



RODOANEL METROPOLITANO
DE BELO HORIZONTE

Projeto de Modelagem do Processo para Concessão do Rodoanel da Região Metropolitana de BH

DIMENSIONAMENTO DO PAVIMENTO

Resumo

Este documento contém os Dimensionamentos do Pavimento para a Alça Sul do Projeto de Modelagem do Processo para Concessão do Rodoanel da Região Metropolitana de Belo Horizonte, a ser desenvolvido pela Secretaria de Estado de Infraestrutura e Mobilidade do Governo do Estado de Minas Gerais, em parceria com o Movimento Brasil Competitivo e a Accenture.

Julho, 2021

ÍNDICE

1.	PROJETO DE PAVIMENTAÇÃO - INTRODUÇÃO	2
1.1.	Parâmetros de Tráfego	3
1.2.	Projeção do Volume Médio Diário Anual (VMDA)	4
1.3.	Classificação e Carregamento da Frota	4
1.4.	Cálculo Número “N”	5
2.	PARÂMETROS GEOTÉCNICOS	6
2.1.	Caracterização do Suporte do Subleito	6
3.	DIMENSIONAMENTO DO PAVIMENTO ASFÁLTICO	6
3.1.	Método do CBR	6
3.2.	Método Mecânico	8
3.2.1	Análise de Fadiga dos Materiais	9
3.3.	Estrutura Final	12
4.	DIMENSIONAMENTO DO PAVIMENTO DE CONCRETO (TÚNEL)	13
4.1.	Metodologia AASHTO-1993	13
4.1.1	Cálculo da espessura das placas	14
4.1.2	Detalhamento das Juntas, Armaduras e Barras	15
5.	ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DE REFERÊNCIA	20
6.	SEÇÕES TÍPICAS	21
	ANEXOS	22

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Alternativa AMDA	2
Figura 2 - Configuração do Eixo Simples Padrão de Rodas Duplas.....	11
Figura 3 - Pontos de Verificação	11
Figura 4 - Seção de Pavimento Proposto (Calculada Pelo Método do CBR e Verificada por Análise Mecanicista).....	13
Figura 5 - BH AMDA Sul – Pavimento de Concreto	19

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - VMDA Comerciais.....	4
Tabela 2 - Fatores de Carga	4
Tabela 3 - Fatores de Veículos - FV (USACE)	4
Tabela 4 - Fatores de Veículos - FV (AASHTO).....	5
Tabela 5 - Cálculo do Número "N" USACE	5
Tabela 6 - Cálculo do Número "N" AASHTO.....	5
Tabela 8 - Espessura para estabilização dosubleito	6
Tabela 9 - Espessura mínima de Revestimento.....	7
Tabela 10 - Verificação das camadas projetadas.....	8
Tabela 10 - Pontos de Verificação	11
Tabela 11 - Resultados da Análise Mecanística.....	12
Tabela 12 - Requisitos Mínimos para o Concreto	13
Tabela 13 - Número "N" para 20 Anos	14
Tabela 14 - Bitola, Comprimento e Espaçamento de Barras de Transferência	17
Tabela 15 - Especificações Técnicas.....	20

Para a proposição das estruturas de pavimento a serem implantadas serão analisados os seguintes parâmetros de cálculo:

- Dados de contagens volumétricas e número de solicitações oriundos do tráfego de categoria comercial;
- Capacidade de suporte do subleito através de resultados de ensaios de caracterização dos materiais de fundação existentes no local de implantação e;
- Características dos materiais disponíveis no local para emprego em camadas de pavimento.

Adiante serão analisados e definidos os parâmetros de tráfego e de suporte de subleito, bem como a definição das estruturas de pavimento a serem implantadas.

1.1. Parâmetros de Tráfego

O tráfego é considerado no dimensionamento de pavimentos através do conceito de equivalência de carga, onde se transformam todas as solicitações no número de passagens de um eixo padrão de 8,2 tf, também conhecido como número “N”. Essa transformação normalmente é feita através da aplicação do fator de veículo ao volume previsto para o período de projeto.

Para este estudo, utilizou-se o Cálculo do número “N” do Estudo de Tráfego e as Projeções de Demanda do Projeto de Modelagem do Processo para Concessão do Rodoanel da Região Metropolitana de Belo Horizonte.

O Estudo foi realizado referindo-se a diversos cenários e possibilidades os quais podem ser consultados na íntegra no documento citado anteriormente.

A determinação do número “N” foi realizada, tanto pelo método USACE quanto pelo método AASHTO, seguindo as recomendações do Manual de Estudos de Tráfego do DNIT (2006). O número “N” refere-se à quantidade de solicitações causada pelo tráfego de um eixo rodoviário padrão (8,2 t) ao longo do período de projeto no pavimento.

As metodologias para determinação do número “N” têm como fundamento os fatores de equivalência AASHTO ou USACE.

O fator de equivalência da AASHTO baseia-se na perda de serventia (PSI) e varia com o tipo do pavimento (flexível e rígido), índice de serventia terminal e resistência do pavimento (número estrutural – SN). Eles são diferentes dos obtidos pelo USACE, que avalia os efeitos do carregamento na deformação permanente (afundamento nas trilhas de roda).

Portanto, o dimensionamento do pavimento leva em consideração a metodologia USACE para a avaliação dos efeitos do carregamento no pavimento e a metodologia AASHTO para a avaliação dos efeitos da perda de serventia do pavimento.

1.2. Projeção do Volume Médio Diário Anual (VMDA)

A partir do modelo de transporte foi possível obter o VMDA dos trechos homogêneos (THs) do Rodoanel da RMBH, para cada cenário estudado. A tabela a seguir apresenta as projeções do volume diário de veículos pesados (ônibus e caminhões) de cada TH do trecho AMDA Sul ao longo de 10 anos, a partir do ano de abertura (2026).

TABELA 1 - VMDA COMERCIAIS

SUL	Trecho	Pass	2E	3E	5E	7E
	TH10-11	5.502	176	121	522	55
TH12	2.445	61	29	357	28	

Para dimensionamento do pavimento será utilizado o número N baseado no Trecho Homogêneo 12 que contribui diretamente com a alternativa estudada.

1.3. Classificação e Carregamento da Frota

O impacto sobre o pavimento de cada tipo-eixo é diferente. Por isso, o fator de carga (FC) é utilizado para converter qualquer classe/tipo de veículo em unidade de eixo padrão, correspondente à 8,2 t de carga. A tabela a seguir mostra os tipos de carga considerados nas duas metodologias.

