



XIV Congresso Brasileiro  
de Pontes e Estruturas

## Diretrizes Básicas Para Modelagem De Pavimento Industrial Com Uso De Programa Computacional

Danielle Monteiro Alves Barbosa<sup>1</sup>, Flávia Moll de Souza<sup>2</sup>, Mayra Soares Pereira Lima Perlingeiro<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal do Rio de Janeiro / Escola Politécnica / [danimonteiroab@poli.ufrj.br](mailto:danimonteiroab@poli.ufrj.br)

<sup>2</sup> Universidade Federal do Rio de Janeiro / Escola Politécnica / Departamento de Estruturas / [flaviamoll@poli.ufrj.br](mailto:flaviamoll@poli.ufrj.br)

<sup>3</sup> Universidade Federal Fluminense / Departamento de Engenharia Civil / [mayraperlingeiro@id.uff.br](mailto:mayraperlingeiro@id.uff.br)

### Resumo

A obtenção de resultados acurados em análises numéricas realizadas em programas computacionais depende de um processo cauteloso de construção e calibração do modelo em elementos finitos. As definições dos parâmetros de entrada de dados e dos elementos estruturais são fundamentais para a fiel representação estrutural e variam de acordo com o *software* utilizado. Este artigo define as diretrizes básicas para a modelagem de um pavimento industrial em concreto protendido apoiado diretamente sobre o solo de fundação empregando o *software* SAP 2000. Apresenta-se detalhadamente o passo a passo para a correta geração do modelo numérico, incluindo características não usuais como: gradiente térmico; força de protensão e interação solo-estrutura. Os resultados obtidos da modelagem são validados a partir dos resultados analíticos reconhecidos pelo meio técnico.

### Palavras-chave

Piso Industrial; Modelagem Numérica; Concreto Protendido; Gradiente Térmico; Interação Solo-Estrutura.

### 1. Introdução

Pisos industriais de concreto são pavimentos de alto desempenho comumente utilizados em locais com grande volume de circulação, submetidos a cargas elevadas e/ou ambientes agressivos.

Por se tratar de um elemento essencial para o bom funcionamento dos sistemas de logística e operação de hospitais, galpões industriais e *shoppings centers*, é essencial que o pavimento industrial seja dimensionado adequadamente, de modo que a estrutura mantenha um bom comportamento em serviço.

Programas baseados em elementos finitos são ótimas ferramentas para a análise e dimensionamento de estruturas devido ao seu poder de cálculo e pela fiabilidade dos seus resultados, sendo o instrumento de trabalho de inúmeros engenheiros. No entanto, para que o modelo seja uma fiel representação da estrutura em estudo e os resultados obtidos sejam confiáveis, o processo de construção e calibração do modelo deve ser cuidadoso.

O objetivo deste trabalho é definir de forma detalhada o passo a passo para a geração do modelo numérico de um pavimento industrial em concreto protendido utilizando o programa computacional comercial difundido no meio técnico, o SAP 2000.

O modelo aqui apresentado é o instrumento de análise utilizado no trabalho de conclusão de curso de Barbosa (2023).

## 2. Características do projeto

Segundo Rodrigues (2010), o pavimento industrial é um sistema composto por camadas de diferentes materiais, como revestimento, placa de concreto, base e subleito, no qual cada componente deve apresentar um bom desempenho para assegurar a resistência e a durabilidade.

O piso modelado é composto por uma placa de concreto protendido com resistência à compressão característica de 35 MPa e dimensões de 30,0 m de largura, 90,0 m de comprimento e 20,0 cm de espessura apoiada diretamente sobre o solo de suporte.

Para o sistema de protensão, foram utilizadas em cada cabo duas cordoalhas de sete fios, de diâmetro nominal igual a 12,7 mm e aço CP-190 de relaxação baixa. O espaçamento entre os cabos seguiu o item 20.3.1 da ABNT NBR 6118:2014, o qual define que o espaçamento entre os cabos deve ser de, no máximo, seis vezes a espessura da placa, não excedendo 120 cm, e a tensão de pré-compressão média deve ser igual ou superior a 1 MPa para que a placa de concreto seja considerada protendida. O espaçamento considerado na modelagem para o piso em questão foi de 120 cm.

