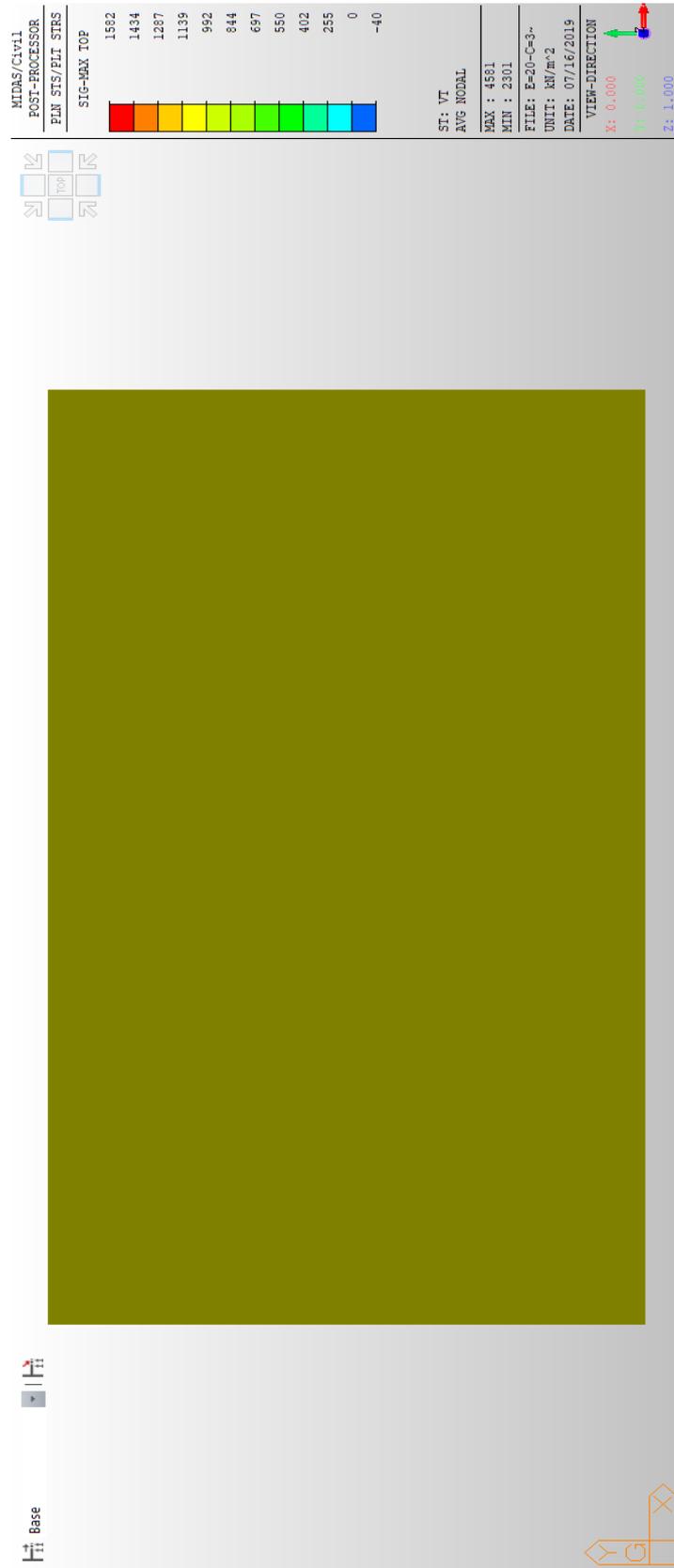


EV2 = 120 MPa; E = 35cm

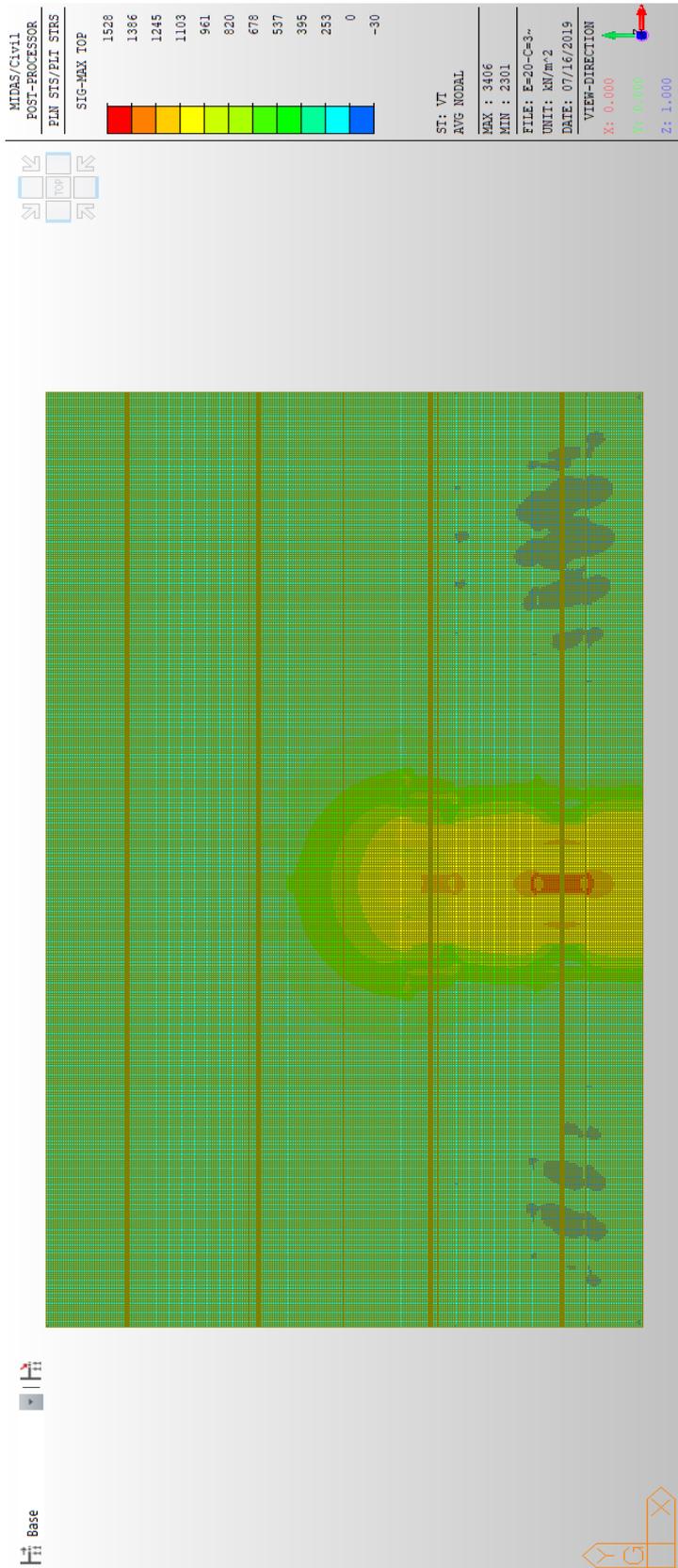


## **ANEXO B – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DAS