TABELA 2 - FATORES DE CARGA

Tipo de Eixo		Fatores de Carga			
		USACE - flexível		AASHTO - flexível	
		Carregado	Vazio	Carregado	Vazio
simples (roda simples)	ESRS	0,278	0,017	0,327	0,016
simples (roda dupla)	ESRD	3,290	0,134	2,394	0,120
tandem duplo (roda dupla)	ETD	8,549	0,080	1,642	0,022
tandem triplo (roda dupla)	ETT	9,300	0,128	1,560	0,019

Ao final, os fatores de eixo por veículo são combinados para calcular os fatores de veículo (FV). Como mostrado na tabela a seguir.

TABELA 3 - FATORES DE VEÍCULOS - FV (USACE)

Classificação		Fatores de Veículos por Tipo de Veículo	
		USACE - flexível	
Classe	Tipo	Carregado	Vazio
Auto	Auto	0,00	0,00
Comercial 2	2C	3,57	0,15
Comercial 3	3C	8,83	0,10
Comercial 4	2S2	12,12	0,23

Projeto de Pavimento – Alça Sul
Data: 16/08/2021

Versão: 02

Comercial 5	2S3	12,87	0,28
Comercial 6	3S3	18,13	0,23
Comercial 7	3S2S2	25,92	0,26
Comercial 9	3S3S3	27,43	0,35

TABELA 4 - FATORES DE VEÍCULOS - FV (AASHTO)

Classificação		Fatores de Veículos por Tipo de Veículo	
		AASHTO - flexível	
Classe	Tipo	Carregado	Vazio
Auto	Auto	0,00	0,00
Comercial 2	2C	2,72	0,14
Comercial 3	3C	1,97	0,04
Comercial 4	2S2	4,36	0,16
Comercial 5	2S3	4,28	0,16
Comercial 6	3S3	3,53	0,06
Comercial 7	3S2S2	5,25	0,08
Comercial 9	3S3S3	5,09	0,08

1.4. Cálculo Número “N”

As tabelas a seguir apresentam a memória de cálculo do Número N pelo Método USACE e pelo método AASHTO, para a seção mais carregada.

TABELA 5 - CÁLCULO DO NÚMERO "N" USACE

Método USACE	TH	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2026 a 2035
	TH10-11	1,6E+06	1,7E+06	1,7E+06	1,8E+06	1,8E+06	1,9E+06	1,9E+06	2,0E+06	2,0E+06	2,1E+06	2,1E+06
TH12	8,8E+05	9,1E+05	9,3E+05	9,6E+05	9,8E+05	1,0E+06	1,0E+06	1,1E+06	1,1E+06	1,1E+06	1,1E+06	1,0E+07

TABELA 6 - CÁLCULO DO NÚMERO "N" AASHTO

Método AASHTO	TH	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2026 a 2035
	TH10-11	5,3E+05	5,5E+05	5,6E+05	5,8E+05	5,9E+05	6,1E+05	6,3E+05	6,5E+05	6,6E+05	6,8E+05	6,8E+05
TH12	2,9E+05	3,0E+05	3,1E+05	3,1E+05	3,2E+05	3,3E+05	3,4E+05	3,5E+05	3,6E+05	3,6E+05	3,7E+05	3,3E+06

2. PARÂMETROS GEOTÉCNICOS

2.1. Caracterização do Suporte do Subleito

A caracterização do suporte dos pavimentos asfálticos varia conforme a teoria aplicada no método de dimensionamento utilizado. Assim, quando se adota o Método do CBR, as camadas sob o revestimento são caracterizadas pelo CBR (*California Bearing Ratio*), ao passo que quando se utiliza um Método Mecânico, as camadas devem ser caracterizadas pelos seus respectivos coeficientes de Poisson e módulos de elasticidade.

Para a definição das condições de suporte do subleito do pavimento, foram utilizados dados de investigações estimativas conforme solos ocorrentes na região, onde os valores de CBR giram em torno de 6% e valores de expansão abaixo de 2%.

Nos locais onde os solos apresentarem características colapsíveis ou baixa capacidade de suporte (menores que o CBR de projeto = 6,0%), foi considerada a necessidade de substituição do solo por material com módulo elástico ≥ 922 MPa na profundidade conforme tabela a seguir.

TABELA 7 - ESPESSURA PARA ESTABILIZAÇÃO DO SUBLEITO

CBR (%)	E_{Subleito} (kgf/cm ²)	D_{Subleito} (cm)	Espessura de Estabilização calculada (cm)	Espessura de Estabilização adotada (cm)	$E_{\text{Estabilização}}$ (kgf/cm ²)	$D_{\text{Estabilizado}}$ (cm)	$E_{\text{Equivalente}}$ (kgf/cm ²)
2 ≤ CBR < 3	383	0,217	47	80	1500	0,087	952
3 ≤ CBR < 4	530	0,157	33	50	1500	0,089	932
4 ≤ CBR < 5	667	0,124	22	30	1500	0,089	928
5 ≤ CBR < 6	797	0,104	10	20	1500	0,086	968

3. DIMENSIONAMENTO DO PAVIMENTO ASFÁLTICO

3.1. Método do CBR

O Método do CBR fornece a estrutura de pavimento necessária para suportar o tráfego previsto durante o período de projeto (10 anos) e para as condições geotécnicas admitidas para o subleito (CBR_{min} de 6,0% e módulo de resiliência de $E = 922$ kgf/cm²) de modo a transmitir ao subleito tensões compatíveis com a capacidade de suporte e permitir o tráfego de veículos.

Com base nas definições dos parâmetros de tráfego e suporte de subleito, estabelecidas nos itens anteriores, definiram-se as espessuras equivalentes de camada granular, em

Projeto de Pavimento – Alça Sul
Data: 16/08/2021

Versão: 02

termos de suporte do subleito. Vale salientar que o método determina a espessura total da base e do revestimento (H₂₀), com capacidade de suporte igual a 20%, mesmo que o material apresente capacidade superior.