O sistema de suporte da estrutura é formado pela base e pelo subleito, sendo considerado na análise deste trabalho como um líquido denso, seguindo o Modelo de Winkler. Este modelo considera que o solo pode ser visto como um sistema de molas lineares com rigidez equivalente e independentes entre si, sendo representado pelo coeficiente de reação vertical do solo ( $k$ ). Na modelagem do pavimento industrial foi considerado um coeficiente de reação vertical de 35 MPa/m, que corresponde a um CBR (*California Bearing Ratio*) de aproximadamente 5%, segundo Rodrigues (2010).

O gradiente térmico utilizado buscou representar o cenário do clima tropical brasileiro, caracterizado por temperaturas elevadas. Segundo o experimento realizado em São Paulo por Balbo e Severi (2002), o gradiente térmico variou entre 61 °C/m e 80 °C/m durante todo o ano. Dessa forma, o gradiente térmico considerado na modelagem foi de 75 °C/m.

Também foi considerada a ação da sobrecarga acidental de 50 kN/m<sup>2</sup>.

## 3. Construção do modelo

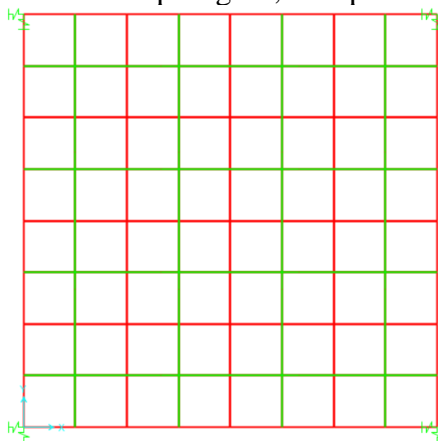
O primeiro passo do processo de construção do modelo foi desenvolver um modelo simplificado para a calibração de todos os parâmetros de dados de entrada e dos elementos estruturais definidos no SAP 2000, comparando os resultados preliminares com os dos modelos analíticos.

O primeiro modelo simplificado de 4 m de comprimento por 4 m de largura está apresentado na Figura 1. O desenho inicial era composto apenas pela placa de concreto apoiada em molas verticais distribuídas pela área. No entanto, o modelo apresentava instabilidade, sendo necessário restringir os movimentos horizontais.

Inicialmente, foram definidos apoios de segundo gênero nos quatro cantos da placa. Porém, percebeu-se que uma parte da força de protensão transferida para o concreto era absorvida por esses apoios. Assim, os apoios de segundo gênero foram substituídos por molas horizontais de baixa rigidez.

Outra questão importante foi a definição da distribuição da sobrecarga no pavimento. A princípio, definiu-se a sobrecarga distribuída por toda a área da placa, mas os momentos fletores resultantes eram iguais a zero. Percebeu-se, então, que a aplicação da carga uniformemente distribuída por todo

o pavimento resultava em deslocamentos iguais de todas as molas de apoio, ocasionando deslocamento vertical da placa como um corpo rígido, sem provocar deformação no piso.



**Figura 1 – Primeiro modelo reduzido desenvolvido no SAP 2000.**

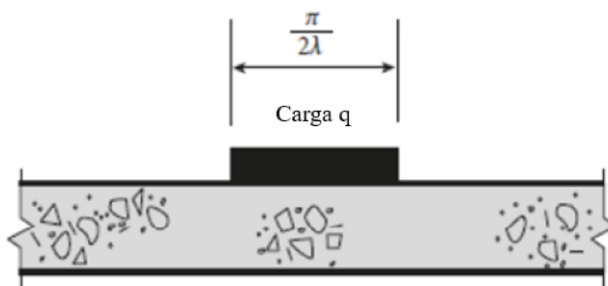
Conforme exposto por ABREU (2021), a 4ª edição da *Technical Report 34 – Concrete Industrial Ground Floors (The Concrete Society, 2016)* define faixas de aplicação do carregamento distribuído para determinação das solicitações máximas na placa.

Assim, o momento fletor positivo máximo na laje é causado por uma carga aplicada em uma faixa de largura igual a  $\pi/2\lambda$ , conforme ilustrado na Figura 2, sendo

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{3k}{Eh^3}} \quad (1)$$

onde:

- $\lambda$  é o módulo de deformação ( $m^{-1}$ );
- $k$  é o coeficiente de reação vertical do solo (MPa/m);
- $E$  é o módulo de elasticidade do concreto (MPa);
- $h$  é a espessura da placa (m).



