

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE  
CURSO DE ENGENHARIA DE INFRAESTRUTURA

**PABLO DIEDRI KRENKEL COLOMBO**

**ANÁLISE ESTRUTURAL DA PONTE FERROVIÁRIA EM TRELIÇA METÁLICA  
DANIFICADA PELA OXIDAÇÃO NA FERROVIA TEREZA CRISTINA**

Joinville

2017

**PABLO DIEDRI KRENKEL COLOMBO**

**ANÁLISE ESTRUTURAL DA PONTE FERROVIÁRIA EM TRELIÇA METÁLICA  
DANIFICADA PELA OXIDAÇÃO NA FERROVIA TEREZA CRISTINA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Infraestrutura do Centro Tecnológico de Joinville da Universidade Federal de Santa Catarina, como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Infraestrutura.

Orientadora: Dra. Paula Manica Lazzari

Joinville

2017

**PABLO DIEDRI KRENKEL COLOMBO**

**ANÁLISE ESTRUTURAL DA PONTE FERROVIÁRIA EM TRELIÇA METÁLICA  
DANIFICADA PELA OXIDAÇÃO NA FERROVIA TEREZA CRISTINA**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Infraestrutura, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Joinville, 30 de junho de 2017.

---

Dra. Paula Manica Lazzari  
Orientadora

**Banca Examinadora:**

---

Eng. Anildo Mazuco Filho

---

Eng. Me. Bruna Manica Lazzari

---

Eng. Esp. Rafael Andrigheto

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço acima de tudo aos meus pais, Nalu e Brás, por sempre me apoiarem e ajuizarem minha cabeça, sem nunca me desestimularem, mas me mantendo no caminho certo.

Agradeço a minha avó por ser minha segunda mãe e por me amar, sempre questionando se o que faço é o mais oportuno.

Agradeço a minha namorada Laila por me inspirar e cuidar de mim nestes meses difíceis.

Agradeço à empresa FTC por abrir portas à minha curiosidade e permitir que eu crescesse como profissional e como pessoa, mas especialmente aos três senhores do Departamento de Via Permanente – Anildo, Joel e Rafael – por me ensinarem tudo o que sei sobre ferrovias.

Agradeço a minha orientadora por apoiar esta ideia maluca e acreditar no meu potencial, mesmo com um prazo tão apertado.

Agradeço a meus amigos pela parceria, em especial à Kira, ao Bacuri e ao Sequela por serem os melhores em Joinville e Florianópolis e também à Luise, por ter aberto meus horizontes e me mostrar que eu poderia ter um futuro diferente.

## RESUMO

Este trabalho versa sobre a ponte ferroviária treliçada no município de Içara, estado de Santa Catarina. As obras de arte especiais são de fundamental importância na malha viária de uma ferrovia e o estado de conservação que apresentam merece muita atenção. A ponte metálica em estudo, toda em aço ASTM-A36, é composta de duas treliças laterais, com par de longarinas centrais, transversinas e contraventamento. Em conjunto estes elementos sustentam e distribuem as cargas provenientes da via permanente e do comboio ferroviário para os encontros. A análise da estrutura da ponte foi realizada com base nos projetos originais e inspeções técnicas feitas no local. Com auxílio do programa SAP2000 lançaram-se os carregamentos tanto para a estrutura original como oxidada. As cargas permanentes e móveis foram introduzidas seguindo a normalização existente no Brasil. Logo após a análise, verificaram-se as tensões dos elementos, comparando-as com a tensão admissível do material. Ainda, foi analisada a flambagem nos casos onde a tensão de compressão se mostrou elevada. Conclui-se que a estrutura metálica está seriamente prejudicada devido à oxidação em diversos pontos das treliças laterais. Constatou-se, também, que, em virtude das aproximações consideradas no cálculo da perda de área causada pela oxidação, algumas tensões nos elementos apresentam valores próximos ao da tensão limite do aço.

**Palavras-chave:** *Software* SAP2000, análise estrutural, ponte ferroviária, estrutura metálica, oxidação.

## ABSTRACT

This essay is dedicated to the study of the railway bridge located in the city of Içara, in the state of Santa Catarina. The special work of art are fundamental to a railway's road network and its conservation state deserves a lot of attention. The studied metal bridge, that is all made of steel ASTM-A36, it is compounded of two lateral trusses, with a pair of central stringers, transverse, and bracing. Those elements combined sustain and distribute the charges coming from the permanent road and from the train to the encouters. The analysis of the bridge's structure was based on the original projects and technical inspections made at the local. Using SAP2000 software introduced the charges for the original structure and for the oxidized structure. The permanent and movable charges were introduced following the existent brazilian normalization. Soon after the analysis, the elements tensions were verified, comparing then to the material's admissible tension. Then, on cases where the tension of compression was high, the buckling was analysed. It was concluded that the metal structure is severely damaged due to the oxidation at several points of the lateral trusses. It was also found that, due to the approximations considered in the calculation of the area losted to the oxidation, some tensions on the elements presented values close to the steel's limite tension.

**Keywords:** Software SAP2000, structural analysis, railway bridge, metal structure, oxidation.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estruturas de uma ponte.....	16
Figura 2 – Pontes .....	18
Figura 3 – <i>Rolling Bridge</i> .....	19
Figura 4 – <i>Millennium Bridge</i> .....	20
Figura 5 – Ponte Vizcaya .....	20
Figura 6 – Ponte Hörn .....	20
Figura 7 – Seção transversal da via férrea .....	22
Figura 8 – Bitolas mista e larga.....	23
Figura 9 – Perfil transversal do trilho metálico Vignole.....	24
Figura 10 – Trem tipo .....	29
Figura 11 – Tipos de treliças (a) Pratt, (b) Howe, (c) Howe-Zhuravsky, (d) Warren e (e) Warren com montante.....	31
Figura 12 – Localização .....	33
Figura 13 – Ponte em estudo.....	33
Figura 14 – Visão esquemática da estrutura .....	34
Figura 15 – Predefinição das seções de aço.....	36
Figura 16 – Lados direito e esquerdo da estrutura.....	37
Figura 17 – Esquema representativo da treliça direita .....	37
Figura 18 – Esquema representativo da treliça esquerda.....	37
Figura 19 – Eixos de coordenadas do programa.....	38
Figura 20 – Esquema da seção original da transversina.....	39
Figura 21 – Atribuição de peso zero nos elementos .....	40
Figura 22 – Liberação da estrutura da treliça .....	41
Figura 23 – Grade base da estrutura .....	43
Figura 24 – Elementos, nós e apoios do esqueleto da estrutura .....	43
Figura 25 – Apoio duplo da ponte estudada .....	44
Figura 26 – Apoio simples da ponte estudada.....	44
Figura 27 – Inserção de cargas no SAP2000.....	46
Figura 28 – Painel da ferramenta veículos .....	50

Figura 29 – Combinações dos carregamentos .....	52
Figura 30 – Carregamentos da combinação J .....	52
Figura 31 – Comando de execução da análise .....	55
Figura 32 – Longarina, transversina e contraventamento .....	56
Figura 33 – Diagonal 10A .....	57
Figura 34 – Diagonal 13B .....	58
Figura 35 – Montante 23A.....	60
Figura 36 – Banzo 8B “C” externo .....	61
Figura 37 – Banzo 8B “C” interno .....	61
Figura 38 – Banzo 1A interno (foto do interior da peça).....	62
Figura 39 – Banzo 1B “C” externo x9.....	63
Figura 40 – Banzo 1B “C” interno x10 .....	63
Figura 41 – Banzo 2B “C” externo x9.....	63
Figura 42 – Banzo 2B “C” interno x10 .....	63
Figura 43 – Banzos superiores .....	65
Figura 44 – Oxidação no interior do banzo superior 28B .....	66
Figura 45 – Banzo 27B (esquerda) e 28B (direita) .....	67
Figura 46 – Reações no programa SAP2000.....	70
Figura 47 – Reações no programa Ftool .....	70
Figura 48 – Trem tipo no programa Ftool .....	71
Figura 49 – Trem tipo no programa SAP2000.....	71
Figura 50 – Chapas de rigidez banzo 8B.....	79
Figura 51 – Comparação entre tensões dos banzos inferiores .....	81
Figura 52 – Comparação entre tensões das diagonais .....	81
Figura 53 – Comparação entre tensões dos montantes.....	82
Figura 54 – Comparação entre tensões dos banzos superiores .....	82

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Trens tipo normalizados.....	29
Quadro 2 – Tabela dos perfis metálicos da treliça para a ponte de projeto.....	38
Quadro 3 – Tabela dos perfis metálicos da treliça da estrutura original .....	44
Quadro 4 – Pesos da via permanente .....	47
Quadro 5 – Cálculo da carga de vento 1 .....	48
Quadro 6 – Cálculo da carga de vento 2 .....	49
Quadro 7 – Combinações das forças .....	53
Quadro 8 – Perfis oxidados das diagonais .....	58
Quadro 9 – Perfis oxidados dos montantes.....	59
Quadro 10 – Perfis oxidados dos banzos inferiores .....	64
Quadro 11 – Perfis oxidados dos banzos superiores .....	65
Quadro 12 – Porcentagem das oxidações do contraventamento, longarinas e transversinas .....	67
Quadro 13 – Porcentagem das oxidações para as treliças .....	68
Quadro 14 – Resultados nos elementos originais tracionados .....	73
Quadro 15 – Resultado dos elementos originais comprimidos .....	74
Quadro 16 – Resultado dos elementos originais alternados .....	75
Quadro 17 – Resultado dos elementos oxidados tracionados .....	76
Quadro 18 – Resultado dos elementos oxidados comprimidos .....	77
Quadro 19 – Resultados nos elementos oxidados alternados .....	78
Quadro 20 – Esforços de cálculo resistente .....	80

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
1.1 OBJETIVOS.....	14
1.1.1 Objetivo geral .....	14
1.1.2 Objetivos específicos .....	14
<b>2 OBRAS DE ARTE ESPECIAIS</b> .....	<b>16</b>
2.1 DEFINIÇÃO .....	16
2.2 ELEMENTOS ESTRUTURAIS DE UMA PONTE.....	16
2.3 CLASSIFICAÇÃO DAS PONTES .....	17
2.3.1 Finalidade.....	17
2.3.2 Material.....	18
2.3.3 Fixidez ou mobilidade da estrutura.....	19
2.3.4 Tempo de utilização .....	21
2.3.5 Sistema construtivo .....	21
2.4 SUPERESTRUTURA FERROVIÁRIA.....	22
2.4.1 Bitola .....	22
2.4.2 Trilho .....	23
2.4.3 Dormente.....	24
2.4.4 Lastro.....	25
2.4.5 Contra trilho na ponte.....	25
2.5 CARREGAMENTOS .....	26
2.5.1 Cargas permanentes.....	27
2.5.1.1 Peso próprio da estrutura.....	27
2.5.1.2 Peso da via permanente.....	28

2.5.2	Cargas variáveis .....	28
2.5.2.1	Cargas de vento.....	28
2.5.2.2	Carga móvel .....	28
2.5.2.3	Carga de choque lateral .....	30
2.5.2.4	Efeito de frenagem e aceleração .....	30
2.5.3	Cargas não contabilizadas.....	30
2.6	ESTRUTURAS TRELIÇADAS.....	30
2.7	PONTE FERROVIÁRIA EM ESTUDO .....	32
<b>3</b>	<b>MODELAGEM ESTRUTURAL .....</b>	<b>35</b>
3.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	35
3.1.1	Simplificações das longarinas .....	35
3.1.2	Simplificação dos perfis metálicos da treliça.....	36
3.1.3	Simplificação dos demais perfis metálicos .....	39
3.1.4	Simplificações dos esforços atuantes nos elementos .....	40
3.1.5	Elementos com esforços distribuídos.....	41
3.1.6	Simplificação da oxidação nos elementos.....	41
3.2	MODELAGEM DA ESTRUTURA ORIGINAL.....	42
3.2.1	Criação da grade base, do esqueleto da estrutura e atribuição dos apoios.....	42
3.2.2	Associação dos perfis metálicos à estrutura .....	44
3.2.3	Carregamento na Ponte .....	45
3.2.3.1	Cargas permanentes.....	47
3.2.3.2	Cargas variáveis .....	48
3.2.4	Combinações dos carregamentos .....	51
3.2.5	Execução da análise no programa .....	55

3.3	MODELAGEM DA ESTRUTURA OXIDADA.....	55
3.3.1	Perfis das longarinas, transversinas e contraventamento .....	56
3.3.2	Perfis das treliças.....	57
3.3.2.1	Diagonais .....	57
3.3.2.2	Montantes .....	59
3.3.2.3	Banzos inferiores .....	60
3.3.2.4	Banzos superiores.....	64
3.3.3	Resumo das oxidações.....	67
<b>4</b>	<b>ANÁLISE ESTRUTURAL .....</b>	<b>69</b>
4.1	CONFIRMAÇÕES .....	69
4.2	VERIFICAÇÃO DAS CARGAS AXIAIS NOS ELEMENTOS DAS TRELIÇAS PARA A PONTE ORIGINAL .....	72
4.3	VERIFICAÇÃO DAS CARGAS AXIAIS NOS ELEMENTOS DAS TRELIÇAS PARA A PONTE OXIDADA .....	75
4.4	ANÁLISE DA FLAMBAGEM GLOBAL .....	79
4.5	COMPARAÇÃO DA ESTRUTURAL ORIGINAL E OXIDADA.....	80
4.6	PONTOS CRÍTICOS DA ESTRUTURA.....	83
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>84</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>85</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Desde sempre animais e outros seres vivos utilizam, de forma inconsciente, árvores e troncos caídos sobre vales e rios para atravessarem de forma mais fácil um obstáculo. De forma consciente, as primeiras pontes construídas pelos humanos provavelmente utilizaram como matéria prima pedras e árvores, já que são os materiais mais antigos utilizados na construção civil.

Ao longo da evolução, técnicas construtivas mais grandiosas permitiram o avanço do tamanho das pontes, sua altura e também seus vãos livres. Com estes avanços, materiais mais nobres foram introduzidos, como o metal que permitiu o aumento considerável dos vãos livres, da capacidade de carga, a diminuição do peso próprio da estrutura e das fundações além do melhor controle construtivo.

Entre as estruturas metálicas tem-se a treliça, formada por hastes conectadas entre si formando triângulos que trabalham apenas com compressão e tração. Um exemplo de ponte treliçada é a ponte rodoviária Jacques Cartier, em Quebec, Canadá, que possui um vão livre de 549 metros de extensão, estando entre os maiores vãos treliçados já construídos.

Uma das maiores desvantagens das pontes treliçadas metálicas é o grande potencial de perda de material à corrosão, devido à sua proximidade com a água e terrenos agressivos. No caso das ferrovias há ainda o agravante do material transportado pelos comboios que cai dos vagões e fica depositado sobre a estrutura metálica como minérios e fertilizantes.

Aliado ao alto grau de agressividade, percebe-se que houve uma política de investimentos mínimos em manutenção e aproveitamento máximo da via permanente por parte do governo Federal, quando todas as ferrovias estavam sobre concessão da Rede Ferroviária Federal SA (RFFSA), o que dificultou a manutenção e recuperação por parte das empresas concessionárias. Como consequência, grande parte da malha ferroviária brasileira encontra-se em péssimo estado de conservação, necessitando de recuperação imediata.

Neste contexto, foi estudada a ponte ferroviária, localizada na Ferrovia Tereza Cristina (FTC), em Içara, SC. Esta estrutura é uma ponte treliçada em avançado grau de deterioração. Objetivou-se, neste trabalho, analisar o comportamento estrutural e verificar qual a perda de capacidade de carga devido ao seu estado atual de deterioração. Esta avaliação foi feita a partir do estudo das solicitações, tensões e deformações ao longo dos elementos componentes da estrutura da ponte.

A ferramenta utilizada para o estudo do comportamento estrutural foi o *software* SAP2000, programa de análise estrutural baseado no método dos elementos finitos. A partir deste *software*, foi realizado o lançamento dos elementos estruturais componentes da ponte original e, em seguida, após a análise das oxidações na ponte, foi realizada uma nova avaliação, desconsiderando as seções de metal perdidas pela oxidação. Neste trabalho foi realizada apenas a análise estática da meso e superestrutura, levando em conta os critérios estabelecidos pela norma brasileira.

## 1.1 OBJETIVOS

Delimitaram-se os seguintes objetivos, que estão subdivididos em dois grupos, geral e específicos.

### 1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é analisar de forma estrutural a ponte ferroviária sobre o Rio Urussanga devido à perda de seção proveniente da corrosão da estrutura metálica.

### 1.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- a) Verificar, de acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), o trem-tipo a ser utilizado nas análises;
- b) Realizar a análise da estrutura original utilizando o *software* SAP2000;
- c) Conhecer os esforços atuantes na ponte original;

- d) Analisar os locais mais solicitados da estrutura;
- e) Levantar, no local da estrutura, os pontos de maior oxidação e perda de seção de área;
- f) Conhecer os esforços atuantes na ponte oxidada com simplificações das áreas comprometidas;
- g) Realizar a análise da capacidade de carga da ponte devido à oxidação e sugerir os cuidados para a continuação da utilização da estrutura.