Para a definição da espessura mínima de revestimento a ser adotada em projeto, levou-se em consideração a Instrução de Projeto de Pavimentação do DNIT (IPR-719/2006) que recomenda para determinados intervalos de tráfego uma espessura de revestimento:

TABELA 8 - ESPESSURA MÍNIMA DE REVESTIMENTO

Faixa de Valores de N		Esp. Mínima de Revestimento Asfáltico	
	$N \leq$	1,0E+06	2,00 cm
1,0E+06	$<N \leq$	5,0E+06	5,00 cm
5,0E+06	$<N \leq$	1,0E+07	7,50 cm
1,0E+07	$<N \leq$	5,0E+07	10,00 cm
5,0E+07	$> N$		12,50 cm

- Dimensionamento

Sendo: $N_{USACE} = 1,0 \times 10^7$ e $CBR_p = 6,0\%$

É recomendável a utilização de estrutura de pavimento flexível em vias com tráfego inferior a $5,0 \times 10^7$. Para o revestimento asfáltico, a espessura aconselhada para tráfego dessa magnitude ($1,0 \times 10^7 < N \leq 5 \times 10^7$) é de no mínimo 10 cm (Adotado R = 10,0 cm) - CAUQ.

Espessura total (H_t) = $77,67 \times N^{0,0482} \times CBR^{-0,598}$

$$H_{SB} = 12,30 \text{ cm}$$

$$H_{SL} = 55,90 \text{ cm}$$

O método fixa ainda os valores de coeficientes de equivalência estrutural (k) para cada material componente da estrutura do pavimento. Dessa forma, os valores de coeficiente dos materiais a serem utilizados nesse empreendimento, são apresentados a seguir:

$$K_{REVEST} = 2,0$$

$$K_{BASE} = 1,0$$

$$K_{SUB-BASE} = 1,7$$

As espessuras de base e sub-base foram definidas a partir da resolução das seguintes inequações:

Projeto de Pavimento – Alça Sul**Data:** 16/08/2021**Versão:** 02

$$R.KR + B.KB \geq HSB$$

$$10,0 \times 2,0 + B \times 1,0 \geq 12,30$$

$$B_{\min} = -7,4 \text{ cm (Adotado } B = 12,0 \text{ cm) BGS (Faixa II)}$$

$$RKR + BKB + SB KSB \geq Hm$$

$$10,0 \times 2,0 + 12,0 \times 1,0 + SB \times 1,7 \geq 55,90$$

$$SB_{\min} = 16,00 \text{ cm (Adotado } SB = 20,0 \text{ cm) – BGTC (4,0 MPa < RCS aos 28 dias < 6,2 MPa e } 0,7 \text{ MPa > } f_{ct} > 1,0 \text{ Mpa).}$$

Onde:

R = espessura da camada de revestimento;

B = espessura da camada de base;

SB = espessura da camada de sub-base;

Hm = espessura total da camada de pavimento para proteger um material com CBR de projeto;

KR = coeficiente estrutural do revestimento, igual a 2,00;

KB = coeficiente estrutural da base igual a 1,00;

KSB = coeficiente estrutural da sub-base (camada cimentada) igual a 1,70;

Dos cálculos das inequações citadas anteriormente, resultou-se as seguintes estruturas de pavimento:

TABELA 9 - VERIFICAÇÃO DAS CAMADAS PROJETADAS

	Camadas	K	H _{ajustado}	Ref	H _{equiv}	H _{calculado}	Verif
Revestimento	CAUQ	2,0	10,0				
Base	BGS	1,0	12,0	H _B	32	> 13	∴ OK
Reforço	BGTC	1,7	20,0	H _{SL}	66	> 60	∴ OK
Subleito	6%						

Portanto, a estrutura de pavimentos propostas atendem, o dimensionamento segundo o Método do DNER (limitação de deformações permanentes e tensões que podem provocar ruptura por cisalhamento dos solos da base, reforço e subleito).

3.2. Método Mecânico

No desenvolvimento deste estudo, utilizou-se a teoria das camadas elásticas para o cálculo dos deslocamentos, das tensões e das deformações nas estruturas simuladas. Nesta tarefa fez-se uso do programa do ELSYM5 – “Elastic Layered System”, que aplica

o método das diferenças finitas no cálculo destes parâmetros, produzidos por um eixo de cargas em qualquer ponto da estrutura do pavimento.

A fadiga e a deformação são as condições fundamentais da avaliação estrutural de pavimentos, ditadas pela resistência dos materiais.

Procurou-se determinar diversos indicadores estruturais, representados pelas deformações verticais reversíveis (deflexões) na superfície (D), pelas deformações horizontais na face inferior do revestimento (ϵ_t), tensão de tração na fibra inferior da camada cimentada (σ_t) e pela deformação vertical no topo do subleito (ϵ_v).

A análise comparativa de desempenho das estruturas é feita através da verificação da compatibilidade entre esforços solicitantes (devidos à aplicação de cargas de tráfego) e os esforços resistentes, intrínsecos de cada material, traduzidos pelas equações de fadiga apresentadas no item a seguir.

3.2.1 Análise de Fadiga dos Materiais

Deformação Vertical Máxima Admissível na Superfície do Revestimento

Como critério comparativo utilizou-se, para este parâmetro, a equação tradicionalmente aceita pelo método DNER PRO-011/79:

$$\log D_{adm} = 3,01 - 0,176 \log N$$

Onde:

N = número de aplicações da carga (USACE);

D = deflexão na superfície (10^{-2} mm).

Fadiga quanto às deformações horizontais de tração das misturas betuminosas

As deformações horizontais de tração (ϵ_t) nas faces inferiores das camadas betuminosas, causadas pelos carregamentos na superfície dos pavimentos, se forem excessivas, poderão causar ruptura por fadiga dessas camadas. Desta forma, existe um número muito grande de procedimentos analíticos de projeto que consideram a deformação específica de tração na face inferior da camada betuminosa como o fator determinante da fadiga.

Para se estimar a fadiga da camada betuminosa, foi adotada a equação sugerida pela Federal Highway Administration - FHWA, que relaciona as deformações admissíveis na fibra inferior desta camada com o número de repetições da carga-padrão, como segue:

$$\epsilon_t = \left(\frac{N}{1,092 \times 10^{-6}} \right)^{\frac{-1}{3,512}}$$

Onde:

N = número de aplicações da carga (AASHTO);

ϵ_t = deformação horizontal de tração (10^{-4} mm/mm).

Critério de Ruptura por Fadiga na Camada Cimentada

Foi adotado o modelo preconizado (Heavy Vehicle Simulator) Africa do Sul Adaptado pela DERSA, para verificação do número admissível de repetições do eixo padrão em função da deformação horizontal de tração na fibra inferior da camada cimentada (σ_t).

$$N_{USACE} = 10^{8,71 - \left(3,17 \times \frac{\sigma_t adm.}{\sigma_r}\right)}$$

Fadiga quanto às deformações verticais de compressão no subleito

O critério de fadiga para deformações verticais de compressão do subleito é idêntico aos modelos adotados para a fadiga de misturas betuminosas e expresso por uma equação da seguinte forma (DORMON & METCALF, 1965):

$$N = 6,069 \times 10^{-10} \times (\epsilon_v)^{-4,762}$$

Onde:

N = número de aplicações da carga (USACE);

ϵ_v = deformação vertical (10^{-4} mm/mm).