**Figura 2 – Padrão de carga uniformemente distribuída crítica para momento fletor positivo máximo (*The Concrete Society, 2016, modificado*).**

Para a espessura da placa e o coeficiente de reação vertical do solo considerados neste trabalho, a largura da faixa deve ser igual a 1,92 m. Para facilitar a modelagem e simplificar a malha de elementos finitos, foi utilizada faixa de largura igual a 2,00 m.

Durante a verificação das perdas ocorridas nos cabos, notou-se que as perdas imediatas da força de protensão era bastante expressiva – cerca de 20% (perda de protensão total esperada). Após análises, constatou-se que as dimensões reduzidas do modelo interferiam nas perdas de tensão nos cabos. Assim, foi desenvolvido um novo modelo de 12 m de comprimento e 12 m de largura, no qual verificaram-se perdas imediatas satisfatórias, conforme apresentado na Figura 3.

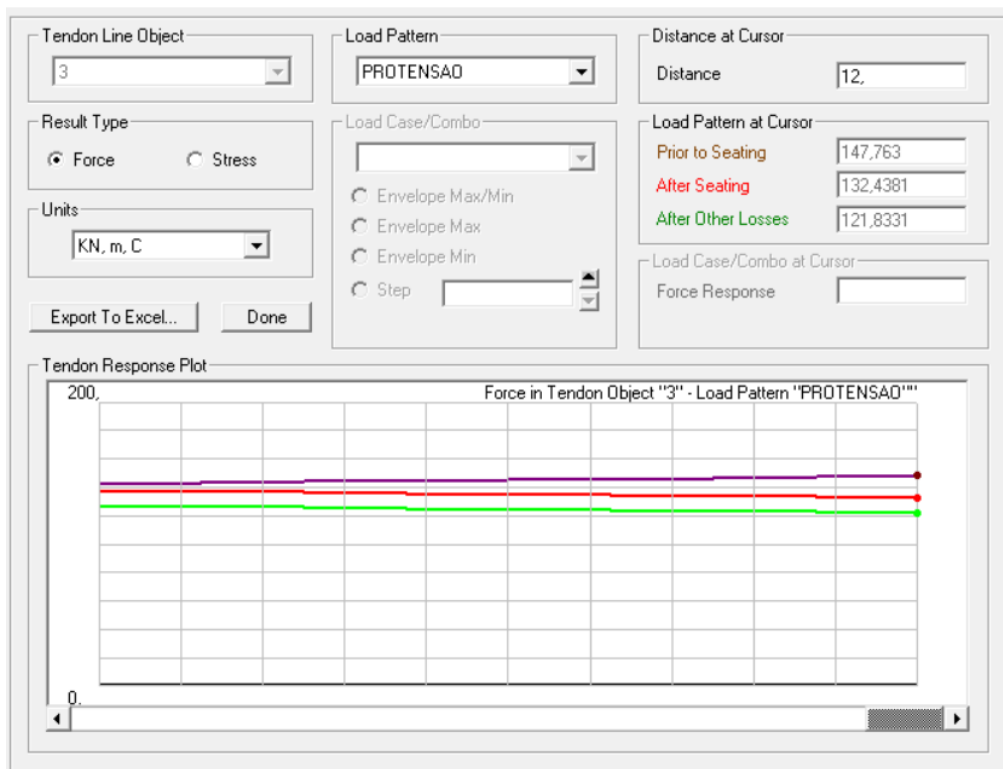


Figura 3 – Perdas de protensão nos cabos do modelo simplificado de 12m x 12m – SAP 2000

## 4. Modelo estrutural

### 4.1. Definição dos materiais

O primeiro passo da modelagem é a definição dos materiais utilizados no projeto. Neste trabalho: concreto e aço de armadura ativa.

#### 4.1.1. Concreto

Neste projeto, foi utilizado o concreto de resistência à compressão característica de 35 MPa. A Figura 4, extraída do SAP 2000, apresenta as definições das propriedades do concreto.