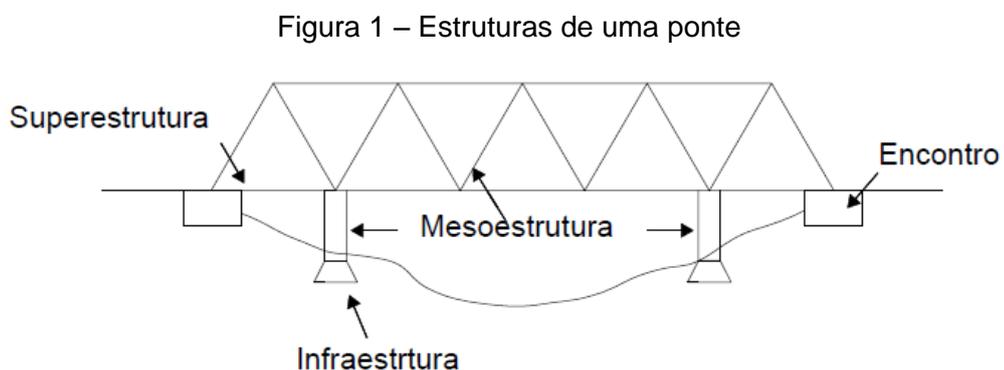
## 2 OBRAS DE ARTE ESPECIAIS

### 2.1 DEFINIÇÃO

Obras de arte especiais são estruturas construídas para transpor obstáculos que impeçam a continuidade da via. Quando este obstáculo é água, ela é corretamente chamada de ponte. Por outro lado, quando o obstáculo se tratar de outra via, vale, casas etc. dá-se o nome de viaduto. Ambos, pontes e viadutos, são considerados obras de arte especiais, e possuem procedimentos parecidos quanto ao projeto e construção. Ainda, quando se trata de pontes pequenas, estas podem ser chamadas de pontilhões, sendo muito comuns em ferrovias. As dimensões máximas dos pontilhões variam muito de autor para autor, mas normalmente são de no máximo cinco, dez ou vinte metros (PFEIL, 1983).

### 2.2 ELEMENTOS ESTRUTURAIS DE UMA PONTE

Segundo Matos (2001), superestrutura, mesoestrutura e infraestrutura são as principais etapas estruturais de uma ponte. A Figura 1 mostra um exemplo de ponte treliçada com as indicações da superestrutura, mesoestrutura, infraestrutura e encontros.



Fonte: Autor (2017)

A superestrutura é a região responsável por receber as cargas provenientes dos veículos que atravessam a ponte, sendo que o esforço principal sobre esta é a flexão (PFEIL, 1983). Ela é formada principalmente por lajes, vigas principais (longarinas) e vigas secundárias (transversinas) que suportam o tabuleiro. As cargas absorvidas pela superestrutura são transmitidas para a infraestrutura através da mesoestrutura. Esta normalmente é formada por pilares, mas também pode conter arcos, torres, estais e treliças.

Finalmente, para difundir a carga no terreno, tem-se a infraestrutura, que é composta de blocos, sapatas, estacas e tubulões. Estes últimos, mesmo sendo uma ótima opção geotécnica, estão sendo menos utilizados devido aos perigos em sua construção, como despressurizações e desmoronamentos.

Os encontros, classificados como mesoestrutura ou infraestrutura, são responsáveis por fazer a união entre a estrutura e a pista ou ferrovia. Também recebem os empuxos dos aterros de acesso, evitando assim que esforços sejam transmitidos para a estrutura da ponte (MATTOS, 2001).

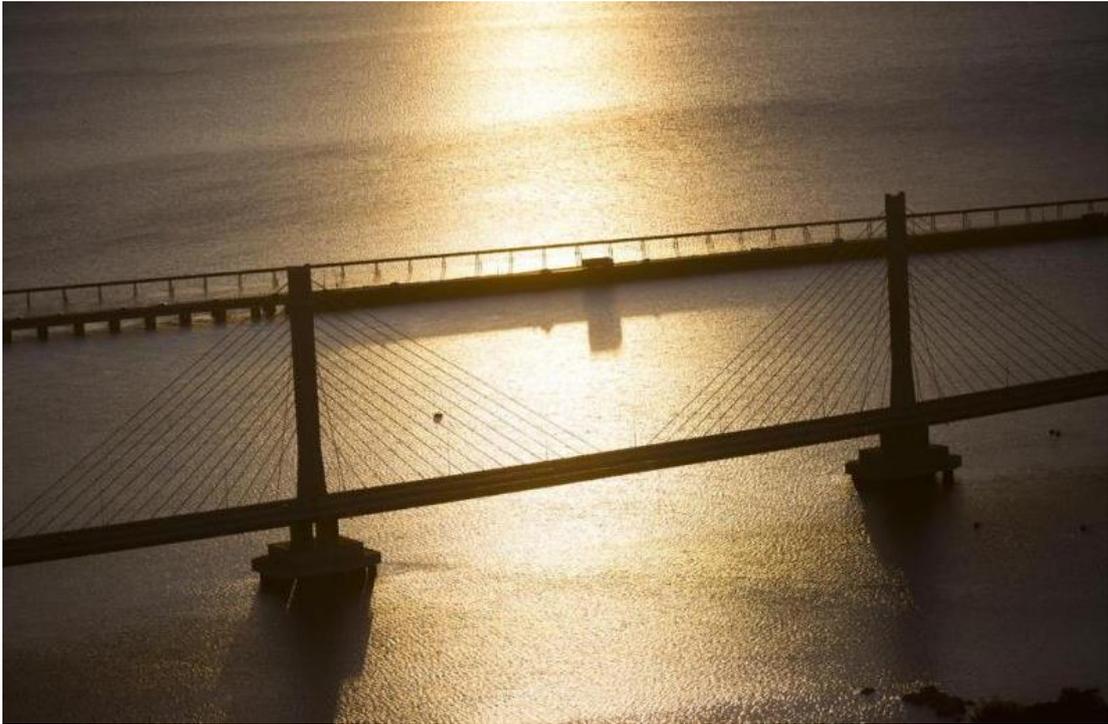
## 2.3 CLASSIFICAÇÃO DAS PONTES

A classificação das pontes se dá de várias formas, estando entre as principais características a finalidade, o material, a fixidez, o tempo de uso e o sistema construtivo.

### 2.3.1 Finalidade

Quanto à finalidade, as pontes podem ser utilizadas por comboios férreos, veículos rodoviários, pedestres, dutos de transporte, aviões (em aeroportos), embarcações (em cruzamentos de rios com diferentes alturas) ou mistas, onde coexiste a utilização de mais de um elemento. Na Figura 2 podem ser vistos três exemplos diferentes quanto a esta classificação. A ponte Anita Garibaldi, posicionada abaixo na foto, onde há apenas o modal rodoviário, a antiga ponte da Estrada de Ferro Tereza Cristina, acima na foto, onde há apenas a passagem de trens, e a atual ponte ferroviária, onde coexistem os modais ferroviário e rodoviário.

Figura 2 – Pontes



Fonte: Garopaba 10 (2013)

Ainda, quanto à finalidade, pode-se ter, junto com outros elementos, a passagem de dutos e tubulações de energia elétrica, telefonia, combustíveis, água e esgoto. Deve-se atentar a este fato na hora de realizar a manutenção na estrutura para evitar a falta de abastecimento de um produto para certa região ou então não causar acidentes, como o ocorrido no ano de 2003 no vão central da ponte Colombo Salles, em Florianópolis, onde um incidente na manutenção de cabos de alta tensão causou uma explosão deixando a cidade 55 horas sem energia elétrica e sem os demais serviços que dela dependem (GLOBO, 2013).

### 2.3.2 Material

São diversos os materiais utilizados nas pontes, sendo que os mais comuns são pedra, alvenaria, madeira, aço, concreto, concreto armado, concreto protendido e orgânico (como algumas pontes Incas). Também existem pontes com uma associação destes materiais, onde se aliam os benefícios de uns com as características ruins de outros, a fim de compor um material mais complexo e de melhor qualidade.

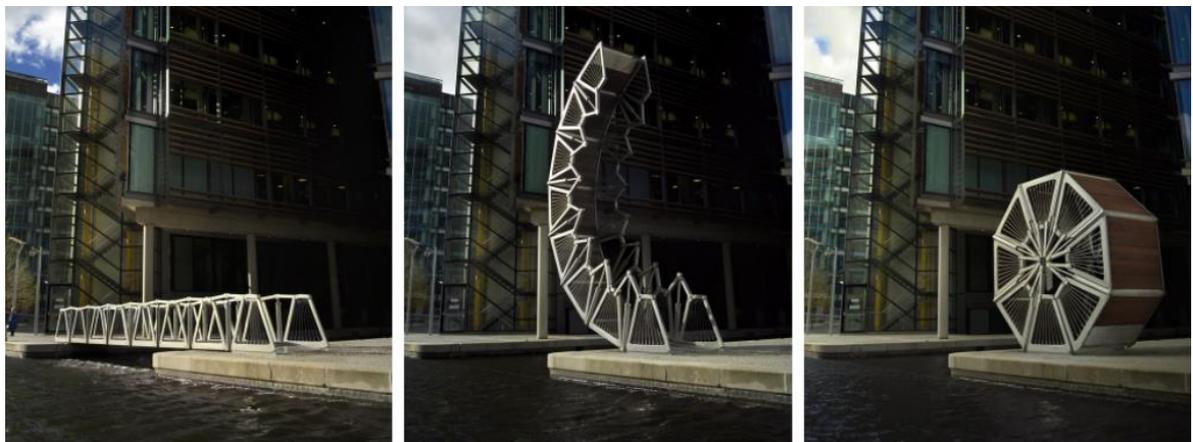
O avanço dos materiais possibilitou estruturas mais longas, leves e esbeltas, diminuindo o esforço sobre as fundações e melhorando a harmonia destas com o entorno. Ainda, certos sistemas construtivos e alguns tipos de pontes só são possíveis utilizando materiais que exijam um conhecimento mais aprofundado de suas propriedades.

### 2.3.3 Fixidez ou mobilidade da estrutura

Quando uma ponte atravessa uma rota navegável, costuma-se adotar duas medidas que facilitam o entrosamento entre os modais: ou construir uma ponte fixa e alta, para que as embarcações passem por baixo, ou então construir uma ponte móvel, para que ela possa ceder espaço para os veículos que vêm pela água. Os movimentos mais comuns são o de translação e rotação, sendo que este é representado pelas pontes basculantes e giratórias, enquanto aquele é representado pelas pontes corrediças e levadiças (PFEIL 1983).

Além destes movimentos, existem algumas pontes não ortodoxas, como a The Rolling Bridge (Figura 3), que faz um rolamento sobre si mesma. A Millennium Bridge (Figura 4), movimentando-se de forma semelhante a uma mandíbula. A Ponte Vizcaya (Figura 5), com um sistema semelhante a uma ponte rolante onde ocorre o transporte dos veículos e pedestres por uma plataforma içada e a Hörn Bridge (Figura 6), com sistema reclinável.

Figura 3 – *Rolling Bridge*



Fonte: Adaptado de você realmente sabia (2013)

Figura 4 – Millennium Bridge



Fonte: Adaptado de você realmente sabia (2013)

Figura 5 – Ponte Vizcaya



Fonte: Adaptado de você realmente sabia (2013)

Figura 6 – Ponte Hörn



Fonte: Adaptado de você realmente sabia (2013)

#### 2.3.4 Tempo de utilização

Quanto ao tempo de utilização, Pfeil (1983) considera que as pontes podem ser divididas em duas categorias: provisórias e permanentes. Pontes provisórias são aquelas empregadas de forma passageira. São utilizadas geralmente na substituição de pontes permanentes que por algum motivo ruíram ou não se encontram em condições de uso. Outro uso para se fazer é quando, necessitando-se de uma liberação rápida da travessia de um obstáculo, utiliza-se a ponte provisória devido à sua rápida construção.

As pontes permanentes são aquelas estruturas construídas de forma a serem perenes, ou de uso durador, naquela localidade. Não são desmontáveis e não são transferíveis de um local para outro, exigindo ainda maiores estudos individualmente para cada região e estrutura.

#### 2.3.5 Sistema construtivo

Segundo Mattos (2001), o sistema construtivo diz respeito à forma como a ponte é construída e, geralmente, condiz com as limitações da obra. A escolha do método construtivo está ligada diretamente com o menor custo, a forma mais segura, mais rápida, que esteja disponível e que seja uma técnica construtiva adequada para a obra.

As estruturas metálicas normalmente são pré-fabricadas em indústria próxima ao local da obra. Com esta opção, tem-se melhor aproveitamento dos perfis e menor desperdício com sobras, além de controle de fabricação mais rigoroso e qualidade nos furos e soldas. Depois dos perfis estarem prontos, começa-se então o transporte para o canteiro de obras, que pode ser feito com as peças completamente desmontadas ou já com algumas conexões entre si, o que pode atrapalhar no transporte devido a limitações das vias e do veículo de transporte.

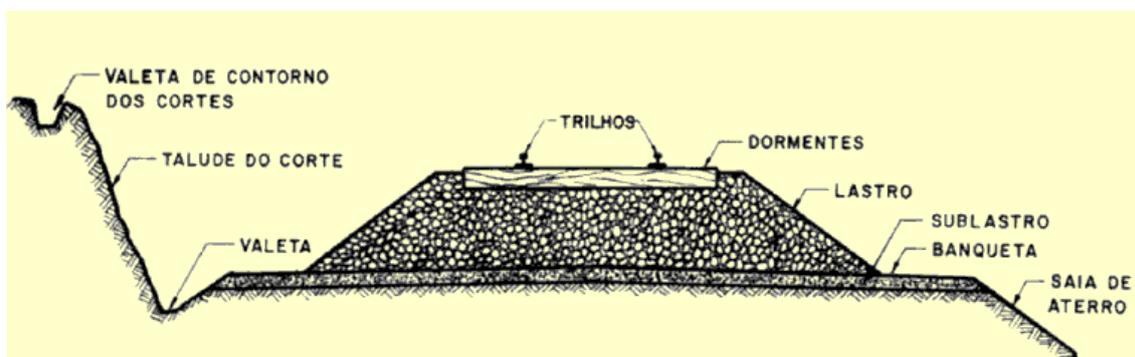
Ao chegar ao canteiro de obras, opta-se entre duas alternativas. Realizar a montagem completa da estrutura e então içá-la com guindaste de alto esforço até o local adequado ou então, através de escoramentos sobre o leito do rio, realizar a montagem das peças uma por uma, podendo assim utilizar um equipamento de içamento menos robusto. A vantagem desta opção está no menor custo com equipamentos mais simples, pois o guindaste de alto desempenho nem sempre

consegue alcançar o local da ponte e precisa de uma plataforma mais estável para poder operar. Por outro lado, quando existe a opção de chegar até a proximidade do leito do rio, torna-se interessante o içamento para que não seja necessário realizar o escoramento da estrutura, que dependendo do tipo da obra (correnteza, tamanho do vão, calado, altura da ponte em relação ao nível da água, peso da estrutura) pode torná-la muito mais rápida e menos custosa, além de mais segura.

## 2.4 SUPERESTRUTURA FERROVIÁRIA

Superestrutura é a porção visível de uma estrada férrea e é toda a estrutura que fica visível acima do terreno da plataforma. É construída de forma a absorver e transferir os esforços provenientes do comboio para a infraestrutura e então para o solo. Seus elementos físicos principais são os trilhos, os dormentes e o lastro e podem ser identificados na Figura 7. O princípio de construção permite a renovação ao longo do tempo, devendo esta ser realizada antes de o desgaste atingir a tolerância de segurança, conforto ou economia (BRINA, 1983).

Figura 7 – Seção transversal da via férrea



Fonte: Brina (1983)

### 2.4.1 Bitola

A bitola é o espaçamento entre os trilhos a 12 mm do topo dos boletos e é definida de acordo com a análise de custo benefício, considerando-se o que será transportado. Bitolas maiores permitem maiores velocidades, maiores cargas por vagão e maior estabilidade lateral, enquanto que as bitolas estreitas aceitam curvas

de raios menores, economia na construção da via permanente (lastro, obras de arte e terraplenagens) e menor resistência à tração (CURY, 2011).

No Brasil, as bitolas mais comuns são a bitola métrica, de 1000 mm, a bitola standard, de 1435 mm, e a bitola larga, de 1600 mm, além de bitola mista que permite a associação de duas ou mais bitolas em uma mesma via permanente. A Figura 8 mostra à esquerda uma bitola mista e à direita uma bitola larga.