Com a aplicação das equações acima relacionadas, para o número de solicitações de projeto, pode-se definir o valor admissível de cada indicador estrutural e, ao compará-los com os valores resultantes da análise mecânica, proceder à verificação da estrutura do pavimento.

Configuração do Eixo Padrão de 80kN

Como carregamento atuante sobre o pavimento foi considerado o eixo padrão rodoviário (eixo simples de rodas duplas) com 80 kN (8,2 t), representado por 4 cargas circulares de 20 kN (2,05 t) cada, com uma pressão de contato pneu-pavimento de 5,60 kgf/cm² (80 psi), resultando em área circular carregada com raio de 10,79 cm.

A configuração do eixo padrão rodoviário, com a locação das cargas, é representada a seguir.

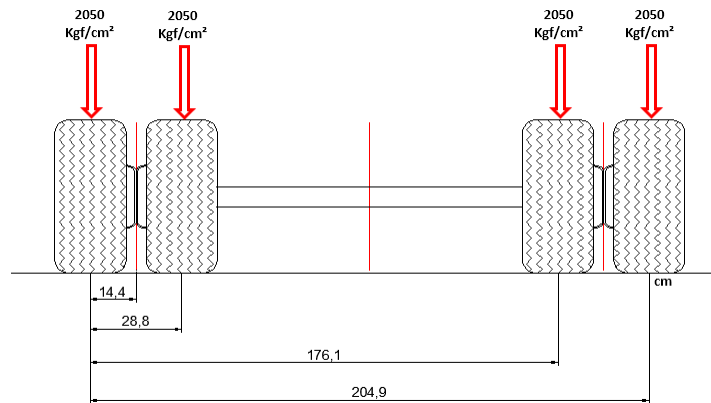


FIGURA 2 - CONFIGURAÇÃO DO EIXO SIMPLES PADRÃO DE RODAS DUPLAS

Os pontos de verificação das tensões, deformações e deslocamentos foram os seguintes:

TABELA 10 - PONTOS DE VERIFICAÇÃO

PONTOS DE VERIFICAÇÃO		
PONTO	X (cm)	Y (cm)
1	0,00	0,00
2	14,40	0,00

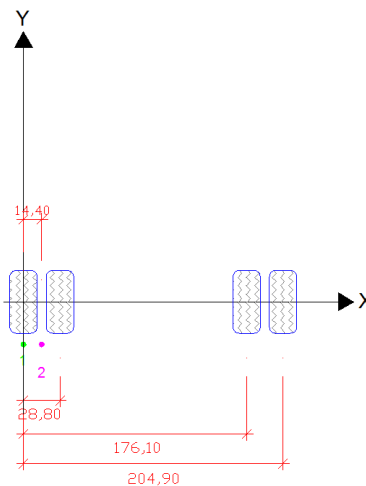


FIGURA 3 - PONTOS DE VERIFICAÇÃO

Resultados Obtidos pelo Método Mecânico

Apresentam-se a seguir as respostas calculadas nas estruturas de pavimento, através da aplicação do programa ELSYM5. Da comparação entre os valores atuantes,

resultantes do estudo mecânico, e dos valores admissíveis para cada parâmetro de análise pode-se garantir a verificação dos preceitos do dimensionamento.

TABELA 11 - RESULTADOS DA ANÁLISE MECANÍSTICA

Camada	MR (kgf/cm ²)	Esp. (cm)	Posição (cm)			Valores Atuantes				Valores Admissíveis				Aceito
			X	Y	Z	D	Et	Ev	σt	D	Et	Ev	σt	
						(10 ⁻² mm)	(10 ⁻⁴ cm/cm)	(10 ⁻⁴ cm/cm)	(MPa)	(10 ⁻² mm)	(10 ⁻⁴ cm/cm)	(10 ⁻⁴ cm/cm)	(MPa)	
CAUQ	35.000	10	14,4	0	0,01	32	-	-	-	56	-	-	-	SIM
			14,4	0	9,99	-	1,27	-	-	-	-	2,44	-	-
BGS	3.500	12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
BGTC	75.000	20	14,4	0	41,99	-	-	-	4,10	-	-	-	4,59	SIM
SUBLEITO	922	∞	14,4	0	42,01	-	-	1,39	-	-	-	3,47	-	SIM

3.3. Estrutura Final

A estrutura final do pavimento deve atender a todos os parâmetros expostos anteriormente de forma a garantir o bom desempenho do pavimento durante seu período de vida útil.

Conforme análise realizada mecanicista realizada, verifica-se que a seção estrutural calculada a partir do método do CBR atende de forma satisfatória aos parâmetros mínimos necessários.

Dessa forma, a seção típica calculada pelo método do CBR será adotada como proposta de pavimento a ser implantado para o período de projeto de 10 anos.

BH AMDA SUL – PAVIMENTO ASFÁLTICO	Esp (cm)
CAUQ	5
Imprimação Ligante	-
Binder	5
Imprimação Ligante	-
Imprimação Impermeabilizante	-
BGS	12
BGTC	20
Subleito CBR ≥ 6%	∞
Espessura Total	42

FIGURA 4 - Seção de Pavimento Proposto (Calculada Pelo Método do CBR e Verificada por Análise Mecanicista)

4. DIMENSIONAMENTO DO PAVIMENTO DE CONCRETO (TÚNEL)

Os métodos clássicos de dimensionamento de pavimentos rígidos baseiam-se na consideração das propriedades mecânicas do concreto (representadas pela resistência à tração na flexão), no suporte da fundação do pavimento (medido pelo coeficiente de recalque) e nas características do carregamento (dadas pela magnitude das cargas, sua posição crítica em relação à geometria das placas de concreto e o efeito do número de repetições de eixo durante o período de projeto).

Conforme análise o concreto utilizado no dimensionamento apresenta as mesmas características do empregado na implantação do pavimento, deve possuir módulo de ruptura a tração na flexão de 4,5 MPa, referente à idade de 28 dias. Deve possuir Módulo de Elasticidade igual ou superior a 28.000 MPa (conforme DNIT-048/2004-ES). Este material corretamente dosado deverá atender de forma satisfatória quanto ao seu desempenho, trabalhabilidade, impermeabilidade, durabilidade e resistência à abrasão.