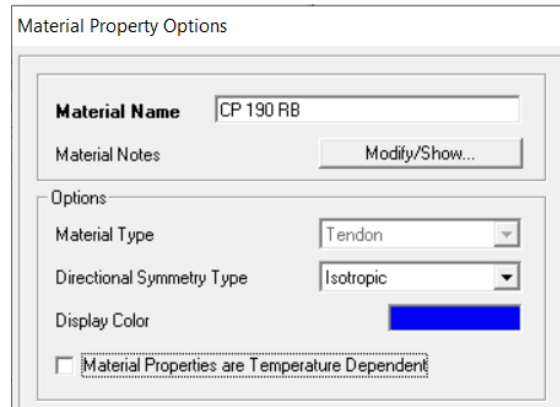
The screenshot shows the 'Material Property Data' dialog box for a concrete material named 'fck 35'. The material type is set to 'Concrete'. The units are 'KN, m, C'. The properties are defined as follows:

Property	Value
Material Name and Display Color	fck 35
Material Type	Concrete
Weight per Unit Volume	25
Mass per Unit Volume	2,5493
Modulus of Elasticity, E	29000000
Poisson's Ratio, U	0,2
Coefficient of Thermal Expansion, A	1,000E-05
Shear Modulus, G	12083333
Specified Concrete Compressive Strength, f'c	35000

Figura 4 – Definição das propriedades do concreto – SAP 2000

#### 4.1.2. Aço de armadura ativa

No SAP 2000, o aço de armadura ativa deve ser especificado com o *tendon* como tipo de material. Nesta opção, a definição padrão do programa é um material com simetria uniaxial que impossibilita a definição do Coeficiente de Poisson. Dessa forma, é necessário selecionar a opção de propriedades avançadas do material para que seja possível definir o material como isotrópico, conforme mostra a Figura 5.



The screenshot shows the 'Material Property Options' dialog box. The 'Material Name' field contains 'CP 190 RB'. Below it is a 'Material Notes' field with a 'Modify/Show...' button. The 'Options' section includes a 'Material Type' dropdown set to 'Tendon', a 'Directional Symmetry Type' dropdown set to 'Isotropic', and a 'Display Color' field with a blue color swatch. At the bottom, there is an unchecked checkbox labeled 'Material Properties are Temperature Dependent'.

**Figura 5 – Definição das opções avançadas do aço de armadura ativa – SAP 2000**

A Figura 6, extraída do SAP 2000, apresenta as definições das propriedades do aço CP-190 de relaxação baixa utilizado para a armadura ativa. Ressalta-se que o peso específico do aço foi definido igual a zero, pois o peso da armadura está contabilizado no peso específico do concreto, igual a 25 kN/m<sup>3</sup>.

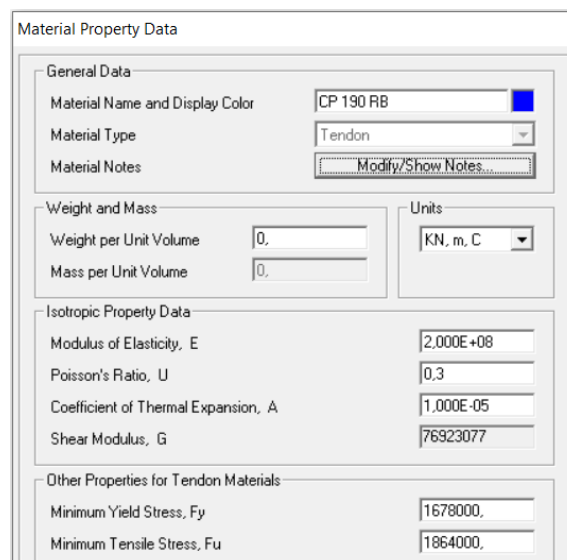
A resistência à tração da armadura ativa ( $f_{ptk}$ ) foi calculada considerando 1 kgf/mm<sup>2</sup> igual a 9,81 MPa, tal que:

$$f_{ptk} = 190 \times 9,81 = 1864 \text{ MPa} \quad (2)$$

Conforme prescrito na ABNT NBR 6118: 2014, a tensão de escoamento da armadura de protensão ( $f_{pyk}$ ) é igual a:

$$f_{pyk} = 0,9 \times 1864 = 1678 \text{ MPa} \quad (3)$$

A Figura 6 apresenta os dados de entrada.