DIMENSÕES DOS NÓS DO MODELO**

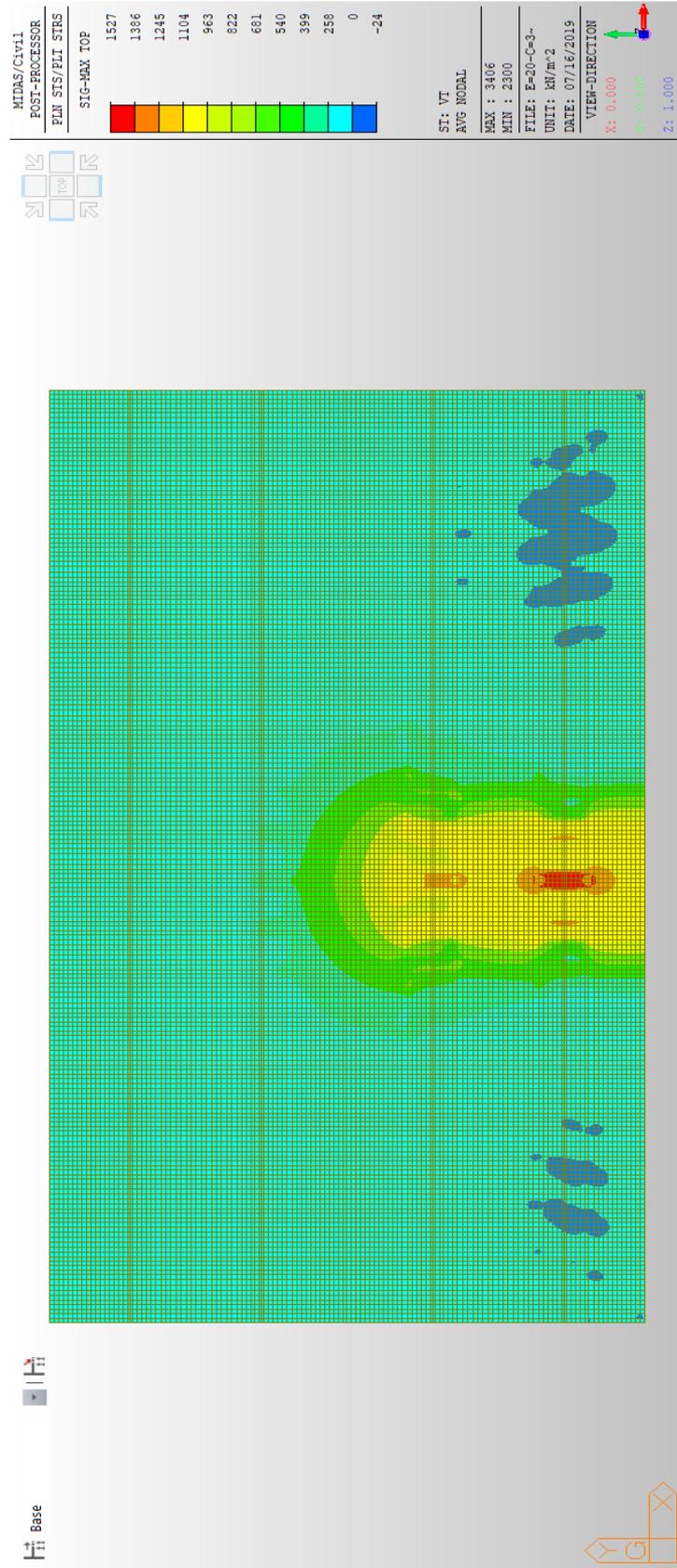
Malha 1: 1,0 cm x 1,0 cm



Malha 2: 2,5 cm x 2,5 cm



# Malha 3: 5 cm x 5 cm



Malha 4: 10 cm x 10 cm