Para a camada de sub-base de concreto compactado com rolo, o consumo deve ser de 120 kg de cimento por m³ de concreto. Deve apresentar resistência característica à compressão (fck) maior ou igual à 5,0 MPa aos 7 dias de idade (DNIT-056/2004-ES). Os requisitos mínimos para as camadas cimentadas são apresentados na tabela a seguir.

TABELA 12 - REQUISITOS MÍNIMOS PARA O CONCRETO

Camada	Descrição	Módulo de Resiliência (MPa)	Resistência a Tração na Flexão $f_{ctM,k}$ (MPa)
Placa	Concreto de Cimento Portland	28.000	4,5
Base	Concreto Compactado à Rolo (consumo de cimento 120 kg/cm ³)	15.000	1,5

4.1. Metodologia AASHTO-1993

Para dimensionamento do pavimento de concreto pelo método da AASTHO, foram adotadas as seguintes hipóteses:

Confiabilidade (R)

Em função da classe funcional do sistema viário em questão, foi adotado nível de confiabilidade igual a 85%.

Desvio padrão (So)

O desvio padrão representativo das condições locais foi adotado igual a 0,35.

Perda de serventia de projeto (Δ PSI)

Projeto de Pavimento – Alça Sul
Data: 16/08/2021

Versão: 02

Foram considerados índice de serventia inicial (Pi) igual a 4,5 e índice de serventia ao final do período de projeto (Pt) igual a 2,5.

Coeficiente de transferência de carga (J)

Para o valor de coeficiente de transferência de carga, foram considerados os seguintes parâmetros: sem acostamento, condição climática rigorosa, (J) igual a 2,9.

Coeficiente de drenagem (Cd)

Considerando que o local terá condições pluviométricas rigorosas, adotou-se coeficiente de drenagem igual a 1,0.

Para o valor de W18 será utilizado o N_{AASHTO} para 20 anos conforme tabela a seguir.

TABELA 13 - NÚMERO “N” PARA 20 ANOS

Ano	VMDA COMERCIAL	NUSACE ANUAL	NUSACE ACUMULADO	NAASHTO ANUAL	NAASHTO ACUMULADO
2026	474	8,8E+05	8,8E+05	2,9E+05	2,9E+05
2027	487	9,1E+05	1,8E+06	3,0E+05	5,9E+05
2028	500	9,3E+05	2,7E+06	3,1E+05	8,9E+05
2029	513	9,6E+05	3,7E+06	3,1E+05	1,2E+06
2030	527	9,8E+05	4,7E+06	3,2E+05	1,5E+06
2031	542	1,0E+06	5,7E+06	3,3E+05	1,9E+06
2032	557	1,0E+06	6,7E+06	3,4E+05	2,2E+06
2033	573	1,1E+06	7,8E+06	3,5E+05	2,6E+06
2034	589	1,1E+06	8,9E+06	3,6E+05	2,9E+06
2035	605	1,1E+06	1,0E+07	3,7E+05	3,3E+06
2036	622	1,2E+06	1,1E+07	3,8E+05	3,7E+06
2037	639	1,2E+06	1,2E+07	3,9E+05	4,1E+06
2038	657	1,2E+06	1,4E+07	4,0E+05	4,5E+06
2039	675	1,3E+06	1,5E+07	4,1E+05	4,9E+06
2040	694	1,3E+06	1,6E+07	4,2E+05	5,3E+06
2041	714	1,3E+06	1,7E+07	4,4E+05	5,7E+06
2042	733	1,4E+06	1,9E+07	4,5E+05	6,2E+06
2043	754	1,4E+06	2,0E+07	4,6E+05	6,6E+06
2044	775	1,4E+06	2,2E+07	4,7E+05	7,1E+06
2045	797	1,5E+06	2,3E+07	4,9E+05	7,6E+06

4.1.1 Cálculo da espessura das placas

Com os valores dos parâmetros adotados anteriormente, calculou-se a espessura necessária de pavimento rígido (D em polegadas) que atende ao tráfego solicitante, conforme a seguinte equação:

$$\log(W_{18}) = Zr \cdot So + 7,35 \log(D + 1) - 0,66 + \frac{\log\left(\frac{\Delta PSI}{3,0}\right)}{1 + \frac{1,624 \times 10^7}{(D + 1)^{8,46}}}$$

$$+ (4,22 - 0,32Pt) \log \left\{ \frac{Sc \cdot Cd (D^{0,75} - 1,132)}{215,63 \cdot J \cdot \left[D^{0,75} - \frac{18,42}{\left(\frac{Ec}{K}\right)^{0,25}} \right]} \right\}$$

Onde:

W18= Número de Solicitações Requeridas = $7,6 \times 10^6$;

ZR = Desvio-padrão correspondente ao Grau de Confiança (85%) = 1,037;

So= Desvio Padrão médio = 0,35;

D = Espessura da Placa (pol);

ΔPSI = Variação de serventia = $4,5 - 2,5 = 2,0$;

pt= serventia final = 2,5;

Sc = Módulo de Ruptura do Concreto = 4,5 MPa (652,7psi);

J = Coeficiente de Transferência de Carga = 2,9 (com barras de transferência);

Cd = Coeficiente de drenagem = 1,0;

Ec = Módulo de Elasticidade do Concreto = $4,06 \times 10^6$ psi;

k = Módulo de Reação = 120 MPa/m ou 441,6 pci;

Da resolução da equação, para o conjunto de dados citados, obtém-se uma espessura de placa de $D = 7,70$ polegadas, resultado em uma espessura final recomendada de 23 cm.

4.1.2 Detalhamento das Juntas, Armaduras e Barras

Os pavimentos de concreto estão sujeitos ao aparecimento de fissuras transversais e longitudinais, provocadas pelas variações volumétricas do concreto, principalmente durante a cura, e pela combinação dos efeitos de empenamento restringido e dos esforços solicitantes gerados pela ação do tráfego.

Tais fissurações precisam ser controladas, devendo evitar sua progressão ao longo dos anos, o que ocasionaria efeitos danosos à estrutura do pavimento.

O controle é executado lançando-se mão de dois dispositivos:

Projeto de Pavimento – Alça Sul**Data:** 16/08/2021**Versão:** 02

- Utilização de armadura distribuída, com a finalidade de manter fortemente unidas as faces das fissuras;
- Emprego de seções artificialmente enfraquecidas, induzindo a ocorrência de fissuras.