The screenshot shows the 'Material Property Data' dialog box. The 'General Data' section includes 'Material Name and Display Color' (CP 190 RB with a blue swatch), 'Material Type' (Tendon), and 'Material Notes' (Modify/Show Notes...). The 'Weight and Mass' section has 'Weight per Unit Volume' and 'Mass per Unit Volume' both set to 0. The 'Units' dropdown is set to 'KN, m, C'. The 'Isotropic Property Data' section contains: 'Modulus of Elasticity, E' (2.000E+08), 'Poisson's Ratio, U' (0.3), 'Coefficient of Thermal Expansion, A' (1.000E-05), and 'Shear Modulus, G' (76923077). The 'Other Properties for Tendon Materials' section includes: 'Minimum Yield Stress, Fy' (1678000) and 'Minimum Tensile Stress, Fu' (1864000).

**Figura 6 – Definição das propriedades do aço da armadura ativa – SAP 2000**

## 4.2. Definição das seções transversais

### 4.2.1. Placa de concreto

A Figura 7, extraída do SAP 2000, apresenta as definições das propriedades da seção da placa de concreto de 20 cm de espessura.

Shell Section Data

Section Name: LAJE 20

Section Notes: Modify/Show...

Display Color:

Type:

- Shell - Thin
- Shell - Thick
- Plate - Thin
- Plate Thick
- Membrane
- Shell - Layered/Nonlinear

Modify/Show Layer Definition...

Material:

Material Name: + fck 35

Material Angle: 0.

Thickness:

Membrane: 0,2

Bending: 0,2

Figura 7 – Definição da seção transversal da placa de concreto – SAP 2000

### 4.2.2. Cabos de protensão

Segundo a ABNT NBR 6118:2014, a área da cordoalha de sete fios de diâmetro nominal de 12,7 mm é igual a 98,6 mm<sup>2</sup>. A Figura 8, extraída do SAP 2000, apresenta as definições das propriedades da seção transversal dos cabos de protensão (modelados como elementos), considerando duas cordoalhas por cabo.

Tendon Section Data

Tendon Section Name: CP 7 FIOS

Section Notes: Modify/Show...

Tendon Modeling Options For Analysis Model:

- Model Tendon as Loads
- Model Tendon as Elements

Tendon Parameters:

Prestress Type: Prestress

Material Property: + CP 190 RB

Tendon Properties:

- Specify Tendon Diameter: 0,0158
- Specify Tendon Area: 1,972E-04
- Torsional Constant: 6,189E-09
- Moment of Inertia: 3,095E-09
- Shear Area: 1,775E-04

Units: KN, m, C

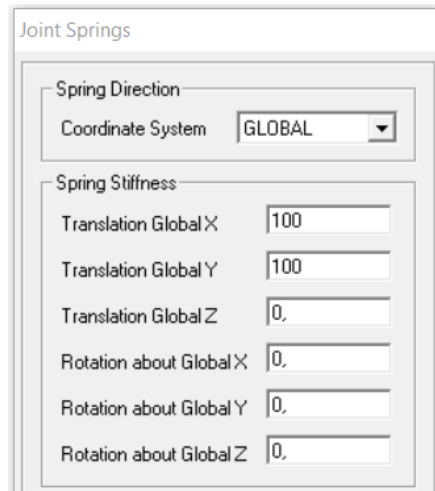
Display Color:

Figura 8 – Definição da seção transversal dos cabos de protensão – SAP 2000

### 4.3. Modelagem geométrica

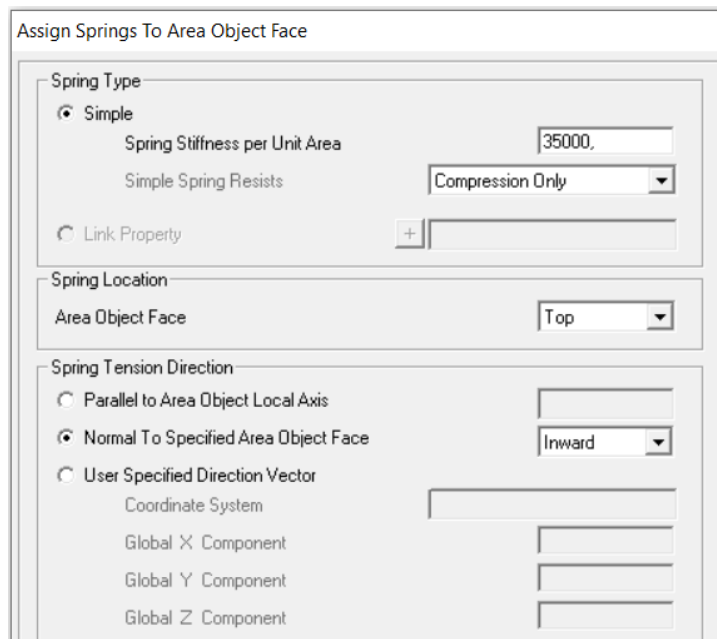
Para a modelagem da placa de concreto, foram utilizados elementos de placa quadrangulares de 50 cm x 50 cm.