Figura 8 – Bitolas mista e larga

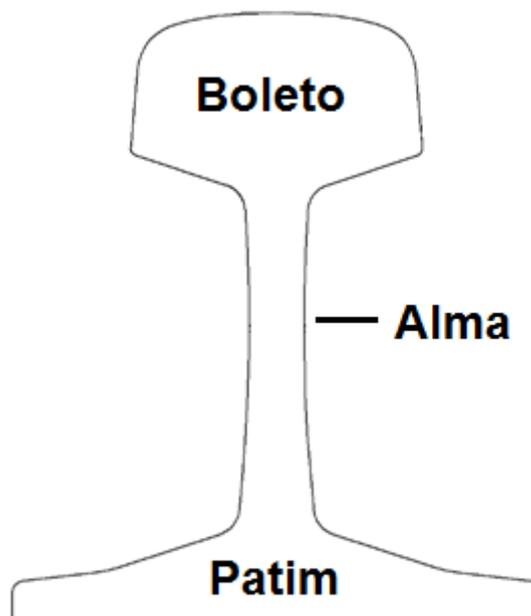


Fonte: Magalhães (2012)

#### 2.4.2 Trilho

Para Brina (1983), o trilho é o componente metálico da via férrea responsável por receber os esforços diretamente dos rodeiros do comboio e também por ser o elemento que proporciona a superfície de rolamento. Para facilitar a fixação e melhorar a capacidade de carga com o menor custo possível, os perfis de trilho foram evoluindo do simples perfil T até o perfil Vignole, constituído do boleto, alma e patim, como pode ser visualizado na Figura 9.

Figura 9 – Perfil transversal do trilho metálico Vignole



Fonte: Adaptado de Brina (1983)

O boleto, parte superior mais densa, é responsável por sustentar as tensões provenientes do rodeiro do trem. A parte central, ou alma, é responsável por transferir as tensões do boleto para o patim, que por sua vez, é responsável por fixar e transferir os esforços para a placa de apoio que transfere para os dormentes.

#### 2.4.3 Dormente

Os dormentes são elementos da via permanente responsáveis pela manutenção da bitola, distribuição das tensões do trilho para o lastro e por evitar os movimentos do perfil metálico, tanto longitudinalmente em frenagens e acelerações, como transversalmente em curvas. Atualmente, quatro materiais são os mais utilizados: madeira, concreto, aço e plástico.

Os dormentes de madeira são os mais antigos e os mais utilizados no Brasil, devido a suas boas propriedades mecânicas, baixo custo e facilidade na instalação. Sua principal desvantagem é a durabilidade, que devido ao uso de madeiras tratadas de baixa qualidade, pode variar de três a dez anos. O começo do uso deste tipo de dormente se dava com madeiras nobres, que proporcionavam duração elevada e melhores propriedades estruturais. Atualmente, este tipo de dormente é utilizado apenas quando o investimento em tipos melhores não é conveniente.

Por outro lado, os dormentes de concreto e de aço aliam boa resistência com longa durabilidade, podendo ambos chegar a meio século de vida útil. Entretanto, enquanto o de concreto é de difícil implantação devido ao peso, o de aço é de difícil reutilização em casos de descarrilamento. Mesmo com o custo de implantação elevado no Brasil, os dormentes de concreto são amplamente utilizados.

Já o dormente em plástico é uma tecnologia nova, cara, mas muito atraente. É de origem reciclada, totalmente reciclável, de fácil instalação (utilizando a mesma fixação adotada na madeira), baixo peso (devido à baixa densidade do material) e de longa duração. Estima-se mais de 50 anos para sua vida útil, tornando-o muito interessante para aplicações onde não é conveniente realizar a manutenção com frequência, como em passagens de nível (PINTO, 2012).

#### 2.4.4 Lastro

O lastro, um material rochoso granular, é a porção inferior da superestrutura e é, normalmente, a última parcela que sofre manutenção, sendo esta a que melhor reduz as tensões que serão absorvidas pela plataforma. É responsável pelo travamento dos dormentes, diminuindo os efeitos de flambagens e absorvendo os esforços longitudinais e transversais dos dormentes, além de manter a linha drenada devido à sua propriedade granular.

#### 2.4.5 Contra trilho na ponte

Os contratrilhos são trilhos metálicos existentes nas pontes ferroviárias que servem para, em caso de descarrilamento da composição ou parte dela, auxiliar na volta dos rodeiros para cima do trilho original assim evitando colisões do trem com a estrutura da ponte/viaduto. São obrigatórios tanto em pontes, quanto pontilhões e viadutos, devendo começar antes da ponte e se estender até depois desta.

De acordo com um desenho técnico do departamento da via permanente, da R.F.F.S.A, encontrado no acervo da FTC, datado de 13 de agosto de 1964, os contratrilhos devem ser estendidos para fora da ponte nas seguintes medidas:

- a) Dez metros para ambos os lados, em vãos menores a 20 metros;

- b) Vinte metros para ambos os lados, em vãos maiores que 20 metros e menores que cinquenta metros, incluindo os intervalos;
- c) Vinte e cinco metros para ambos os lados, em vãos maiores que 50 metros.

## 2.5 CARREGAMENTOS

Os carregamentos sobre uma ponte são uma junção de cargas permanentes, variáveis e excepcionais que provocam esforços ou deformações nas estruturas. De acordo com a NBR 7187:2003 – Projeto de pontes de concreto armado e de concreto protendido – e a NBR 8681:2003 – Ações e segurança nas estruturas – Procedimento –, as ações permanentes são aquelas que ocorrem de forma constante ou então com pouca variação, mantendo-se sempre próximas a uma média, ao longo de praticamente toda a vida útil da estrutura. Segundo a mesma norma, as ações permanentes em pontes são subdivididas em:

- a) Cargas provenientes do peso próprio dos elementos estruturais;
- b) Cargas provenientes do peso dos trilhos, dormentes, lastro, guarda-corpos, dispositivos de sinalização e demais acessórios da via;
- c) Empuxos de terra e de líquido;
- d) Forças de protensão (quando existirem);
- e) Deformações provocadas por variação de temperatura e deslocamento de apoios.

Por outro lado, as ações variáveis são aquelas que não estão presentes a todo o momento na estrutura, podendo ser:

- a) Cargas móveis;
- b) Cargas de construção;
- c) Cargas de vento;
- d) Empuxo de terra provocado por cargas móveis;
- e) Pressão da água em movimento;
- f) Efeito dinâmico do movimento das águas;
- g) Variações de temperatura.

Há também uma subdivisão na caracterização das ações variáveis, tendo-se então as ações excepcionais, que são aquelas que ocorrem de forma muito esporádica, de forma anormal ao cotidiano da estrutura. São os choques de objetos móveis, como veículos ou embarcações, explosões e fenômenos naturais raros, como enchentes catastróficas, ventos muito fortes, sismos e demais ações provenientes da natureza que não ocorram comumente.

As cargas atuantes consideradas no estudo da ponte foram divididas em permanentes e variáveis. Entre as cargas permanentes foram levados em conta o peso próprio da estrutura e o peso da via permanente. Para as cargas variáveis foram consideradas a carga de vento, a carga de impacto lateral, a carga de frenagem e aceleração e o trem-tipo.

## 2.5.1 Cargas permanentes

### 2.5.1.1 Peso próprio da estrutura

O peso próprio da estrutura refere-se apenas ao peso da estrutura metálica da ponte, considerando a carga devido ao contraventamento, às duas longarinas, nove transversinas, 16 diagonais, 14 montantes e 28 banzos. Pode-se chegar ao peso próprio de cada seção através da multiplicação da área da respectiva seção pelo seu comprimento e pelo peso específico do material, conforme a Equação 1. Com o somatório de todos os pesos específicos chega-se ao peso próprio da estrutura, representado na Equação 2.

$$P_{ps} = (\gamma_{aço}) \cdot (A_s) \cdot (L_s) \quad \text{(Equação 1)}$$

$$P_p = \sum P_{ps} \quad \text{(Equação 2)}$$

Sendo,

$P_p$  – Peso próprio da ponte (kN);

$P_{ps}$  – Peso próprio do elemento (kN);

$\gamma_{aço}$  – Peso específico do aço (kN/m<sup>3</sup>);

$A_s$  – Área da seção (m<sup>2</sup>);

$L_s$  – Comprimento da seção (m).

### 2.5.1.2 Peso da via permanente

O cálculo do peso da via permanente é realizado considerando-se os pesos de cada elemento da via permanente multiplicados por suas respectivas quantidades e então dividido pelo comprimento total da ponte e pelo número de longarinas para encontrar a carga distribuída sobre cada uma das longarinas. De acordo com a NBR 7187:2003, a carga total de via permanente, desconsiderando o lastro, deve ser maior ou igual a 8 kN/m. O peso do lastro deve ser calculado considerando que o lastro atinja o nível superior dos dormentes e preencha todo o espaço delimitado pelos guarda lastros, sendo que o material deve ter peso específico de no mínimo 18 kN/m<sup>3</sup>.

### 2.5.2 Cargas variáveis

#### 2.5.2.1 Cargas de vento

As normas atuais, NBR 6123, NBR 7187 e NBR 7188, não fazem clara menção à ação dos ventos em pontes. Por este motivo, optou-se por utilizar a última norma a definir o assunto, sendo esta a NB2/61, onde para a carga de vento há dois cálculos diferentes: um considerando apenas a estrutura da ponte e outro considerando que haja veículos sobre a mesma.

Quando não há fluxo de veículos sobre a ponte, o cálculo do vento é realizado através da multiplicação da área da seção lateral da estrutura pelo fator de 1,5 kN/m<sup>2</sup>. Por outro lado, quando o veículo está presente na estrutura, o cálculo passa a considerar um fator de 1,0 kN/m<sup>2</sup> multiplicado pela altura lateral, levando em conta a carga móvel. No caso de trens, deve-se considerar uma altura de 3,50 metros acima da superfície de rolamento.

#### 2.5.2.2 Carga móvel

Na análise da carga móvel, a NBR 7189 (ABNT, 1958) – Cargas móveis para projeto estrutural de obras ferroviárias, – que está cancelada e sem substituição

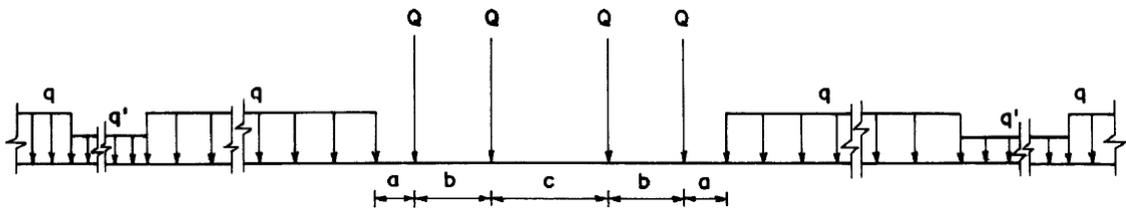
– define trem tipo como uma representação da carga móvel vertical atuante sobre a estrutura.

Segundo a mesma norma, as classes de trem tipo são divididas como segue:

- TB-360: para ferrovias sujeitas a transporte de minério de ferro e outros carregamentos equivalentes;
- TB-270: para ferrovias sujeitas a transporte de carga geral;
- TB-240: para ser adotado somente na verificação de estabilidade e projeto de reforço de obras existentes;
- TB-170: para vias sujeitas exclusivamente ao transporte de passageiros em regiões metropolitanas ou suburbanas.

As características geométricas e as cargas dos trens-tipo brasileiros são mostradas na Figura 10, onde as respectivas cargas por eixo ( $Q$ ) e cargas distribuídas na via ( $q$  e  $q'$  representando vagões carregados e descarregados, simultaneamente) são mostradas no Quadro 1.

Figura 10 – Trem tipo



Fonte: NBR 7189 (ABNT,1958)

Quadro 1 – Trens tipo normalizados

TB	Q (kN)	q (kN/m)	q' (kN/m)	a (m)	b (m)	c (m)
360	360	120	20	1,00	2,00	2,00
270	270	90	15	1,00	2,00	2,00
240	240	80	15	1,00	2,00	2,00
170	170	25	15	11,00	2,50	5,00

Fonte: NBR 7189 (1958)

Ainda, seguindo esta norma, quando necessário verificar a estabilidade da estrutura, pode-se optar por escolher o trem tipo operacional na ferrovia como base para analisar as solicitações.

Contudo, para fins de reforço, reforma ou reconstrução da estrutura existente ou de parte dela, deve-se utilizar, no mínimo, os valores normatizados e seguir as informações do Quadro 1.

#### 2.5.2.3 Carga de choque lateral

De acordo com a NBR 7187, o choque lateral deve ser considerado como uma força móvel horizontal aplicada à altura do boleto com magnitude de 20% da carga do eixo mais pesado. Esta carga de choque deve-se ao fato de o contato entre o rodado e o trilho não ser perfeito, já que necessariamente há uma folga nesta união a fim de permitir que o veículo vença as concordâncias horizontais.

#### 2.5.2.4 Efeito de frenagem e aceleração

Ainda de acordo com a NBR 7187, a carga de frenagem e aceleração deve ser considerada como uma carga horizontal no eixo principal da ponte e com valor maior que 15% da carga móvel para frenagem ou 25% do peso dos eixos motores para a aceleração, devendo-se usar o maior valor entre os dois.

#### 2.5.3 Cargas não contabilizadas

Por ser uma ponte sem contato com a água e por estar apoiada nas extremidades, não se considerou na análise empuxos ou cargas devido ao movimento de terras ou água. Também não foram levados em conta o efeito térmico e o carregamento devido ao lastro.

### 2.6 ESTRUTURAS TRELIÇADAS

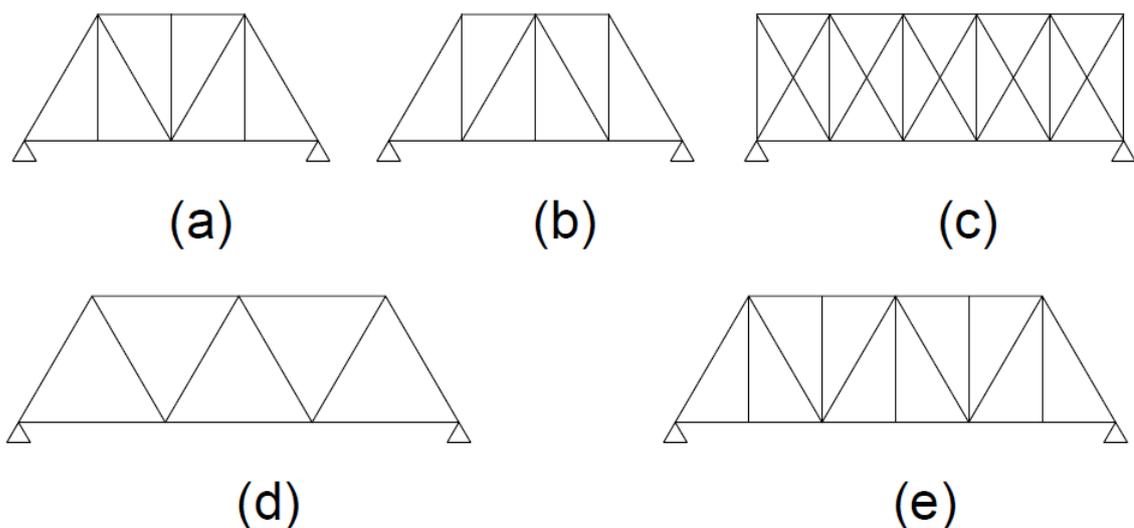
As estruturas treliçadas possuem grande empatia dos projetistas devido ao seu baixo peso próprio e elevada resistência para cargas. Este menor peso próprio

irá gerar menores solicitações nos encontros e fundações. Também são de fácil e rápida montagem, sendo ideais para locais de difícil acesso.

Estas estruturas são projetadas peça a peça, de forma a montar uma treliça. Encontram-se dois tipos de elementos principais, sendo eles os nós e os membros. Os membros, também chamados de barras, têm a nomenclatura de diagonais para os membros inclinados, banzos para os membros horizontais e montantes para os membros verticais. Nestes elementos existem apenas forças de tração e compressão, sendo que um mesmo elemento pode sofrer hora tração, hora compressão, dependendo de onde as cargas solicitantes estão aplicadas.

Já os nós trabalham como conectores e têm a função de união ou junção dos elementos, sendo o local de aplicação das cargas externas à treliça, para que a estrutura real se aproxime à hipótese de pura tração e compressão nos membros. Quando os membros das treliças são todos do mesmo tamanho, chama-se esta de treliça equilátera. As treliças isósceles são aquelas que possuem apenas dois membros iguais. Além desta simples qualificação, as treliças podem ser separadas quanto a seus tipos, sendo, entre outros, tipo Pratt, Howe, Warren, Warren com montante vertical que devem ser escolhidas com o intuito de reduzir o comprimento das peças comprimidas. Além disso, deve-se utilizar o menor número possível de nós para reduzir a deformação total da estrutura (KARLSEN, 1967).