Para a execução das juntas, foi analisado o fenômeno de retração do concreto e as situações possíveis de posicionamento das rodas dos veículos. Assim, as juntas longitudinais serão dispostas de tal maneira que as solicitações nos cantos das placas sejam minimizadas.

Geometria das Placas e Juntas Transversais e Longitudinais

Por se tratar de uma estrutura constituída por placas de concreto assentadas sobre uma sub-base de concreto rolado (CCR), deve-se selecionar um valor para o espaçamento das juntas das placas de concreto de geometria regular entre 4 e 6 vezes o raio do módulo de rigidez relativo (stiffness), calculado a partir da equação proposta por Westergaard:

$$L = \left(\frac{Eh^3}{12(1 - \nu^2)K} \right)^{1/4}$$

Onde:

E = módulo de elasticidade do concreto;

h = espessura da placa, em polegadas (in);

ν = coeficiente de Poisson do concreto, usualmente;

K = módulo de reação do subleito, pci;

L = raio do módulo de rigidez relativo (stiffness), em polegadas (in).

Adotando-se os seguintes parâmetros:

E = 28.000 MPa (4,06 x 10⁶ PSI)

h = 23,0 cm = 9,06 in

ν = 0,20

k = 120 = 441,6 pci

Obtém-se:

L = 28 in = 70 cm

Considerando o espaçamento entre juntas 5 vezes o valor de L (70 cm), tem-se o comprimento das placas de 351 cm.

A largura da faixa onde serão implantadas as placas de concreto é de 3,50 m. De modo a manter placas com formato retangular será adotado para o comprimento das placas a relação 1/3, resultando em um comprimento aproximado de 5,00 m.

Projeto de Pavimento – Alça Sul**Data:** 16/08/2021**Versão:** 02

Portanto, as dimensões das placas de concreto de geometria regular deverão ser de 5,0 m de comprimento por 3,5 m de largura, uma vez que placas com este comprimento e espessura de 23 cm mostraram-se adequadas para o nível de solicitações e período de projeto determinados.

Nos casos em que as placas possuírem configurações irregulares, deve-se tomar o cuidado de evitar cantos de placas formando ângulos agudos, além de utilizar armadura distribuída.

Para as juntas transversais de retração, serão previstas barras de transferência, que têm a função de permitir a transferência de carga entre duas placas consecutivas. Seu dimensionamento obedece ao mesmo tempo a estudos teóricos e a experiências específicas sobre seu comportamento sob a ação de cargas repetidas.

O dimensionamento das barras de transferência é efetuado em função da espessura da placa de concreto.

As bitolas, os comprimentos e espaçamentos dessas barras são fornecidos no Estudo Técnico nº13 - "Projeto de Juntas em Pavimentos Rodoviários de Concreto" da Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP.

TABELA 14 - BITOLA, COMPRIMENTO E ESPAÇAMENTO DE BARRAS DE TRANSFERÊNCIA

Espessura da Placa (mm)	Diâmetro da Barra (mm)	Comprimento (mm)	Espaçamento (mm)
< 200	20	400	300
200 - 250	25	460	300
> 250	32	460	300

Para placas com espessura de 23 cm recomenda-se a utilização de barras de transferência no eixo do viário com as seguintes características:

- Aço: CA-25;
- Comprimento: 46 cm;
- Diâmetro: \varnothing 25 mm;
- Espaçamento entre barras: 30 cm

O dimensionamento da seção de aço necessária para se garantir a ligação entre placas é feito considerando que a camada subjacente ofereça restrição à movimentação desta no plano horizontal, seja por empenamento ou retração, conforme equação apresentada a seguir:

$$A_s = \frac{b \times f \times \gamma_c \times h}{100 \times S}$$

Onde:

Projeto de Pavimento – Alça Sul**Data:** 16/08/2021**Versão:** 02

As = área de aço necessária por metro de comprimento da junta considerada, cm²/m;

f = coeficiente de atrito placa / sub-base (geralmente tomado como 1,5);

b = distância entre a junta considerada e a junta ou borda livre mais próxima dela = 3,80 m;

h = espessura da placa = 0,23 m;

γc = peso específico do concreto = 24.000 N/m³;

S = tensão admissível no aço, em geral 2/3 da tensão de escoamento do aço $\frac{500 \times 2}{3}$ MPa.

A área da seção de aço necessária para cada barra de ligação é 0,69 cm²/m

Portanto será adotada a bitola Ø de 12,5 mm, com área de 1,23 cm²/m

O comprimento da barra de ligação, para assegurar a necessária aderência ao concreto, considerando uma tensão máxima de aderência aço-concreto de 2,45 MPa, é dado pela seguinte equação:

$$L_b = \frac{1}{2} \left(\frac{S \times d}{\tau_b} \right) + 7,5$$

Onde:

Lb = comprimento da barra de ligação (cm);

S = tensão admissível no aço, em geral 2/3 da tensão de escoamento do aço (MPa);

d = diâmetro da barra de ligação = 1,25 cm;

tb = tensão de aderência entre o aço e o concreto (em geral tomado como 2,45 MPa);

7,5 = margem para prever possível descentralização da barra (cm).

Obtendo-se o comprimento da barra de ligação = 66,64 cm. Portanto será adotado o comprimento de 80 cm para as barras de ligação.

Através da resolução das equações (As e Lb), obtêm-se as dimensões e espaçamento para as barras de ligação:

- Aço: CA-50;
- Bitola: ø 12,5 mm;
- Comprimento da barra: 80,0 cm;
- Espaçamento entre barras: 50 cm.

Armadura Distribuída Descontínua para Placas Irregulares

No caso de placas com dimensões irregulares há necessidade de uso de armadura descontínua distribuída, com a finalidade de manter fortemente unidas as faces das fissuras.

Projeto de Pavimento – Alça Sul
Data: 16/08/2021

Versão: 02

A área mínima de aço necessária para as armaduras distribuídas é dada pela expressão:

$$A_s = \frac{f \times L \times e \times \gamma_c}{200 \times S}$$

Onde:

As = área de aço necessária por metro de comprimento da junta considerada, cm²/m;

b = distância entre a junta considerada e a junta ou borda livre mais próxima dela, m;

f = coeficiente de resistência entre a placa e o subleito ou sub-base, geralmente tomado como 1,5;

γc = peso específico do concreto, igual a 24000N/m³;

h = espessura de placa, m;

S = tensão admissível no aço, em geral 2/3 da tensão de escoamento, MPa.