Foram utilizadas molas de baixa rigidez nos nós dos quatro cantos do pavimento para a restrição dos movimentos horizontais (x e y são eixos no plano da placa). A Figura 9 apresenta as definições das propriedades destas molas.



**Figura 9 – Definição das propriedades das molas de restrição dos movimentos horizontais – SAP 2000 (unidades em kN/m<sup>3</sup>)**

Seguindo o Modelo de Winkler, foram definidas molas distribuídas por toda área do pavimento com coeficiente de reação vertical do solo igual a 35 MPa/m (35000 kPa/m), conforme apresentado na Figura 10. As molas, fisicamente, trabalham exclusivamente à compressão. Deve-se atentar, porém, que essa função só é processada quando se processa a análise não-linear do modelo computacional.



**Figura 10 – Definição das propriedades das molas de suporte do pavimento – SAP 2000**

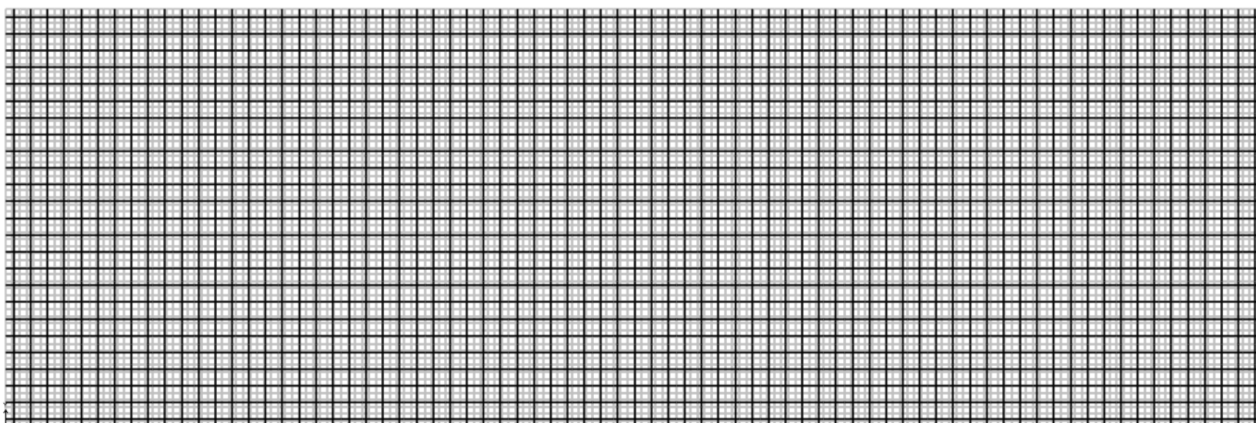
A Figura 11 apresenta a definição do *load case* para a análise não-linear do carregamento.

Load Case Data - Nonlinear Static

Load Case Name CARREG POS	Notes Modify/Show...	Load Case Type Static									
Initial Conditions <input checked="" type="radio"/> Zero Initial Conditions - Start from Unstressed State <input type="radio"/> Continue from State at End of Nonlinear Case	Analysis Type <input type="radio"/> Linear <input checked="" type="radio"/> Nonlinear <input type="radio"/> Nonlinear Staged Construction	Geometric Nonlinearity Parameters <input checked="" type="radio"/> None <input type="radio"/> P-Delta <input type="radio"/> P-Delta plus Large Displacements									
Modal Load Case All Modal Loads Applied Use Modes from Case	Mass Source Previous										
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Load Type</th> <th>Load Name</th> <th>Scale Factor</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Load Pattern</td> <td>CARREG PC</td> <td>1.</td> </tr> <tr> <td>Load Pattern</td> <td>CARREG POS</td> <td>1.</td> </tr> </tbody> </table>	Load Type	Load Name	Scale Factor	Load Pattern	CARREG PC	1.	Load Pattern	CARREG POS	1.	Add Modify Delete	
Load Type	Load Name	Scale Factor									
Load Pattern	CARREG PC	1.									
Load Pattern	CARREG POS	1.									
Other Parameters Load Application: Full Load Results Saved: Final State Only Nonlinear Parameters: Default		OK Cancel									