Figura 11 – Tipos de treliças (a) Pratt, (b) Howe, (c) Howe-Zhuravsky, (d) Warren e (e) Warren com montante



Fonte: Autor (2017)

A Figura 11 (a) mostra a treliça Pratt que, quando carregada apenas com seu peso próprio, exibe tração nas diagonais e compressão nos montantes. Em contra partida, na Figura 11 (b), a treliça tipo Howe, com o mesmo tipo de carregamento, apresenta tração nos montantes e compressão nas diagonais.

A treliça Howe-Zhuravsky da Figura 11 (c) possui diagonais em ambas as direções, que, com elementos rigidamente conectados, tem nos montantes internos apenas tensões de tração e compressão nas diagonais. Na existência de uma carga móvel, enquanto uma das diagonais do painel atua em compressão, a outra está inativa. Quando o carregamento varia de posição, as diagonais trocam de papel e aquela que estava inativa passa a ter carga, e a que possuía sinal de compressão passa a estar inativa (MORAES, 2007).

O quarto e quinto tipo de treliça, o tipo Warren, na Figura 11 (d), e o tipo Warren com montante, na Figura 11 (e), tem sinal de tensões alternado entre as diagonais. De acordo com Moraes (2007), quando o uso de montantes não é obrigatório tem-se o tipo Warren, mas quando se justifica o uso de montantes para diminuir o comprimento dos banzos inferiores ou aumentar a estabilidade dos banzos superiores tem-se o tipo Warren com montante.

## 2.7 PONTE FERROVIÁRIA EM ESTUDO

A ponte ferroviária treliçada sobre o Rio Urussanga, em Içara SC (Figura 12) no km 84+041 da linha tronco da Ferrovia Tereza Cristina não possui pilares, sendo fixada entre dois encontros, um em cada extremidade. A Figura 13 permite a visualização da ponte já em reforma onde o vão central é de 24,00 metros, divididos em oito painéis treliçados do tipo Warren com montante e estrado inferior, composto por nove transversinas, duas longarinas e oito conjuntos de contraventamentos. A estrutura foi construída na década de 1950 e o aço utilizado foi o aço equivalente ao aço ASTM-A36, de acordo com informações fornecidas pela empresa ROCA, responsável pela restauração atual da estrutura.

Figura 12 – Localização



Fonte: Wikipédia (2017)

Figura 13 – Ponte em estudo



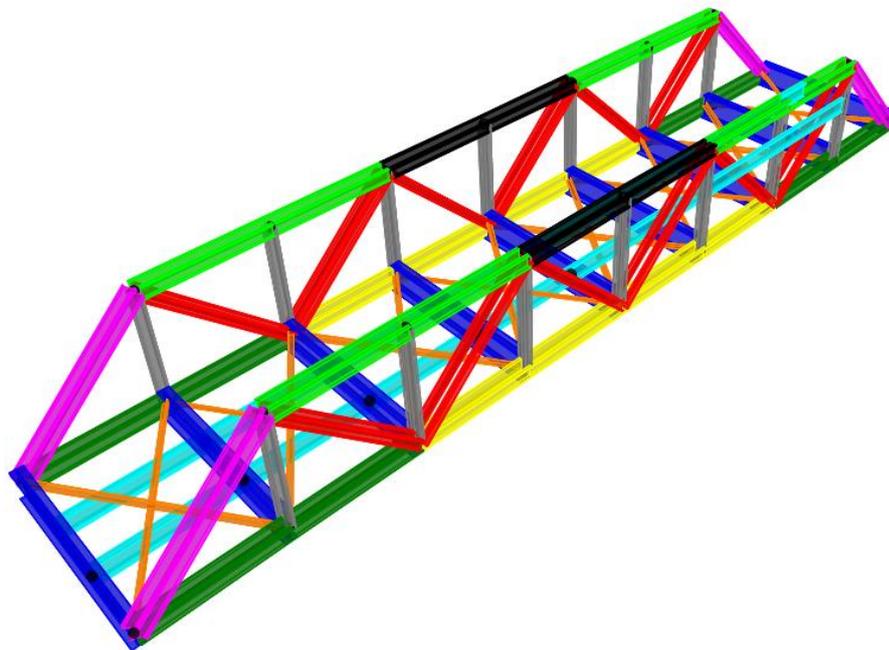
Fonte: Autor (2017)

O projeto inicial da ponte é mantido guardado como acervo técnico do Departamento de Via Permanente da Ferrovia Tereza Cristina e é utilizado como principal fonte de informações para a análise da ponte.

Através da Figura 14, pode-se demonstrar que as seções metálicas da ponte se repetem de forma simétrica longitudinalmente e transversalmente. O

contraventamento na cor laranja é o elemento que aumenta a rigidez estrutural. Já as longarinas, em cor azul clara com 24,00 metros de comprimento, são responsáveis por receber toda a carga da via permanente e também a carga móvel. Estas são descarregadas nas transversinas, em azul escuro, com 4,50 metros de comprimento, que distribuem as cargas para os nós das treliças laterais. Os nós, representados por pontos em preto, são zonas metálicas consideradas rígidas e são responsáveis pela união dos elementos da estrutura. Os banzos, montantes e diagonais, com 3,00, 3,20 e 4,39 metros de comprimento, respectivamente, são os elementos laterais da treliça.

Figura 14 – Visão esquemática da estrutura



Fonte: Autor (2017)

### 3 MODELAGEM ESTRUTURAL

Para auxiliar os cálculos e permitir a melhor visualização do comportamento estrutural, optou-se por utilizar o programa SAP2000, versão 19.0.0. Na modelagem da ponte foram utilizadas informações do projeto e da estrutura atual de forma mais fiel possível, minimizando, assim, erros devidos a aproximações grosseiras e simplificações inadequadas. Entretanto, é importante ressaltar que o uso indisciplinado desta ferramenta, bem como outras ferramentas utilizadas para auxílio nos cálculos e projeções, pode causar graves falhas na análise do problema caso o engenheiro ou projetista não tenha sensibilidade para reconhecer se a magnitude dos parâmetros condiz com o esperado (LAZZARI, 2009).

A fim de alcançar o objetivo geral deste trabalho, que é a análise da ponte em seu projeto inicial e então comparar com o estado atual, este capítulo foi dividido em duas partes principais: modelagem da estrutura original e modelagem da estrutura oxidada. Inicialmente, são listadas as considerações gerais para a modelagem, apresentando algumas simplificações realizadas no modelo.

#### 3.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

A fim de utilizar o programa SAP2000, houve a necessidade de adotar algumas simplificações para o lançamento da estrutura e seu carregamento. Nos itens a seguir estão apresentadas as justificativas da utilização das simplificações.

##### 3.1.1 Simplificações das longarinas

Atualmente, o programa não permite mais a análise de trens-tipo em superfícies de área, apenas em linhas. Desta forma, utilizou-se apenas uma longarina para simular a influência da carga móvel, convertendo a área das seções das duas longarinas em uma única seção. Nesta única longarina foram consideradas

as mesmas medidas externas e mesma espessura de mesa, alterando-se apenas a espessura da alma.

### 3.1.2 Simplificação dos perfis metálicos da treliça

Como o programa SAP2000 disponibiliza apenas alguns tipos de perfis para a representação transversal das barras (Figura 15), e, ainda, a ferramenta de criação de uma nova seção não permite a representação real dos perfis da ponte, foram feitas algumas simplificações, tanto para a análise da estrutura original como para a estrutura oxidada. As Figuras 16, 17 e 18 juntamente com a Quadro 2, representam, de forma esquemática, com a variação de cores e nomenclatura, a localização, formato e medidas de todos os perfis das treliças em sua forma original de projeto. Nestas simplificações teve-se o cuidado de garantir a mesma área da seção transversal e aproximadamente a mesma inércia.

Figura 15 – Predefinição das seções de aço

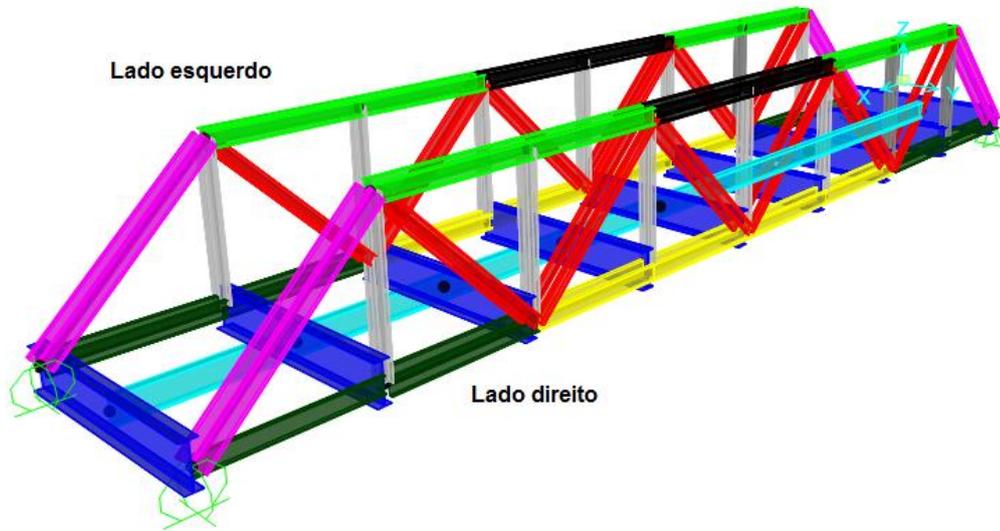


Fonte: Autor (2017)

Na Figura 19 estão representados os eixos utilizados no programa, sendo que o Z representa o eixo vertical da estrutura, o X o eixo longitudinal e o Y o eixo transversal à estrutura. Ainda, o sentido da ponte é considerado o mesmo da linha férrea, ou seja, o lado direito da ponte está à direita de quem está de costas para

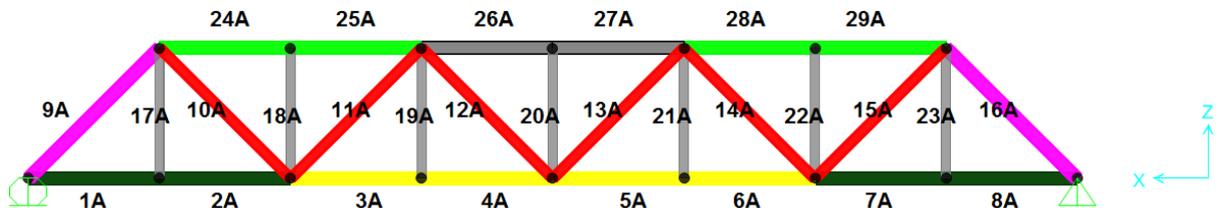
Tubarão (sentido crescente da quilometragem, onde Imbituba é o km 0 e Criciúma o km 107).

Figura 16 – Lados direito e esquerdo da estrutura



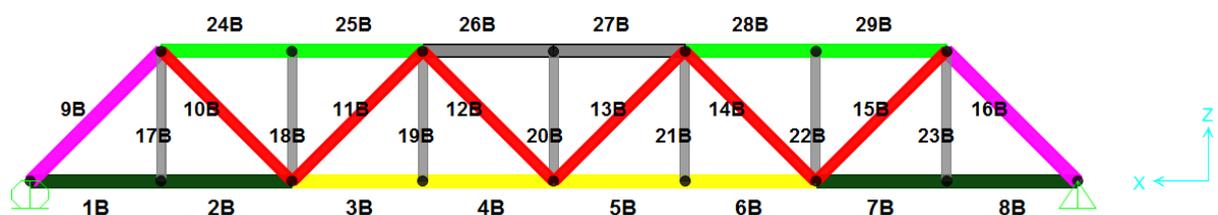
Fonte: Autor (2017)

Figura 17 – Esquema representativo da treliça direita



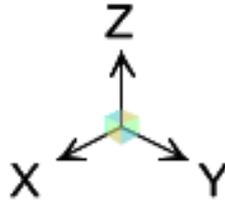
Fonte: Autor (2017)

Figura 18 – Esquema representativo da treliça esquerda



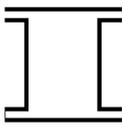
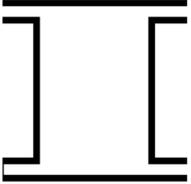
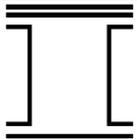
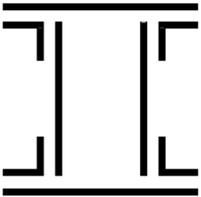
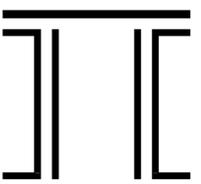
Fonte: Autor (2017)

Figura 19 – Eixos de coordenadas do programa



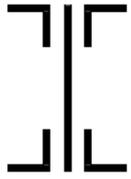
Fonte: Autor (2017)

Quadro 2 – Tabela dos perfis metálicos da treliça para a ponte de projeto

Desenho do perfil	Perfil	Informações do perfil
	1A, 1B, 2A, 2B, 7A, 7B, 8A, 8B	Perfil em Duplo C de 12x3x7/16 polegadas 5 chapas horizontais 15,5x9,5x7/16 polegadas Espaçamento entre "C"s: 9,5 polegadas
	9A, 9B, 16A, 16B	Perfil em Duplo C de 12x3x7/16 polegadas 8 chapas de horizontais 15x9,5x0,625 polegadas Espaçamento entre "C"s: 9 polegadas
	24A, 24B, 25A, 25B, 28A, 28B, 29A, 29B	Perfil em Duplo C de 12x3x7/16 polegadas 8 chapas de horizontais 15x9,5x0,5 polegadas Espaçamento entre "C"s: 9 polegadas
	26A, 26B, 27A, 27B	Perfil em Duplo C de 12x3x7/16 polegadas 2 chapas horizontais 15,5x3/8 polegadas Espaçamento entre "C"s: 9,5 polegadas
	10A, 10B, 11A, 11B, 12A, 12B, 13A, 13B, 14A, 14B, 15A, 15B	2 chapas verticais: 8,5x3/8 polegadas 8 chapas horizontais 16,5x9,5x0,5 polegadas 4 perfis "L" 3,0x0x3,0x5/16 polegadas Espaçamento entre chapas: 9 polegadas
	3A, 3B, 4A, 4B, 5A, 5B, 6A, 6B	Perfil em Duplo C de 12x3x7/16 polegadas 2 chapas verticais 12x5/16 polegadas 8 chapas horizontais 15,5x9,5x0,5 polegadas Espaçamento entre "C"s: 9,5 polegadas

continua

continuação

Desenho do perfil	Perfil	Informações do perfil
	17A, 17B, 18A, 18B, 19A, 19B, 20A, 20B, 21A, 21B, 22A, 22B, 23A, 23B	4 perfis "L" 4,0x0x2,5x3/8 polegadas 1 chapa 8,5x3/8 polegadas

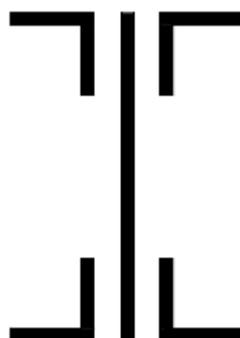
Fonte: Autor (2017)

Como os perfis simplificados variam para a estrutura original e oxidada, eles são indicados mais a frente. Em virtude da oxidação, alguns perfis foram modificados tanto quanto o formato como também quanto a área das seções.

### 3.1.3 Simplificação dos demais perfis metálicos

Pelos mesmos motivos apresentados na seção anterior, as transversinas, outro perfil complexo, também precisaram ser simplificadas para que pudessem ser avaliadas pelo programa. A Figura 20 demonstra um esquema da seção original das transversinas onde uma chapa de 30 polegadas de altura e 9/16 polegadas de espessura se junta, através de rebites, com 4 perfis em "L", dois em cima e dois embaixo, de ambas as pernas de 5 polegadas com espessura de meia polegada. A simplificação deste perfil também é mostrada mais a frente.

Figura 20 – Esquema da seção original da transversina



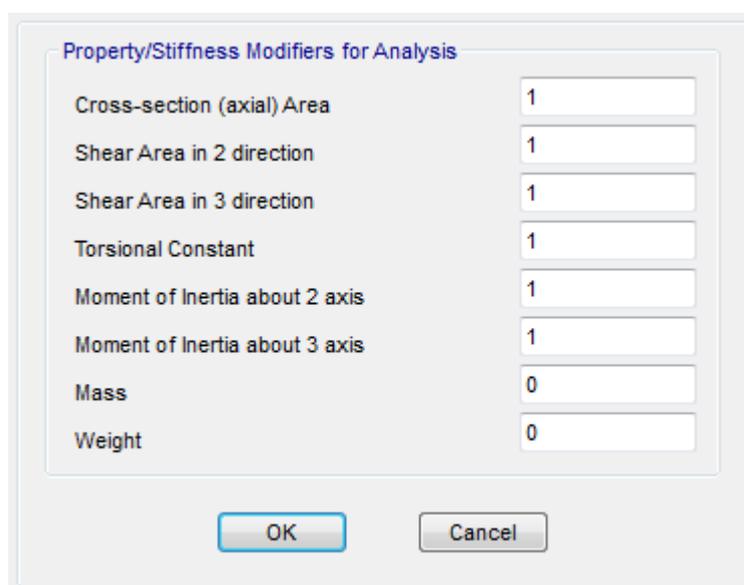
Fonte: Autor (2017)

O tipo de perfil da longarina mantém-se o mesmo, já que o programa entende a geometria de uma viga em Perfil “I”. O que ocorre neste caso é a conversão de duas longarinas em apenas uma longarina. De forma semelhante, a seção do contraventamento será mantida original, visto que é um simples perfil “L” com espessura de 3/8 de polegada e ambas as pernas de 4 polegadas, facilmente entendido pelo programa.