O valor resultante com a aplicação da equação é 0,69 cm²/m, porém de forma a otimizar a solução deverá ser utilizada tela soldada de malha quadrada do tipo Q-196 (Aço CA-60) posicionada 5,0 cm abaixo da superfície acabada.

Características da Tela Soldada Tipo Q-196 (Aço CA-60):

- Espaçamento entre fios, longitudinal e transversal: 10,0 cm;
- Diâmetro dos fios, longitudinal e transversal: 5,0 mm;
- Seção dos fios, longitudinal e transversal: 1,96 cm²/m;
- Peso: 3,11 kgf/m².

BH AMDA SUL – PAVIMENTO DE CONCRETO	Esp (cm)
CCP	23
LONA PLÁSTICA	-
CCR	10
BGS	10
K = 120 MPa/m	∞
Espessura Total	43

FIGURA 5 - BH AMDA SUL – PAVIMENTO DE CONCRETO

5. ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DE REFERÊNCIA

Os pavimentos sugeridos foram dimensionados para atingir a vida útil de projeto, mantendo suas condições estruturais e funcionais dentro de padrões aceitáveis.

Os quadros a seguir apresentam as estruturas de pavimentos adotadas para o projeto executivo de pavimentação a serem implantados no trecho Sul do Rodoanel de BH.

TABELA 15 - ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS

MATERIAL	SIGLA	ESPECIFICAÇÃO
Concreto Asfáltico	CAUQ	DNIT 031/2006- ES
Pintura de ligação com ligante asfáltico convencional	-	DNIT 145/2012-ES
Imprimação com ligante asfáltico convencional	-	DNIT 144/2014-ES
Base estabilizada granulometricamente	BGS	DNIT 141/2010-ES
Brita graduada tratada com cimento	BGTC	DER/SP ET-DE-P00/009
Execução de pavimento rígido com equipamento de fôrma-trilho	CCP	DNIT 048/2004- ES
Sub-base de cimento de concreto Portland compactada com rolo	CCR	DNIT 056/2013- ES
Regularização do subleito	SL	DNIT 137/2010-ES



**MINAS
GERAIS**

GOVERNO
DIFERENTE.
ESTADO
EFICIENTE.

accentureconsulting

Projeto de Pavimento – Alça Sul

Data: 16/08/2021

Versão: 02

6. SEÇÕES TÍPICAS



**RODOANEL
METROPOLITANO**
DE BELO HORIZONTE

Projeto de Modelagem do Processo para Concessão do
Rodoanel da Região Metropolitana de BH



**MINAS
GERAIS**

GOVERNO
DIFERENTE.
ESTADO
EFICIENTE.

accentureconsulting

Projeto de Pavimento – Alça Sul

Data: 16/08/2021

Versão: 02

ANEXOS



**RODOANEL
METROPOLITANO**
DE BELO HORIZONTE

Projeto de Modelagem do Processo para Concessão do
Rodoanel da Região Metropolitana de BH

Projeto de Pavimento – Alça Sul**Data:** 16/08/2021**Versão:** 02

ANÁLISE MECANÍSTICA

* * * SISTEMA ELASTICO 6 -

CAMADA	MODULO DE ELASTIC. (KGF/CM2)	COEF. DE POISSON	ESPESSURA (CM)
1	35000.	.300	10.000
2	3500.	.350	12.000
3	75000.	.200	20.000
4	922.	.400	SEMI-INFINITO

FOUR CARGA(S), CADA CARGA NA SEQUENCIA

VALOR DAS CARGAS..... 2050.00 KGF
PRESSAO DE CONTATO..... 5.60 KGF/CM2
RAIO DE CONTATO..... 10.79 CM

DISPOSICAO

CARGA	X (CM)	Y (CM)
1	.000	.000
2	28.800	.000
3	176.100	.000
4	204.900	.000

RESULTADOS REQUISITADOS PARA DISP. DE SISTEMAS

PROF. (S) - (CM)
Z= .01 9.99 41.99 42.01
PONTO(S) X-Y - (CM)
X= .00 14.40
Y= .00 .00

1 ELSYM5 3/72 - 3, SISTEMA ELASTICO DE CAMADAS DE UMA A DEZ
CARGAS NORMAIS CIRCULARES UNIFORMES IDENTICAS
----- ADAPTADO EM FEV./88 - PLANSERVI - SP -
SETOR DE COMPUTACAO

* * * SISTEMA ELASTICO 6 -

Z= .01 CAMADA NO. 1
X= .00 14.40
Y= .00 .00
TENSOES NORMAIS
SXX -8.47 -.52
SYY -10.10 -6.09
SZZ -5.62 -.09
TENSOES DE CISALHAMENTO
SXY .0000E+00 .0000E+00

Projeto de Pavimento – Alça Sul

Data: 16/08/2021

Versão: 02

```
SXZ .3250E-03 .1463E-04
SYZ .0000E+00 .0000E+00
TENSOES PRINCIPAIS
PS 1 -5.62 -.09
PS 2 -8.47 -.52
PS 3 -10.10 -6.09
TENSAO PRINCIPAL DE CIS.
PSS1 .2240E+01 .2998E+01
PSS2 .1424E+01 .2144E+00
PSS3 .8157E+00 .2783E+01
DESLOCAMENTOS
UX .1706E-02 .9681E-03
UY .0000E+00 .0000E+00
UZ .3336E-01 .3280E-01
DEF.ESPECIFICAS NORMAIS
EXX -.1072E-03 .3810E-04
EYY -.1678E-03 -.1687E-03
EZZ -.1436E-05 .5402E-04
DEF.ESP.DE CISALHAMENTO
EXY .0000E+00 .0000E+00
EXZ .2415E-07 .1087E-08
EYZ .0000E+00 .0000E+00
DEF.ESP.PRINCIPAIS
PE 1 -.1436E-05 .5402E-04
PE 2 -.1072E-03 .3810E-04
PE 3 -.1678E-03 -.1687E-03
DEF.ESP.PRINCIP.DE CIS.
PSE1 .1664E-03 .2227E-03
PSE2 .1058E-03 .1593E-04
PSE3 .6060E-04 .2068E-03
1 ELSYM5 3/72 - 3, SISTEMA ELASTICO DE CAMADAS DE UMA A DEZ
CARGAS NORMAIS CIRCULARES UNIFORMES IDENTICAS
----- ADAPTADO EM FEV./88 - PLANSERVI - SP -
SETOR DE COMPUTACAO
```