**Figura 11 – Definição da análise não-linear do carregamento – SAP 2000**

Os cabos de protensão foram modelados retilíneos e dispostos nas duas direções, posicionados à meia-altura da espessura do pavimento. A Figura 12 apresenta a vista superior do pavimento com os cabos de protensão representados pelas linhas pretas e os elementos finitos em escalas de cinza ao fundo.



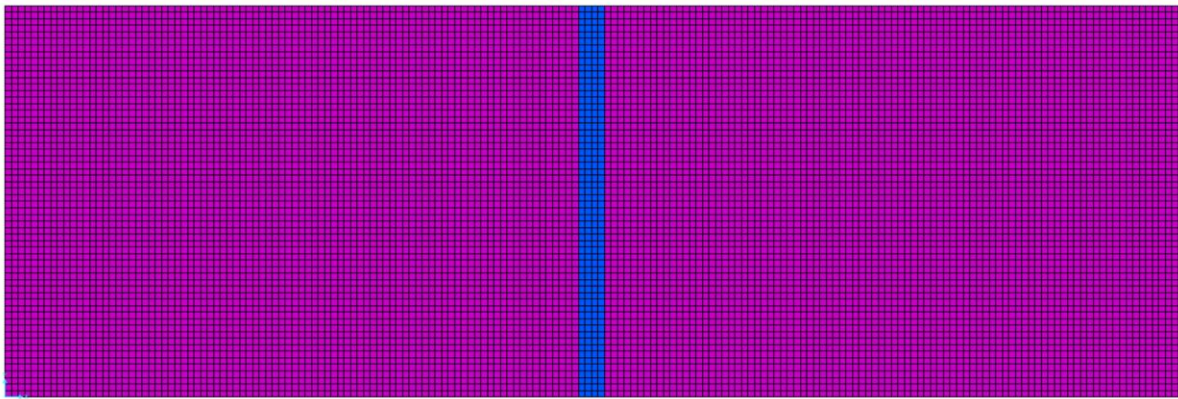
**Figura 12 – Vista superior do modelo do pavimento – SAP 2000**

## 4.4. Carregamentos

### 4.4.1. Sobrecarga

A Figura 12 ilustra a faixa de carga de  $50 \text{ kN/m}^2$  aplicada sobre o piso do modelo computacional para a determinação do momento fletor positivo máximo.





**Figura 12 – Sobrecarga acidental aplicada com largura de faixa crítica – SAP 2000**

#### 4.4.2. Protensão

O SAP 2000 permite que, para cada cabo modelado, seja definida a tensão de protensão inicial e os parâmetros de perdas imediatas e lentas. Os cabos longitudinais foram protendidos nas duas extremidades (ancoragens ativa-ativa) e os cabos transversais foram protendidos somente em uma das extremidades (ancoragens ativa-passiva), alternando as extremidades de protensão.

Para a protensão inicial, seguiram-se as orientações da ACI 318-19. A norma americana limita a carga de protensão inicial ( $\sigma_{pi}$ ) a  $0,94 f_{pyk}$ , não ultrapassando  $0,80 f_{ptk}$ , tal que:

$$\begin{aligned}\sigma_{pi} &= 0,94 \times 1678 \leq 0,80 \times 1864 \\ \sigma_{pi} &= 1577 \text{ MPa} \leq 1491 \text{ MPa} \\ \sigma_{pi} &= 1491 \text{ MPa}\end{aligned}$$

Para fins de simplificação, a ACI 423-96, em seu item 3.5, permite adotar 105 MPa de perdas lentas nos cabos de protensão.

A Figura 13, extraída do SAP 2000, apresenta as definições dos dados de protensão inicial, os parâmetros para cálculo das perdas imediatas e o valor das perdas lentas estimadas pela ACI 423-96.