#### 3.1.4 Simplificações dos esforços atuantes nos elementos

Para representar as cargas nos nós da treliça, calculou-se a carga total da ponte, exceto longarinas e transversinas, e distribuiu-se igualmente ao longo dos nós da treliça, garantindo assim que apenas esforços de compressão e tração existam. Para que o programa não considerasse o peso próprio dos elementos da treliça, através da propriedade de modificação das características dos elementos (Figura 21) do programa, considerou-se que todos os elementos da estrutura têm massa e volume iguais a zero.

Figura 21 – Atribuição de peso zero nos elementos



Property/Stiffness Modifiers for Analysis	
Cross-section (axial) Area	1
Shear Area in 2 direction	1
Shear Area in 3 direction	1
Torsional Constant	1
Moment of Inertia about 2 axis	1
Moment of Inertia about 3 axis	1
Mass	0
Weight	0

Fonte: Autor (2017)

Os elementos componentes da treliça têm necessariamente cargas atuando apenas em seus nós, a fim de exercer sua função corretamente. Para garantir que

não ocorram esforços de flexão ou cortante nestas barras, foi utilizada a ferramenta de liberação de restrições da estrutura (Figura 22).

Figura 22 – Liberação da estrutura da treliça

	Release		Frame Partial Fixity Springs	
	Start	End	Start	End
Axial Load	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
Shear Force 2 (Major)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
Shear Force 3 (Minor)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
Torsion	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0 tonf-m/rad	
Moment 22 (Minor)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0 tonf-m/rad	0 tonf-m/rad
Moment 33 (Major)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0 tonf-m/rad	0 tonf-m/rad

Clear All Releases in Form

OK Close Apply

Fonte: Autor (2017)

### 3.1.5 Elementos com esforços distribuídos

Os elementos com esforços distribuídos são as vigas existentes na estrutura, sendo estas as duas longarinas e as nove transversinas. Nestes elementos não há necessidade da consideração de volume e massa igual a zero. Esta consideração foi assim utilizada para permitir um maior controle das forças atuantes na estrutura, e assim evitar que cargas fossem consideradas de forma incorreta. Para atribuir o peso próprio de tais elementos foi então realizada a aplicação de uma carga vertical distribuída em toda a extensão. Esta carga gera esforços de momento e cortante nas vigas, parâmetros importantes a serem considerados nos elementos oxidados.

### 3.1.6 Simplificação da oxidação nos elementos

A oxidação é um agente de degradação difícil de prever e altamente perigoso em estruturas metálicas. Podem ocorrer tanto na superfície do material quanto em seu interior, dificultando assim a perfeita análise da quantidade de metal perdida.

Na ponte em questão fizeram-se duas análises quanto à oxidação. Uma para a estrutura treliçada e outra para os demais componentes da ponte sendo que a quantidade aproximada de material perdida nos elementos foi considerada de três formas: branda onde os elementos mostraram uma deterioração mais fraca, média onde a deterioração está mais elevada e severa onde a perda de seção de área é tão grande que necessita de um estudo caso a caso.

Nas treliças, como se analisou apenas os esforços de tração e compressão, a consideração da perda devido à oxidação pode ser realizada através da simples diminuição da quantidade de área das seções dos elementos. Assim sendo, escolheram-se, dentro de um elemento da treliça, duas ou três seções com maior oxidação visual podendo então selecionar a pior seção, estimando a quantidade de área perdida pelo elemento.

Já nos elementos de vigas deve-se analisar a posição das oxidações a fim de verificar não só a quantidade de aço perdida, mas também a região onde houve a perda e assim simular esta perda no programa, diminuindo o tamanho externo dos elementos, bem como suas espessuras. Com a quantidade aproximada de aço atual existente na ponte, pode-se então voltar ao programa e gerar novos perfis metálicos simplificados, onde se verificou se os elementos continuaram atendendo os esforços existentes.

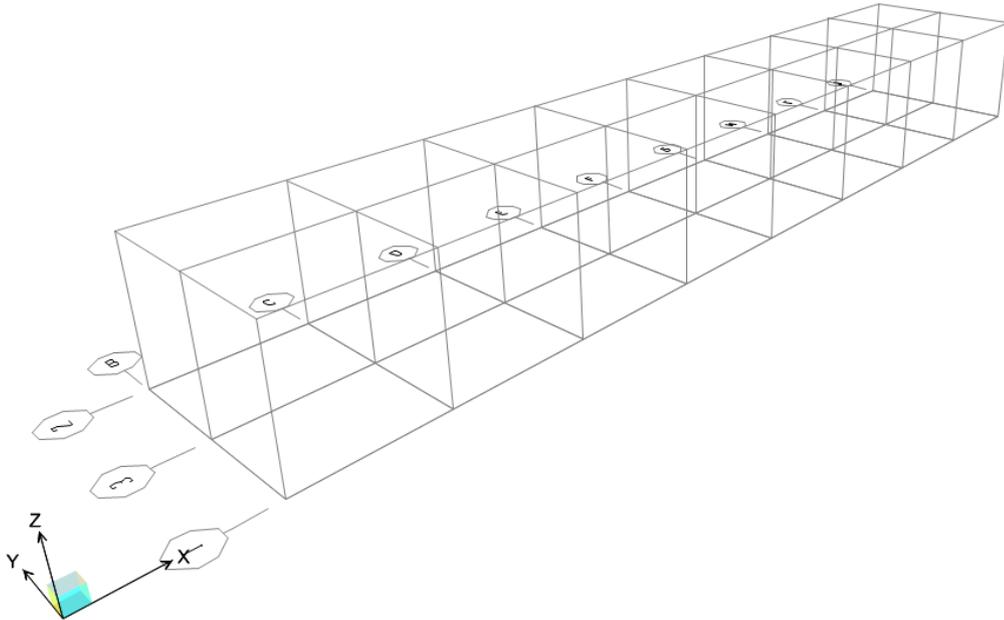
## 3.2 MODELAGEM DA ESTRUTURA ORIGINAL

Nesta seção é apresentada a linha de raciocínio seguida para a modelagem da estrutura no programa e para a simulação das condições de carregamentos. Nas subseções abaixo são apresentadas todas as etapas necessárias para chegar a etapa de análise de resultados.

### 3.2.1 Criação da grade base, do esqueleto da estrutura e atribuição dos apoios

O início da análise no programa dá-se pela criação de uma grade, Figura 23, onde foram inseridos nove planos no eixo X, com três metros de distância cada, três planos no eixo Y, um na origem, um em  $Y = 4,5$  metros e um no meio, a 2,25 metros da origem e dois planos no eixo Z, um na origem e outro a 2,995 metros da origem.

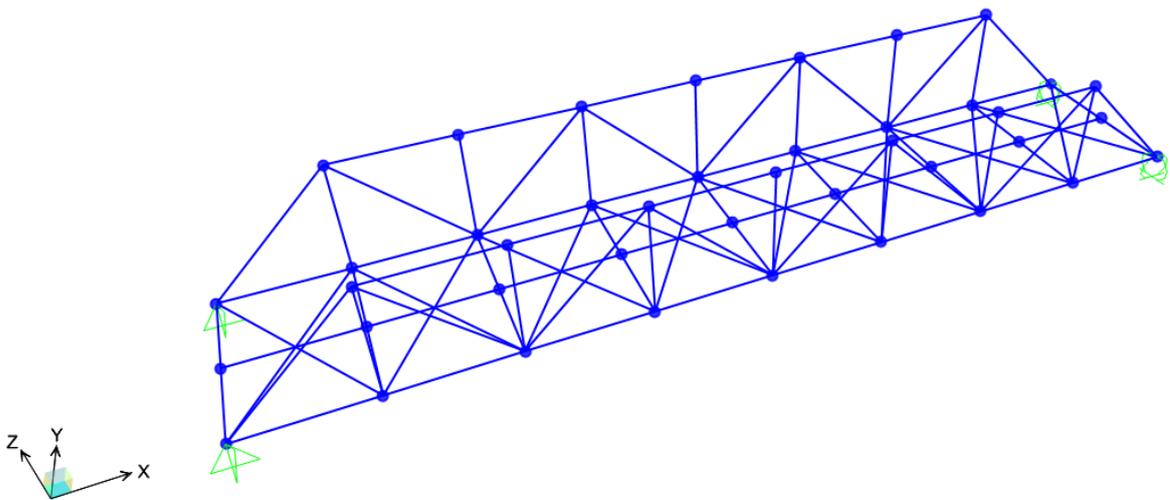
Figura 23 – Grade base da estrutura



Fonte: Autor (2017)

Com a grade base criada, iniciou-se o lançamento dos nós e então dos elementos tipo *frame* para configurar o esqueleto da ponte. O resultado pode ser visto na Figura 24, com um total de 41 nós e 84 elementos, sendo 28 banzos, 14 montantes, 16 diagonais, 9 transversinas, 1 longarina e 16 elementos para o contraventamento.

Figura 24 – Elementos, nós e apoios do esqueleto da estrutura



Fonte: Autor (2017)

Com o esqueleto da estrutura desenhado, podem-se definir os apoios que suportam a ponte. Como restrição, foram adicionados apoios duplos nos dois nós externos do plano X na origem (Figura 25) e apoios simples nos dois nós do plano X = 24 metros (Figura 26).

Figura 25 – Apoio duplo da ponte estudada



Fonte: Autor (2017)

Figura 26 – Apoio simples da ponte estudada

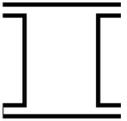
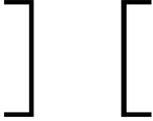


Fonte: Autor (2017)

### 3.2.2 Associação dos perfis metálicos à estrutura

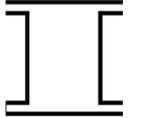
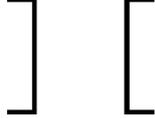
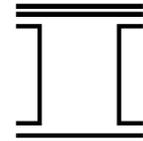
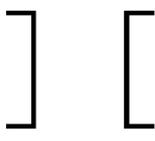
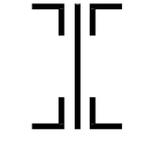
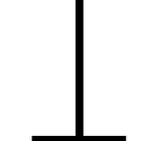
Devido às simplificações exigidas pelo programa, os perfis de projeto modificados podem ser visualizados no Quadro 3 abaixo. Optou-se por manter a mesma seção externa dos perfis de projeto e a mesma quantidade de seção de área, além de manter aproximadamente a mesma rigidez, variando assim a espessura e o tipo dos elementos. Nos elementos em duplo “C” manteve-se também o espaçamento entre os perfis.

Quadro 3 – Tabela dos perfis metálicos da treliça da estrutura original

Seção Original	Seção convertida	Perfil	Medidas convertidas
		1A, 1B, 2A, 2B, 7A, 7B, 8A, 8B	Espessura mesa 7/16 polegada Espessura alma 7/16 polegada
		9A, 9B, 16 <sup>a</sup> , 16B	Espessura mesa 1,02 polegada Espessura alma 7/16 polegada

continua

continuação

Seção Original	Seção convertida	Perfil	Medidas convertidas
		24A, 24B 25A, 25B, 28A, 28B 29A, 29B	Espessura mesa 0,96 polegada Espessura alma 7/16 polegada
		10A, 10B, 11A, 11B, 12A, 12B, 13A, 13B, 14A, 14B, 15A, 15B	Espessura mesa 1,04 polegada Espessura alma 0,60 polegada
		3A, 3B, 4A, 4B, 5A, 5B, 6A, 6B	Espessura mesa 0,92 polegada Espessura alma 0,81 polegada
		26A, 26B, 27A, 27B	Espessura mesa 1,55 polegada Espessura alma 7/16 polegada
		17A, 17B, 18A, 18B, 19A, 19B, 20A, 20B, 21A, 21B, 22A, 22B, 23A, 23B	Espessura mesa 0,39 polegada Espessura alma 0,57 polegada

Fonte: Autor (2017)

Para a longarina chegou-se a um perfil “I” de 18 polegadas de altura e 6 polegadas de largura, com espessura de alma de 2,35 polegadas e meia polegada de mesa, mantendo-se a mesa com a mesma espessura.

Já no caso das transversinas, manteve-se o formato de perfil “I” mas então de 30 polegadas de altura, 10,56 polegadas de largura, 0,90 polegadas de alma e 0,47 polegadas de mesa. O contraventamento também foi mantido, com oito seções de pares de perfis “L” de pernas de quatro polegadas e 3/8 de polegada de espessura já que o programa tem este perfil como um de seus perfis base.

### 3.2.3 Carregamento na Ponte

Os carregamentos na ponte são de dois tipos. Carregamentos de cargas permanentes e carregamentos de cargas variáveis. O processo de inclusão das

cargas na estrutura segue a mesma rotina operacional, variando peculiaridades conforme o tipo de carga. O processo básico inicia-se por definir um padrão de carga, nomeando e selecionando o tipo de carga. Nesta análise todas as cargas foram consideradas como cargas fixas, exceto a carga móvel.

Após definidos o nome e o tipo de carga, selecionaram-se os elementos onde a carga foi aplicada e de forma manual atribuiu-se a carga, seja ela pontual, distribuída ou móvel. O painel de opções para atribuição de forças do programa (Figura 27) é bem simples, exigindo do operador simples informações como a magnitude da força e em quais eixos ela age. Além disso, deve-se escolher o padrão de força criado anteriormente para que a força seja corretamente associada ao seu tipo de carregamento.

Figura 27 – Inserção de cargas no SAP2000

General		
Load Pattern	22 Vento 1	
Coordinate System	GLOBAL	

Forces		
Force Global X	0	kN
Force Global Y	4,14	kN
Force Global Z	0	kN
Moment about Global X	0	kN-m
Moment about Global Y	0	kN-m
Moment about Global Z	0	kN-m

Options	
<input checked="" type="radio"/>	Add to Existing Loads
<input type="radio"/>	Replace Existing Loads
<input type="radio"/>	Delete Existing Loads

Reset Form to Default Values

OK Close Apply

Fonte: Autor (2017)

### 3.2.3.1 Cargas permanentes

As cargas permanentes existentes na ponte são as cargas devido ao seu peso próprio e as cargas devido ao peso próprio da via permanente. O projeto original da ponte indica que o peso próprio da estrutura é de 39 toneladas. Este valor é assumido como peso real da estrutura, já que o peso próprio obtido pelo uso do SAP2000 não considera as uniões, rebites, chapas de rigidez e demais peças que não sejam as peças principais da estrutura. Além disso, calcular o peso real da estrutura manualmente exigiria um esforço injustificável já que se desconhece a quantidade e peso de todos os elementos.

Considerando-se a carga de via permanente, foram contabilizados os valores de trilhos, contratrilhos, placas de apoio, *tirefonds*, dormentes e talas de junção. O detalhamento dos pesos é demonstrado no Quadro 4, chegando-se a uma carga total distribuída de 3,81 kN/m. Entretanto, conforme orientação da norma, o valor mínimo a ser considerado e adotado foi o de 8 kN/m. Ainda, não se considerou o peso do lastro já que na ponte não se faz uso desta estrutura.

Quadro 4 – Pesos da via permanente

Material	Peso (kg)	Quantidade	Peso total
Dormente Ponte	90,00	48	4320,0
Placa de apoio	3,80	192	729,60
Tirefond 19 mm	0,37	768	284,16
Tala de junção	14,00	2	28,00
Retensor	1,04	24	24,96
Parafuso p/ tala	1,06	8	8,48
Trilho TR45	45,00	48	2160,00
Trilho TR37	37,00	48	1776,00
		Total (kg)	9331,20
		Total (kN)	91,51
		Total (kN/m)	3,81

Fonte: Autor (2017)

### 3.2.3.2 Cargas variáveis

As cargas variáveis atuantes na ponte são devidas ao carregamento de vento e ao movimento do comboio ferroviário, sendo elas provenientes do trem tipo, da carga de impacto lateral e da carga de frenagem e aceleração.