* * * SISTEMA ELASTICO 6 -

```
Z= 9.99 CAMADA NO. 1
X= .00 14.40
Y= .00 .00
TENSOES NORMAIS
SXX 4.29 -.99
SYY 5.63 4.01
SZZ -2.44 -2.08
TENSOES DE CISALHAMENTO
SXY .0000E+00 .0000E+00
SXZ .1265E+00 .1876E-01
SYZ .0000E+00 .0000E+00
TENSOES PRINCIPAIS
PS 1 5.63 4.01
PS 2 4.29 -.99
PS 3 -2.44 -2.08
TENSAO PRINCIPAL DE CIS.
```

Projeto de Pavimento – Alça Sul**Data:** 16/08/2021**Versão:** 02

```
PSS1 .4035E+01 .3041E+01
PSS2 .6682E+00 .2497E+01
PSS3 .3367E+01 .5438E+00
DESLOCAMENTOS
UX .1554E-03 .5652E-03
UY .0000E+00 .0000E+00
UZ .3250E-01 .3271E-01
DEF.ESPECIFICAS NORMAIS
EXX .9522E-04 -.4479E-04
EYY .1449E-03 .1407E-03
EZZ -.1547E-03 -.8517E-04
DEF.ESP.DE CISALHAMENTO
EXY .0000E+00 .0000E+00
EXZ .9395E-05 .1393E-05
EYZ .0000E+00 .0000E+00
DEF.ESP.PRINCIPAIS
PE 1 .1449E-03 .1407E-03
PE 2 .9531E-04 -.4478E-04
PE 3 -.1548E-03 -.8518E-04
DEF.ESP.PRINCIP.DE CIS.
PSE1 .2997E-03 .2259E-03
PSE2 .4963E-04 .1855E-03
PSE3 .2501E-03 .4040E-04
1 ELSYM5 3/72 - 3, SISTEMA ELASTICO DE CAMADAS DE UMA A DEZ
CARGAS NORMAIS CIRCULARES UNIFORMES IDENTICAS
----- ADAPTADO EM FEV./88 - PLANSERVI - SP -
SETOR DE COMPUTACAO
```

* * * SISTEMA ELASTICO 6 -

```
Z= 41.99 CAMADA NO. 3
X= .00 14.40
Y= .00 .00
TENSOES NORMAIS
SXX 3.12 3.52
SYY 4.15 4.45
SZZ -.17 -.18
TENSOES DE CISALHAMENTO
SXY .0000E+00 .0000E+00
SXZ .2327E-01 .6318E-02
SYZ .0000E+00 .0000E+00
TENSOES PRINCIPAIS
PS 1 4.15 4.45
PS 2 3.12 3.52
PS 3 -.17 -.18
TENSÃO PRINCIPAL DE CIS.
PSS1 .2162E+01 .2317E+01
PSS2 .5165E+00 .4657E+00
PSS3 .1645E+01 .1851E+01
DESLOCAMENTOS
UX -.1064E-02 -.5623E-03
UY .0000E+00 .0000E+00
UZ .2718E-01 .2789E-01
```

Projeto de Pavimento – Alça Sul**Data:** 16/08/2021**Versão:** 02

```
DEF.ESPECIFICAS NORMAIS
EXX .3097E-04 .3557E-04
EYY .4750E-04 .5047E-04
EZZ -.2168E-04 -.2368E-04
DEF.ESP.DE CISALHAMENTO
EXY .0000E+00 .0000E+00
EXZ .7447E-06 .2022E-06
EYZ .0000E+00 .0000E+00
DEF.ESP.PRINCIPAIS
PE 1 .4750E-04 .5047E-04
PE 2 .3097E-04 .3557E-04
PE 3 -.2168E-04 -.2368E-04
DEF.ESP.PRINCIP.DE CIS.
PSE1 .6918E-04 .7415E-04
PSE2 .1653E-04 .1490E-04
PSE3 .5265E-04 .5924E-04
1 ELSYM5 3/72 - 3, SISTEMA ELASTICO DE CAMADAS DE UMA A DEZ
CARGAS NORMAIS CIRCULARES UNIFORMES IDENTICAS
----- ADAPTADO EM FEV./88 - PLANSERVI - SP -
SETOR DE COMPUTACAO
```

* * * SISTEMA ELASTICO 6 -

```
Z= 42.01 CAMADA NO. 4
X= .00 14.40
Y= .00 .00
TENSOES NORMAIS
SXX -.06 -.06
SYY -.05 -.05
SZZ -.17 -.18
TENSOES DE CISALHAMENTO
SXY .0000E+00 .0000E+00
SXZ .2244E-01 .6309E-02
SYZ .0000E+00 .0000E+00
TENSOES PRINCIPAIS
PS 1 -.05 -.05
PS 2 -.06 -.06
PS 3 -.18 -.18
TENSAO PRINCIPAL DE CIS.
PSS1 .6363E-01 .6578E-01
PSS2 .3285E-02 .4748E-02
PSS3 .6035E-01 .6103E-01
DESLOCAMENTOS
UX -.1065E-02 -.5629E-03
UY .0000E+00 .0000E+00
UZ .2717E-01 .2789E-01
DEF.ESPECIFICAS NORMAIS
EXX .3100E-04 .3560E-04
EYY .4755E-04 .5052E-04
EZZ -.1391E-03 -.1488E-03
DEF.ESP.DE CISALHAMENTO
EXY .0000E+00 .0000E+00
EXZ .6816E-04 .1916E-04
```



MINAS
GERAIS

GOVERNO
DIFERENTE.
ESTADO
EFICIENTE.

accentureconsulting

Projeto de Pavimento – Alça Sul

Data: 16/08/2021

Versão: 02

```
EYZ      .0000E+00  .0000E+00
DEF.ESP.PRINCIPAIS
PE 1     .4755E-04  .5052E-04
PE 2     .3757E-04  .3610E-04
PE 3     -.1457E-03 -.1492E-03
DEF.ESP.PRINCIP.DE CIS.
PSE1     .1932E-03  .1998E-03
PSE2     .9975E-05  .1442E-04
PSE3     .1833E-03  .1853E-03
1  ELSYM5 3/72 - 3, SISTEMA ELASTICO DE CAMADAS DE UMA A DEZ
CARGAS NORMAIS CIRCULARES UNIFORMES IDENTICAS
----- ADAPTADO EM FEV./88 - PLANSERVI - SP -
SETOR DE COMPUTACAO
```