Tendon Load Assignment Data For Line Object 1

Tabular Data	
Load Pattern	PROTENSÃO
Load Type	Stress
Jack From This Location	Both Ends
Tendon End Force (KN)	
Tendon End Stress (KN/m2)	1491000,
Curvature Coefficient (Unitless)	0,07
Wobble Coefficient (1/m)	3,000E-03
Anchorage Set Slip (m)	6,000E-03
Loss - Elastic Shortening Stress (KN/m2)	105000,
Loss - Creep Stress (KN/m2)	0,
Loss - Shrinkage Stress (KN/m2)	0,
Loss - Steel Relaxation Stress (KN/m2)	0,

Units  
KN, m, C

**Note:**  
This tendon is modeled using elements. The elastic, creep, shrinkage, and relaxation loss items apply in addition to the losses computed by analysis.

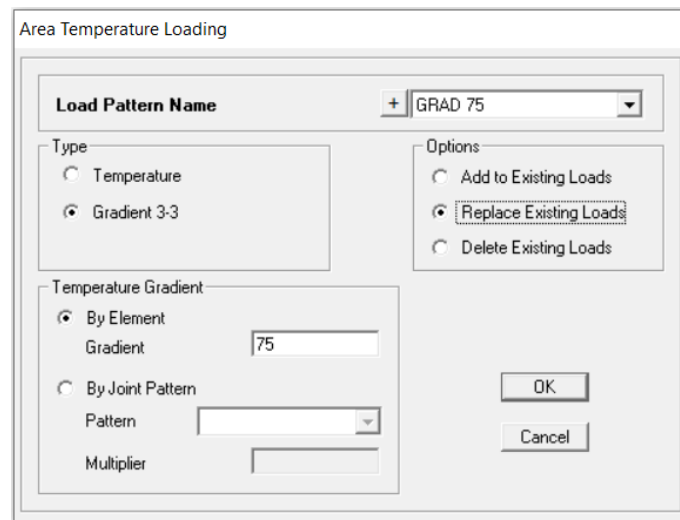
Show Prestress Losses

Done

**Figura 13 – Definição dos parâmetros de protensão – SAP 2000**

#### 4.4.3. Gradiente térmico

A Figura 14, extraída do SAP 2000, apresenta as definições dos dados do gradiente térmico, igual a 75 °C/m. O gradiente foi considerado linear, uma vez que é o caso mais crítico para os diferenciais térmicos positivos (BARBOSA, 2023).



**Figura 14 – Definição do gradiente térmico – SAP 2000**

## 5. Conclusão

O piso industrial é um tipo de estrutura com muitas características particulares que necessita de diretrizes de projeto e de execução próprias. Com o objetivo de auxiliar a modelagem deste tipo de estrutura, foram detalhados os passos a serem seguidos no *software* SAP 2000 para que a análise e o dimensionamento do pavimento sejam feitos baseados em resultados acurados e compatíveis com o seu real comportamento.

O uso do modelo computacional simplificado como elemento auxiliar no processo de construção do modelo final é fundamental para assegurar a correta simulação. A partir de modelos simplificados, cujos resultados numéricos podem ser facilmente comparados com os valores obtidos de métodos de cálculos já conhecidos, é possível garantir a calibração de modelos computacionais complexos.

## Referências

- ABREU, Fernanda Barreto Carreiro de, 2021, *Pré-dimensionamento de pisos industriais em concreto armado e protendido*. Projeto de graduação, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 1996, *ACI 423 – Recommendations for Concrete Members Prestressed with Unbounded Tendons*, Detroit.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 2019, *ACI 318 – Building Code Requirements for Structural Concrete*, Detroit.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014, *NBR 6118: Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento*. Elaboração, Rio de Janeiro.
- BALBO, J. T. e SEVERI, A. A., 2002, *Thermal Gradients in Concrete Pavements in Tropical Environment: Experimental Appraisal*. Transportation Research Record, Vol. 1809.
- BARBOSA, Danielle Monteiro Alves, 2023, *Estudo dos efeitos térmicos no comportamento estrutural de pisos industriais*. Projeto de graduação, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- COMPUTERS AND STRUCTURES INC, 2013, *SAP 2000 - Integrated Software for Structural Analysis and Design*. Version 16, USA.
- RODRIGUES, Púlio Penna Firme, 2010, *Manual de pisos industriais: fibras de aço e protendido*. São Paulo: Pini.