#### 3.2.3.2.1 Cargas de vento

Para as cargas de vento calculou-se dois valores diferentes, analisando-se a ponte sem comboio ferroviário, vento 1, e com comboio ferroviário, vento 2. No primeiro caso (vento1) a carga foi definida como a seção das áreas longitudinais da ponte mais via permanente multiplicada pela carga de vento distribuída para pontes vazias de 1,5 kN/m<sup>2</sup>. Para o cálculo da área lateral da ponte foram consideradas as áreas longitudinais das longarinas, banzos, montantes, diagonais, dormentes e trilhos. A representação dos cálculos é apresentada no Quadro 5 que já apresenta o valor da carga de vento para a ponte tanto de forma total 57,93 kN, como de forma pontual, 4,14 kN/nó, distribuída em cada um dos 14 nós da seção transversal da ponte, desconsiderando-se apenas os 2 nós dos apoios.

Quadro 5 – Cálculo da carga de vento 1

Elemento	Comprimento (m)	Largura (m)	Quantidade	Área (m <sup>2</sup> )
Longarina	24	0,4572	1	10,97
Banzo	3	0,2286	14	9,60
Dormente	24	0,1016	1	2,44
Diagonal	4,4	0,2286	8	8,05
Vertical	3,2	0,2286	7	5,12
Trilho	24	0,1016	1	2,44
Total				38,62
Coef. vento (kN/m <sup>2</sup> )				1,50
Carga Vento 1 (kN)				57,93
Carga Vento 1 (kN/nó)				4,14

Fonte: Autor (2017)

O valor da força de vento para a ponte com comboio ferroviário, vento 2, é calculado de forma semelhante. Segundo a NB2/61, fez-se a multiplicação de uma constante de vento para ponte carregada de 1,0 kN/m<sup>2</sup> pela soma das áreas do veículo e da seção da ponte abaixo do veículo. A área do veículo deve ser calculada pela multiplicação da extensão do veículo sobre a ponte, de 24,00 metros, pela altura do veículo, de 3,50 metros. Já a área da ponte considera o somatório das áreas da longarina, dos banzos inferiores, dos dormentes e trilhos. O resultado é apresentado no Quadro 6 onde o valor encontrado para o caso de vento 2, foi de 105,95 kN ou 7,57 kN/nó também distribuídos igualmente entre os 14 nós centrais.

Quadro 6 – Cálculo da carga de vento 2

Elemento	Comprimento (m)	Largura (m)	Quantidade	Área (m <sup>2</sup> )
Longarina	24,00	0,46	1,00	10,97
Banzo	3,00	0,23	8,00	5,49
Dormente	24,00	0,13	1,00	3,05
Trilho	24,00	0,10	1,00	2,44
Comboio	24,00	3,50	1,00	84,00
Total				105,95
Coef. vento (kN/m <sup>2</sup> )				1,00
Carga vento 2 (kN)				105,95
Carga vento 2 (kN/nó)				7,57

Fonte: Autor (2017)

### 3.2.3.2.2 Cargas verticais do comboio ferroviário

A antiga NBR 7189 permite a escolha entre quatro categorias de trem-tipo para as obras executadas em território brasileiro. Entretanto, a própria norma orienta que, em casos de verificação da estabilidade de estruturas, pode-se utilizar o trem tipo operacional e não necessariamente um dos quatro pré-estabelecidos.

Assim sendo, após a análise do comboio ferroviário atual da Empresa concessionária do trecho, que é de 80 toneladas ou 20 toneladas por eixo, optou-se por utilizar o TB240 como trem-tipo básico para os ensaios na estrutura visto que este é o TB mais semelhante ao existente na Empresa.

Esta carga merece atenção ao detalhamento já que é mais complexa quando comparada às cargas permanentes por ser uma carga móvel ferroviária. Este cuidado também se justifica por ser este o carregamento responsável pelos maiores esforços na estrutura.

A inclusão desta carga seguiu os mesmos passos das cargas permanentes, mas onde nos outros carregamentos foram colocadas forças pontuais ou distribuídas, neste caso fez-se uso de uma carga viva, ou seja, em movimento.

Para a inclusão do veículo de projeto, inicialmente fez-se o *path*, ou seja, a trajetória por onde a carga se moverá, selecionando-se assim a longarina. É aqui que se mostra de forma evidente a simplificação de duas longarinas para uma longarina mais robusta, já que o programa não entenderia a divisão do trem tipo em dois.

Com o *path* criado, pode-se então definir o trem tipo utilizado. Como mostrado na Figura 28, através da ferramenta veículos, faz-se a inclusão das forças uma a uma observando que a Norma orienta a utilização de uma carga distribuída de vagões no valor de 80 kN/m.

Figura 28 – Painel da ferramenta veículos

Vehicle name: TB240 Units: KN, m, C

Load Elevation

Loads

Load Length Type	Minimum Distance	Maximum Distance	Uniform Load	Axle Load
Trailing Load	Infinite		80	
Leading Load	Infinite		80	0,
Fixed Length	1,		0,	240,
Fixed Length	2,		0,	240,
Fixed Length	2,		0,	240,
Fixed Length	1,		0,	0,
Trailing Load	Infinite		80	

Buttons: Add, Insert, Modify, Delete

Vehicle Remains Fully In Path

Buttons: OK, Cancel

Fonte: Autor (2017)

Além das cargas distribuídas, existem quatro cargas pontuais que representam os eixos carregados do veículo, sendo espaçadas entre si por dois metros e entre as cargas distribuídas por um metro. A mesma norma recomenda o valor de 240 kN por eixo para este caso.

#### 3.2.3.2.3 Carga de impacto do comboio ferroviário

A carga de impacto do comboio ferroviário deve ser considerada como sendo uma carga de 20% do peso do eixo mais carregado do comboio, sendo então de 48 kN. Considerou-se esta carga pontualmente carregada no nó central da longarina, uma vez que o programa não permite a execução de cargas móveis no eixo Y.

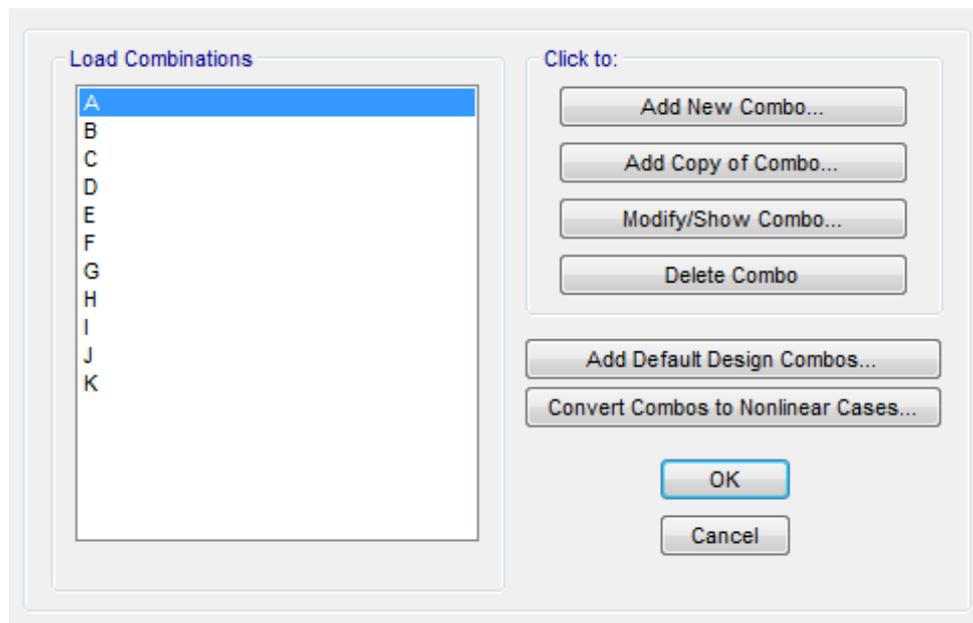
#### 3.2.3.2.4 Carga de frenagem e aceleração do comboio ferroviário

A carga devido à frenagem ou aceleração do comboio é considerada distribuída no trilho que está acima da longarina, cujo valor poderia ser 25% do peso dos eixos motores, sendo então 37,45 kN ou 15% da carga móvel para frenagem do comboio, sendo de 36,00 kN. O valor de 37,45 kN é então aplicado ao nó central da longarina.

#### 3.2.4 Combinações dos carregamentos

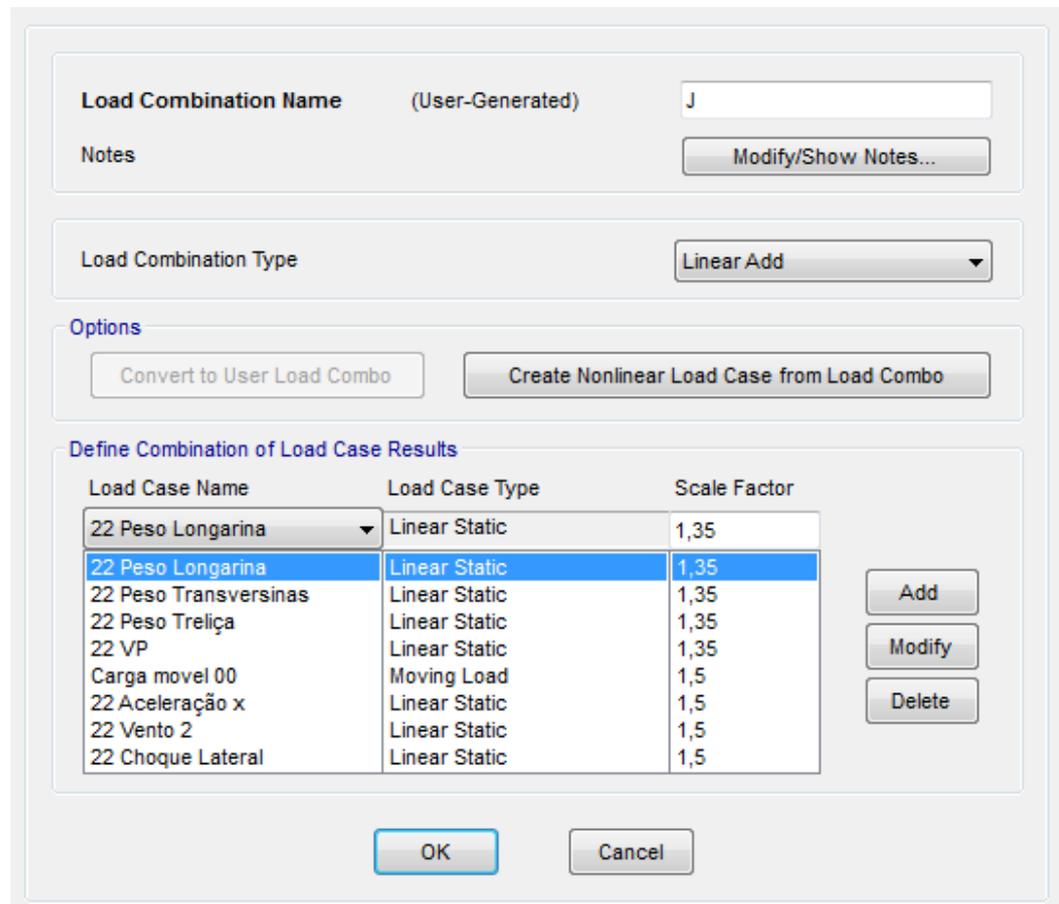
Após todas as forças serem inseridas, iniciou-se a etapa de definição das combinações das cargas. Como demonstrado nas Figura 29 e 30 e no Quadro 7, foram realizadas onze combinações.

Figura 29 – Combinações dos carregamentos



Fonte: Autor (2017)

Figura 30 – Carregamentos da combinação J



Fonte: Autor (2017)

Quadro 7 – Combinações das forças

Combinação	Forças	Majoração
A	Peso próprio das treliças	1,35
	Peso próprio da longarinas e transversinas	
	Peso da via permanente	
B	Peso próprio das treliças	1,35
	Peso próprio da longarinas e transversinas	
	Peso da via permanente	
	Carga de vento 1	1,50
C	Peso próprio das treliças	1,35
	Peso próprio da longarinas e transversinas	
	Peso da via permanente	
	Carga vertical devido ao comboio ferroviário	1,50
D	Peso próprio das treliças	1,35
	Peso próprio da longarinas e transversinas	
	Peso da via permanente	
	Carga vertical devido ao comboio ferroviário	1,50
	Carga de vento 2	1,50
E	Peso próprio das treliças	1,35
	Peso próprio da longarinas e transversinas	
	Peso da via permanente	
	Carga vertical devido ao comboio ferroviário	1,50
	Carga devida ao choque lateral	
F	Peso próprio das treliças	1,35
	Peso próprio da longarinas e transversinas	
	Peso da via permanente	
	Carga vertical devido ao comboio ferroviário	1,50
	Carga devida à aceleração do comboio	
G	Peso próprio das treliças	1,35
	Peso próprio da longarinas e transversinas	
	Peso da via permanente	
	Carga vertical devido ao comboio ferroviário	1,50

continua

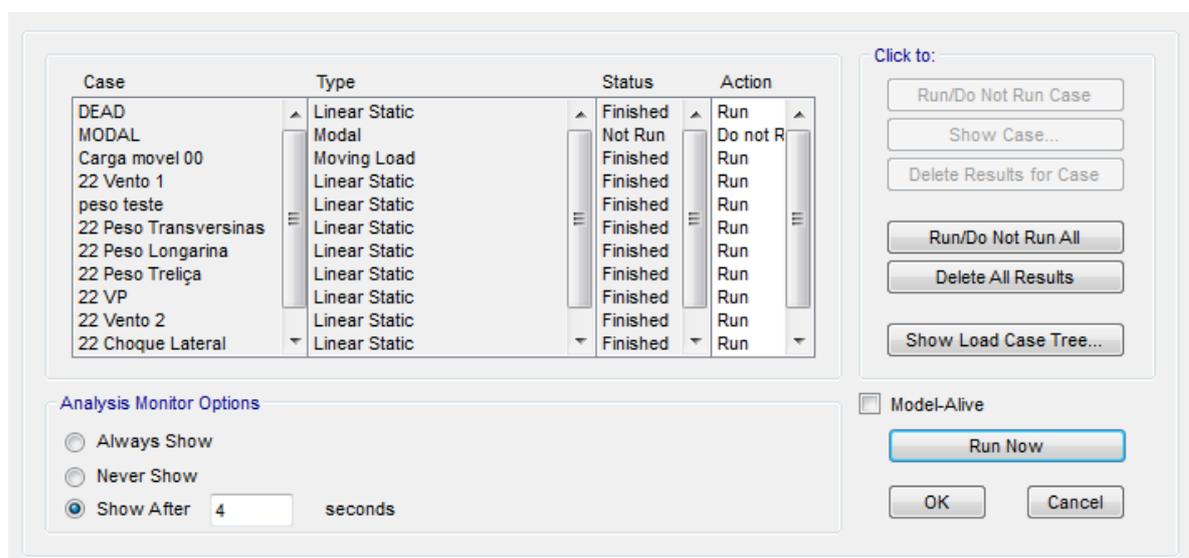
		continuação
Combinação	Forças	Majoração
G	Carga devida ao choque lateral	1,50
	Carga devida à aceleração do comboio	
H	Peso próprio das treliças	1,35
	Peso próprio da longarinas e transversinas	
	Peso da via permanente	
	Carga vertical devido ao comboio ferroviário	1,50
	Carga devida ao choque lateral	
Carga de vento 2		
I	Peso próprio das treliças	1,35
	Peso próprio da longarinas e transversinas	
	Peso da via permanente	
	Carga vertical devido ao comboio ferroviário	1,50
	Carga devida à aceleração do comboio	
Carga de vento 2		
J	Peso próprio das treliças	1,35
	Peso próprio da longarinas e transversinas	
	Peso da via permanente	
	Carga vertical devido ao comboio ferroviário	1,50
	Carga devida à aceleração do comboio	
Carga de vento 2		
Carga devida ao choque lateral		
K	Peso próprio das treliças	1,35
	Peso próprio da longarinas e transversinas	
	Peso da via permanente	
	Carga vertical devido ao comboio ferroviário parado	1,50
	Carga devida à aceleração do comboio	
Carga de vento 2		
Carga devida ao choque lateral		

Fonte: Autor (2017)

### 3.2.5 Execução da análise no programa

Após todas as combinações prontas, utilizou-se o comando de execução da análise e selecionaram-se as forças que foram utilizadas na análise da estrutura, como é demonstrado na Figura 31. Optou-se por executar todas as forças definidas para o caso, selecionando-se, posteriormente, as combinações que serão mostradas nos resultados da análise.

Figura 31 – Comando de execução da análise



Fonte: Autor (2017)

### 3.3 MODELAGEM DA ESTRUTURA OXIDADA

Nesta seção toda a análise foi realizada da mesma forma que a modelagem para a estrutura original, seguindo os mesmos padrões de carga, mesmas combinações e demais considerações. Também foram mantidos os mesmos pesos próprios da estrutura original a fim de manter a segurança na análise e também devido ao fato de que, como a corrosão na estrutura existe de forma pontual, seria difícil chegar à perda exata de massa. Apenas a conversão dos perfis originais em perfis oxidados foi realizada de forma diferente, existindo mais perfis oxidados devido à variabilidade encontrada no local. No dia 9 de junho de 2017 realizou-se a última visita à estrutura, onde se fez todo o levantamento dos elementos oxidados.

### 3.3.1 Perfis das longarinas, transversinas e contraventamento

Os perfis das longarinas, transversinas e contraventamentos apresentam pouca oxidação, sendo que na inspeção realizada não se encontrou nenhum perfil com alto grau de oxidação ou com perda significativa da seção de aço. Por este motivo, adotou-se uma perda da quantidade de área de 10% para todos estes elementos a fim de diminuir o erro caso haja alguma oxidação imperceptível entre a união dos perfis.

Na Figura 32 pode-se ver um conjunto destes elementos onde se observou que a oxidação presente nas peças é apenas superficial e parece ter escoado dos trilhos metálicos acima da estrutura.

Figura 32 – Longarina, transversina e contraventamento



Fonte: Autor (2017)

Após a consideração de perda da seção, chegou-se a um perfil “I” com as mesmas características do perfil original para a longarina (18 polegadas de altura, 6 polegadas de largura e 0,5 polegadas de espessura de mesa) mas com espessura de alma de 2,32 polegadas.

O contraventamento, com oito seções de pares de perfis “L” de pernas de quatro polegadas, teve a espessura da chapa reduzida para 0,336 de polegada de

espessura. Nas transversinas, mantiveram-se as mesmas medidas externas (30 polegadas de altura e 10,56 polegadas de largura), mas alterou-se a espessura da alma para 0,86 de polegadas e 0,42 de polegada para a espessura das mesas.

### 3.3.2 Perfis das treliças

Nos perfis das treliças encontrou-se o maior nível de oxidação, sendo que, diferente das vigas e contraventamento, todos os elementos possuem algum grau de oxidação sendo que a análise foi dividida quanto ao tipo de elemento, para facilitar a organização do trabalho.

#### 3.3.2.1 Diagonais

Na análise das diagonais considerou-se uma perda de pelo menos um quarto da seção original devido ao alto grau de oxidação nas mesas e almas (9A, 9B, 16A, 16B) e também à união entre a chapa e os perfis “L” (10A, 10B, 11A, 11B, 12A, 12B, 13A, 13B, 14A, 14B, 15A, 15B).

Além desta perda mínima, para os perfis 10A, 10B, 11B, 12B, 13B, 14A, 14B e 15A considerou-se uma redução de 50% da seção total de aço, não apenas um quarto, devido ao alto grau de oxidação na união das peças. As Figuras 33, da diagonal 10A, e 34, da diagonal 13B, demonstram o alto grau de oxidação existente nestes elementos.

Figura 33 – Diagonal 10A



Fonte: Autor (2017)

Figura 34 – Diagonal 13B

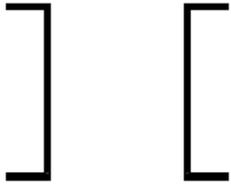


Fonte: Autor (2017)

Ainda, complementando a análise visual, identificou-se que em alguns perfis não existe mais parte das chapas de união entre os perfis “C”. Por este motivo, na análise da área foram retiradas metade das chapas de todos os perfis, seja pela inexistência ou então pelo alto grau de corrosão na união das chapas com os perfis.

Os resultados desta consideração são mostrados no Quadro 8, onde se manteve o desenho do perfil original (com as mesmas medidas externas), mas diminuíram-se as espessuras das almas e mesas.

Quadro 8 – Perfis oxidados das diagonais

Perfil oxidado	Perfil	Medidas convertidas
	9A, 9B, 16A, 16B	Espessura mesa 0,35 polegada Espessura alma 0,35 polegada
	11A, 12A, 13A, 15B	Espessura mesa 0,69 polegada Espessura alma 0,48 polegada
	10A, 10B, 11B, 12B, 13B, 14A, 14B 15A	Espessura mesa 0,46 polegada Espessura alma 0,30 polegada

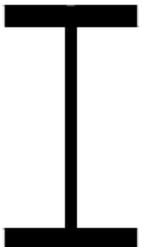
Fonte: Autor (2017)

### 3.3.2.2 Montantes

A análise das montantes seguiu de forma semelhante onde se considerou que os elementos 17A, 17B, 18A, 18B, 19A, 19B, 20A, 20B, 21A, 21B e 23B estão com uma oxidação branda, ou seja, sem forte oxidação aparente e sem furos ou rasgos na peça. Para estes elementos adotou-se uma perda de apenas 5% da seção de área. Já para os montantes 22A, 22B e 23A foram encontradas oxidações fortes que aparentam atravessar a chapa interna nas uniões rebitadas, considerando-se estes como sendo de média corrosão. Para estes elementos considerou-se uma perda de 20% devido à oxidação, pois também não foram encontrados rasgos ou furos nas peças e todas as mesas aparentam estar intactas.

No Quadro 9 são apresentadas as medidas finais para os 14 montantes da estrutura onde se mantiveram as medidas externas, variando apenas as espessuras das mesas e da alma.

Quadro 9 – Perfis oxidados dos montantes

Perfil oxidado	Perfil	Medidas convertidas
	17A, 17B, 18A, 18B, 19A, 19B, 20A, 20B, 21A, 21B, 23B	Espessura mesa 0,31 polegada Espessura alma 0,57 polegada
	22A, 22B e 23A	Espessura mesa 0,2 polegada Espessura alma 0,52 polegada

Fonte: Autor (2017)

O montante 23A (Figura 35) é um exemplo de uma seção em estado de corrosão médio, onde as mesas estão em ótimo estado, mas as chapas da alma apresentam oxidação em toda a união.

Figura 35 – Montante 23A



Fonte: Autor (2017)

### 3.3.2.3 Banzos inferiores

Os banzos inferiores foram os elementos onde a oxidação ficou mais evidente nas inspeções prévias da estrutura, sendo que nos banzos 1A e 8B houve acentuada perda da seção de aço devido à corrosão. No banzo 8B houve corte quase total do perfil “C” externo (Figura 36) e corrosão das mesas do perfil “C” interno. Na Figura 37 as mesas já aparecem em estado de restauração, mas a mesa superior foi completamente perdida e a mesa inferior teve aproximadamente 60% de sua seção oxidada.

Figura 36 – Banzo 8B “C” externo



Fonte: Autor (2017)

Figura 37 – Banzo 8B “C” interno



Fonte: Autor (2017)

No banzo 1A houve oxidação semelhante onde o perfil “C” interno também foi quase todo cortado pela oxidação. A Figura 38 mostra a oxidação vista por dentro do elemento, onde foi possível confirmar que apenas uma parte muito fina do elemento ainda existia. As mesas deste “C” também foram comprometidas e por isso considerou-se que todo o perfil foi perdido. O perfil “C” externo mostrou-se intacto.

Figura 38 – Banzo 1A interno (foto do interior da peça)



Fonte: Autor (2017)

Nos banzos 1B e 2B também foram encontrados oxidações avançadas. No banzo 1B houve perda de 30% da alma e 50% da mesa superior do perfil “C” externo (Figura x9). Já no perfil “C” interno (Figura X10) houve também perda de 30% da mesa inferior além da mesma perda para a alma. No banzo 2B houve 50% de perda de área em ambas as almas (Figuras 41 e 42) além de 30% de perda na mesa superior externa, 50% de perda na mesa superior interna e 30 % de perda na mesa inferior interna.

Figura 39 – Banzo 1B “C” externo



Fonte: Autor (2017)

Figura 40 – Banzo 1B “C” interno



Fonte: Autor (2017)

Figura 41 – Banzo 2B “C” externo



Fonte: Autor (2017)

Figura 42 – Banzo 2B “C” interno



Fonte: Autor (2017)

Nos demais banzos inferiores não foi identificada oxidação grave, mas como há uniões de chapas escondendo vários segmentos das seções, optou-se por utilizar uma redução na área dos elementos de 20%.

Os resultados das conversões são mostrados no Quadro 10, onde a seção externa dos perfis é mantida a mesma. A maior mudança está nos banzos 1A e 8B que, devido ao alto grau de oxidação, são representados com apenas um perfil “C” (1A) e uma chapa (8B), não mais um duplo “C”.

Quadro 10 – Perfis oxidados dos banzos inferiores

Perfil oxidado	Perfil	Medidas convertidas
	1A	Espessura mesa 0,44 polegada Espessura alma 0,44 polegada
	8B	Espessura alma 0,51 polegada
 	1B	Espessura mesa 0,26 polegada Espessura alma 0,31 polegada
	2B	Espessura mesa 0,31 polegada Espessura alma 0,22 polegada
	2A, 7A, 7B, 8A	Espessura mesa 0,35 polegada Espessura alma 0,35 polegada
	3A, 3B, 4A, 4B, 5A, 5B, 6A, 6B,	Espessura mesa 0,69 polegada Espessura alma 0,64 polegada

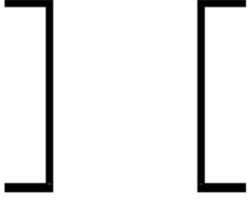
Fonte: Autor (2017)

### 3.3.2.4 Banzos superiores

Na análise dos banzos superiores (Figura 43) constatou-se uma forte oxidação escondida no interior dos elementos (Figura 44), sendo que em algumas regiões, como no banzo 27B, a corrosão aponta na superfície do material (Figura 45). Considerou-se então para todos os banzos superiores um alto grau de

oxidação, com uma perda de 30% da seção total de aço devido à incerteza do que há entre os perfis e as chapas. O resultado final dos perfis convertidos é demonstrado no Quadro 11 onde, assim como em todos os outros elementos, as medidas externas foram mantidas

Quadro 11 – Perfis oxidados dos banzos superiores

Perfil oxidado	Perfil	Medidas convertidas
	24A, 24B, 25A, 25B, 28A, 28B, 29A, 29B	Espessura mesa 0,66 polegada Espessura alma 0,31 polegada
	26A, 26B, 27A, 27B	Espessura mesa 1,06 polegada Espessura alma 0,31 polegada

Fonte: Autor (2017)

Figura 43 – Banzos superiores



Fonte: Autor (2017)

Figura 44 – Oxidação no interior do banzo superior 28B



Fonte: Autor (2017)

Figura 45 – Banzo 27B (esquerda) e 28B (direita)



Fonte: Autor (2017)

### 3.3.3 Resumo das oxidações

Nos Quadros 12 e 13 é apresentado um resumo com todas as oxidações estimadas para os elementos da ponte, que, além das oxidações específicas, comentadas anteriormente, variam de 5% a 50%.

Quadro 12 – Porcentagem das oxidações do contraventamento, longarinas e transversinas

Elemento	Oxidação (%)
Contraventamento	10
Longarina	10
Transversina	10

Fonte: Autor (2017)

Quadro 13 – Porcentagem das oxidações para as treliças

Elemento	Oxidação (%)	Elemento	Oxidação (%)	Elemento	Oxidação (%)
1A	Específica	11A	20	21A	5
1B	Específica	11B	50	21B	5
2A	20	12A	20	22A	20
2B	Específica	12B	50	22B	20
3A	20	13A	20	23A	20
3B	20	13B	50	23B	5
4A	20	14A	50	24A	30
4B	20	14B	50	24B	30
5A	20	15A	50	25A	30
5B	20	15B	20	25B	30
6A	20	16A	20	26A	30
6B	20	16B	20	26B	30
7A	20	17A	5	27A	30
7B	20	17B	5	27B	30
8A	20	18A	5	28A	30
8B	Específica	18B	5	28B	30
9A	20	19A	5	29A	30
9B	20	19B	5	29B	30
10A	50	20A	5		
10B	50	20B	5		

Fonte: Autor (2017)

## 4 ANÁLISE ESTRUTURAL

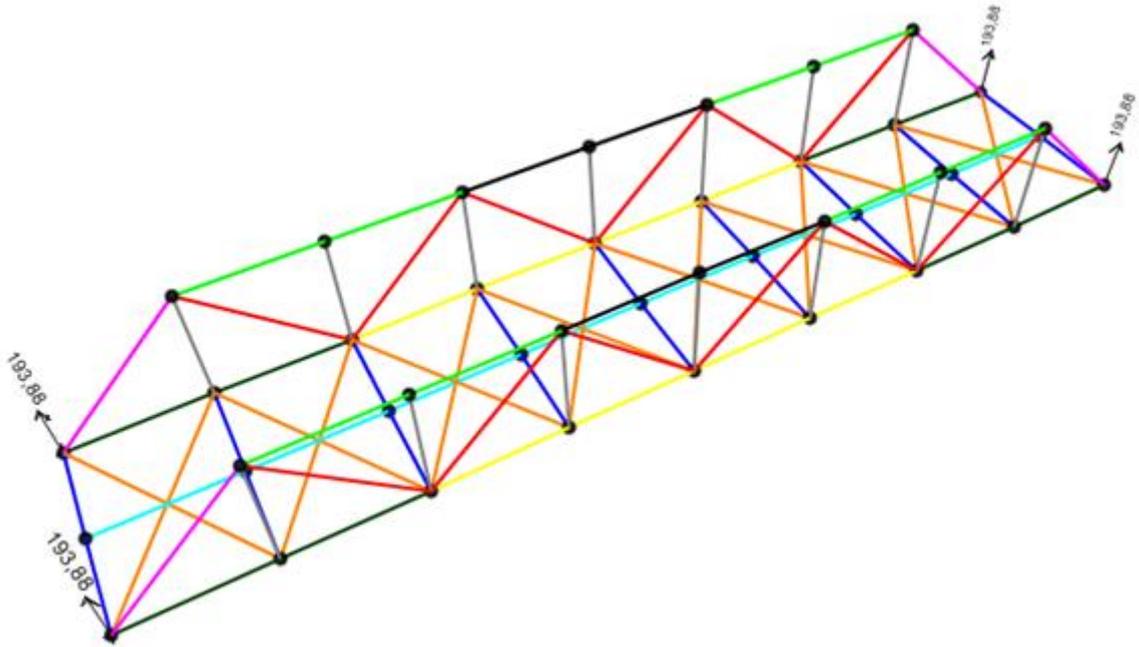
Assim como no capítulo anterior, a análise estrutural também foi dividida em duas, sendo a primeira parte para a ponte original e a segunda para a ponte oxidada. Após todas as seções, cargas, simplificações e considerações para a modelagem do sistema terem sido adicionadas no programa, iniciou-se então a análise das respostas fornecidas.

### 4.1 CONFIRMAÇÕES

A primeira análise realizada foi para confirmar as informações fornecidas pelo SAP2000, bem como para verificar as considerações realizadas no modelo. Para isso, fez-se uma análise semelhante, mas em um programa diferente. Utilizou-se o *software* Ftool onde, em uma treliça plana, lançaram-se os valores de carga distribuída e posteriormente do trem tipo, chegando-se a resultados semelhantes encontrados no SAP2000.

A Figura 46 mostra os valores encontrados para as reações nos quatro apoios quando apenas a carga permanente está sendo aplicada à ponte. Cada reação tem uma componente vertical de 193,88 kN já majorado por 1,35 – majoração para cargas permanentes – que não majorado seria de 143,61 kN.

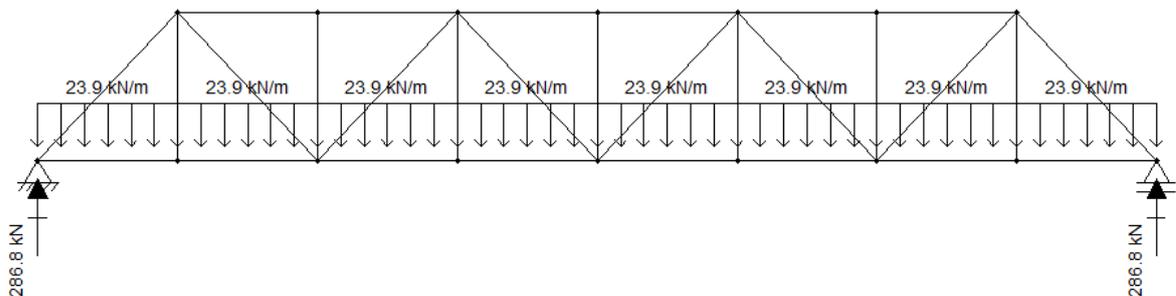
Figura 46 – Reações no programa SAP2000



Fonte: Autor (2017)

Já na Figura 47 demonstra-se a análise realizada com o Ftool, onde uma carga de 23,9 kN foi distribuída na longarina representando o peso próprio da estrutura, de 15,9 kN/m (oriundos da distribuição do peso de 39 toneladas em 24 metros), e o peso da via permanente, de 8 kN/m. As reações de 286,8 kN representam o dobro das reações reais, já que todo o carregamento está distribuído em uma única treliça, diferente do caso real, onde há duas treliças. O valor real de cada reação seria então de 143,4 kN, valor muito próximo ao encontrado pela análise no SAP200.

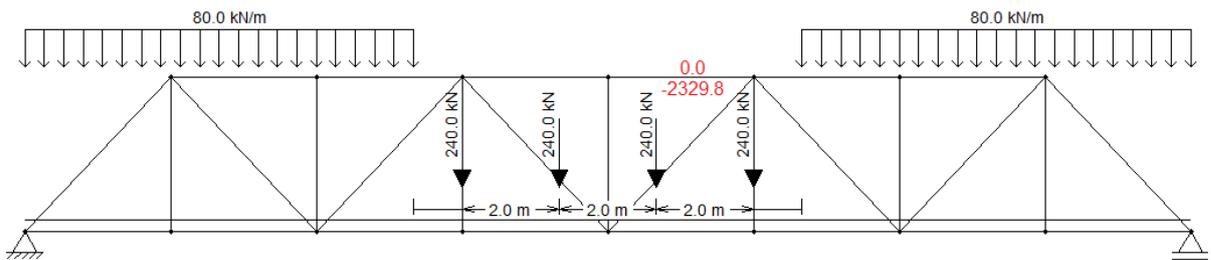
Figura 47 – Reações no programa Ftool



Fonte: Autor (2017)

De forma semelhante, foi introduzido o trem tipo no programa Ftool (Figura 48), onde se chegou a cargas nos banzos superiores centrais de compressão mínima e máxima de 0,0 kN e -2329,8 kN, respectivamente. Da mesma forma, estas cargas devem ser divididas por dois, chegando-se a um valor de compressão máxima de -1164,9 kN.

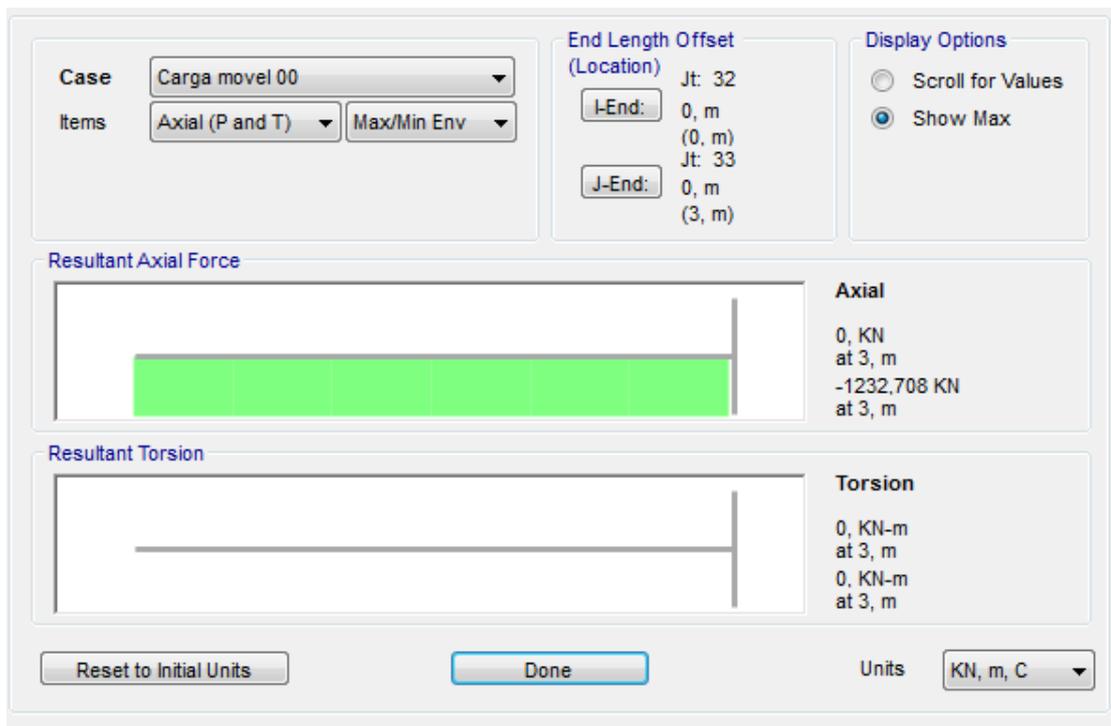
Figura 48 – Trem tipo no programa Ftool



Fonte: Autor (2017)

No SAP2000, os resultados (Figura 49) de compressão para o mesmo banço são de 0 e -1232,71 kN para mínimo e máximo, respectivamente, uma diferença de apenas 5,12% o que também permite aceitar os carregamentos como corretos.

Figura 49 – Trem tipo no programa SAP2000



Fonte: Autor (2017)

Ainda confirmando as considerações, analisaram-se as deformadas dos nós dos elementos onde a maior deformação para o carregamento que mais exige a estrutura, combinação J, foi de apenas 4,2 cm no nó central da longarina. Trata-se de uma deformação pequena e realista, considerando-se uma estrutura metálica e carregada de tal forma. Ainda, não é uma deformação perigosa para o comboio ferroviário, quando comparado às deformações existentes ao longo da via permanente, devido às folgas entre dormentes e lastros, por exemplo.

#### 4.2 VERIFICAÇÃO DAS CARGAS AXIAIS NOS ELEMENTOS DAS TRELIÇAS PARA A PONTE ORIGINAL

Os elementos onde a carga axial é mais importante são aqueles que fazem parte da estrutura da treliça, sendo eles os banzos, montantes e diagonais. De acordo com Pfeil (2009), a tensão de escoamento do aço ASTM-A36 é de 250 MPa. Assim sendo, verificou-se, através do SAP2000, o valor das cargas para todos estes elementos e, dividindo por suas respectivas áreas, constatou-se que todos os elementos da estrutura respeitam a condição de escoamento do aço ASTM-A36. Nos Quadros 14, 15 e 16 demonstraram-se as cargas axiais e tensões bem como as áreas e a combinação que mais exigem os elementos tracionados, comprimidos e alternados, respectivamente.

Quadro 14 – Resultados nos elementos originais tracionados

Frame	Combinação	Tração (kN)	Área (m <sup>2</sup> )	Tensão (MPa)
01A	J	983,58	9,91E-03	99,21
01B	F	983,58	9,91E-03	99,21
02A	G	1004,97	9,91E-03	101,37
02B	I	1012,53	9,91E-03	102,13
03A	G	2142,08	1,47E-02	145,24
03B	J	2172,31	1,47E-02	147,29
04A	F	2168,93	1,47E-02	147,06
04B	J	2237,03	1,47E-02	151,68
05A	F	2199,02	1,47E-02	149,10
05B	J	2344,09	1,47E-02	158,94
06A	F	2232,37	1,47E-02	151,36
06B	J	2493,56	1,47E-02	169,07
07B	J	1545,74	9,91E-03	155,91
08B	J	1729,86	9,91E-03	174,48
10A	J	1040,34	8,70E-03	119,59
10B	F	1040,32	8,70E-03	119,58
15A	J	1041,95	8,70E-03	119,77
15B	F	1041,92	8,70E-03	119,77
17A	D	323,87	7,98E-03	40,57
17B	E	323,87	7,98E-03	40,57
19A	D	327,54	7,98E-03	41,02
19B	E	327,53	7,98E-03	41,02
21A	D	327,55	7,98E-03	41,03
21B	C	327,53	7,98E-03	41,02
23A	E	323,87	7,98E-03	40,57
23B	E	323,87	7,98E-03	40,57

Fonte: Autor (2017)

Quadro 15 – Resultados nos elementos originais comprimidos

Frame	Combinação	Compressão (kN)	Área (m <sup>2</sup> )	Tensão (MPa)
09A	D	-1397,37	9,91E-03	-140,95
09B	C	-1397,36	9,91E-03	-140,94
11A	D	-721,64	8,70E-03	-82,95
11B	C	-721,62	8,70E-03	-82,95
14A	D	-721,64	8,70E-03	-82,95
14B	C	-721,62	8,70E-03	-82,95
16A	D	-1397,37	9,91E-03	-140,94
16B	J	-1395,45	9,91E-03	-140,75
18A	A	-12,31	7,98E-03	-1,54
18B	A	-12,31	7,98E-03	-1,54
20A	A	-12,31	7,98E-03	-1,54
20B	A	-12,31	7,98E-03	-1,54
22A	A	-12,31	7,98E-03	-1,54
22B	A	-12,31	7,98E-03	-1,54
24A	H	-1696,74	1,37E-02	-124,17
24B	F	-1696,71	1,37E-02	-124,17
25A	H	-1696,74	1,37E-02	-124,17
25B	F	-1696,71	1,37E-02	-124,17
26A	H	-2256,54	1,79E-02	-126,08
26B	F	-2256,50	1,79E-02	-126,07
27A	H	-2256,54	1,79E-02	-126,08
27B	F	-2256,50	1,79E-02	-126,07
28A	H	-1696,79	1,37E-02	-124,18
28B	F	-1696,76	1,37E-02	-124,17
29A	H	-1696,79	1,37E-02	-124,18
29B	F	-1696,76	1,37E-02	-124,17

Fonte: Autor (2017)

Quadro 16 – Resultados nos elementos originais onde há tração e compressão

Frame	Combinação	Força	Magnitude	Área (m <sup>2</sup> )	Tensão (MPa)
07A	F	Tração	1153,29	9,91E-03	116,33
07A	D	Compressão	-101,97	9,91E-03	-10,29
08A	F	Tração	1190,79	9,91E-03	120,11
08A	D	Compressão	-199,13	9,91E-03	-20,09
12A	J	Tração	448,93	8,70E-03	51,60
12A	C	Compressão	-198,84	8,70E-03	-22,86
12B	F	Tração	448,92	8,70E-03	51,60
12B	D	Compressão	-198,84	8,70E-03	-22,86
13A	F	Tração	449,24	8,70E-03	51,64
13A	D	Compressão	-198,84	8,70E-03	-22,86
13B	J	Tração	449,25	8,70E-03	51,64
13B	C	Compressão	-198,84	8,70E-03	-22,86

Fonte: Autor (2017)

#### 4.3 VERIFICAÇÃO DAS CARGAS AXIAIS NOS ELEMENTOS DAS TRELIÇAS PARA A PONTE OXIDADA

Após realizada a análise da perda de área na seção dos elementos, pode-se construir os Quadros 17, 18 e 19 onde foram demonstradas as novas cargas e tensões nos elementos. Diferente da estrutura original, para os perfis oxidados as tensões ficaram próximas da tensão limite de escoamento do aço.

Quadro 17 – Resultados nos elementos oxidados tracionados

Frame	Combinação	Tração (kN)	Área (m <sup>2</sup> )	Tensão (MPa)
01A	F	946,65	3,94E-03	240,27
01B	F	1039,67	4,35E-03	239,02
02A	F	1029,04	7,93E-03	129,77
02B	I	1029,04	4,35E-03	236,57
03A	F	2473,98	1,18E-02	209,68
03B	I	2077,213	1,18E-02	176,03
04A	F	2324,17	1,18E-02	196,99
04B	I	2114,13	1,18E-02	179,18
05A	F	2193,13	1,18E-02	185,87
05B	J	2218,62	1,18E-02	188,04
06A	F	2213,63	1,18E-02	187,62
06B	J	2179,77	1,18E-02	184,75
07B	J	1545,74	7,93E-03	194,92
08B	J	1652,68	3,94E-03	418,98
10A	J	1040,34	4,35E-03	239,16
10B	F	1039,68	4,35E-03	239,01
15A	J	946,65	4,35E-03	217,62
15B	J	966,21	6,96E-03	138,82
17A	E	319,73	7,58E-03	42,18
17B	E	337,79	7,58E-03	44,54
19A	H	337,73	7,58E-03	44,53
19B	E	333,49	7,58E-03	43,97
21A	H	333,43	7,58E-03	43,96
21B	H	321,52	7,58E-03	42,39
23A	C	321,46	6,38E-03	50,39
23B	C	319,69	7,58E-03	42,15

Fonte: Autor (2017)

Quadro 18 – Resultados nos elementos oxidados comprimidos

Frame	Combinação	Compressão (kN)	Área (m <sup>2</sup> )	Tensão (MPa)
09A	J	-1684,01	7,93E-03	-212,32
09B	F	-1683,95	7,93E-03	-212,31
11A	H	-730,03	6,96E-03	-104,89
11B	J	-729,85	4,35E-03	167,8
14A	H	-724,56	4,35E-03	-166,57
14B	H	-724,46	4,35E-03	-166,55
16A	A	-1387,88	7,93E-03	-175,98
16B	C	-1387,85	7,93E-03	-174,98
18A	A	-12,31	7,58E-03	-1,62
18B	J	-12,31	7,58E-03	-1,62
20A	J	-12,31	7,58E-03	-1,62
20B	A	-12,31	7,58E-03	-1,62
22A	A	-12,31	6,39E-03	-1,93
22B	C	-12,31	6,39E-03	-1,93
24A	C	-1683,99	9,57E-03	-175,97
24B	H	-1388,58	9,57E-03	-145,17
25A	J	-1686,57	9,57E-03	-176,33
25B	F	-1683,95	9,57E-03	-176,05
26A	J	-1686,57	1,25E-02	-134,62
26B	F	-2248,11	1,25E-02	-179,44
27A	C	-2248,20	1,25E-02	-179,86
27B	F	-2248,11	1,25E-02	-179,44
28A	A	-1686,51	9,57E-03	-176,32
28B	F	-1686,51	9,57E-03	-176,32
29A	A	-1686,51	9,57E-03	-176,32
29B	F	-1686,51	9,57E-03	-176,32

Fonte: Autor (2017)

Quadro 19 – Resultados nos elementos oxidados onde há tração e compressão

Frame	Combinação	Força	Magnitude (kN)	Área (m <sup>2</sup> )	Tensão (MPa)
07A	F	Tração	1122,31	7,97E-03	140,80
07A	H	Compressão	-228,90	7,97E-03	-28,72
08A	F	Tração	1130,65	7,97E-03	141,85
08A	H	Compressão	-392,45	7,97E-03	-49,23
12A	J	Tração	441,43	6,96E-03	63,43
12A	C	Compressão	-200,33	4,35E-03	-46,05
12B	F	Tração	441,39	4,35E-03	101,47
12B	H	Compressão	-200,30	4,35E-03	-46,05
13A	F	Tração	442,75	6,96E-03	63,62
13A	H	Compressão	-199,41	6,96E-03	-28,65
13B	F	Tração	442,67	4,35E-03	101,77
13B	H	Compressão	-199,39	4,35E-03	-45,84

Fonte: Autor (2017)

O elemento 8B, devido à corrosão em uma das almas e mesas, apresenta uma tensão maior que os 250 MPa do material, ficando com 419 MPa. Justificou-se a estabilidade da estrutura devido às duas chapas de rigidez de 0,5 polegada existentes uma em cima e outra abaixo no perfil, ambas na região onde houve o corte pela oxidação (Figura50), que além de ajudarem a realizar a conexão com o nó, auxiliam na transmissão das cargas entre os perfis “C”.

Figura 50 – Chapas de rigidez banzo 8B



Fonte: Autor (2017)

#### 4.4 ANÁLISE DA FLAMBAGEM GLOBAL

Depois de encontrados os valores de compressão máximos e suas respectivas tensões máximas, realizou-se o estudo da flambagem nos elementos mais carregados a fim de verificar esta condição. A análise da flambagem não foi realizada para a ponte original visto que a ponte oxidada apresenta características mais críticas. As chapas de união que enrijecem a estrutura não foram contabilizadas, exceto nos banzos superiores, devido ao alto grau de oxidação, tanto nas chapas em si como nas mesas dos elementos unidos. Nos banzos superiores realizou-se os cálculos dos momentos de inércia e dos raios de giração com a chapa de união em cima do perfil duplo “C”.

Para a determinação do raio de giração das peças foi utilizada a ferramenta MASSPROP do *software* AutoCAD sobre o desenho de cada elemento com suas áreas oxidadas.

O cálculo da flambagem foi iniciado calculando-se o índice de esbeltes através da divisão do  $l_{ef}$ , comprimento da própria peça, pelo menor raio de giração (i). Em seguida, encontrou-se o índice de esbeltes reduzido que foi utilizado no cálculo do índice redutor de carga (X). O índice redutor de carga finalmente foi utilizado, multiplicado pela área da seção ( $A_g$ ) e pela tensão de escoamento do aço ( $f_y$ ) e dividido pelo índice de minoração do aço (1,1), chegando-se ao valor do esforço de cálculo resistente ( $N_{c,rd}$ ). Os resultados da análise da flambagem são mostrados no Quadro 20 onde, necessariamente, a força de compressão deve ser menor que o esforço de cálculo resistente.

Quadro 20 – Esforços resistentes de cálculo

Elemento	N <sub>rcd</sub> (kN)	Compressão (kN)	Tensão (MPa)
26B, 27B	2621,365	-2248,107	-179,437
25A	2111,259	-1686,565	-176,327
09A, 09B	1723,121	-1684,012	-212,321
16B	1723,121	-1387,847	-174,981

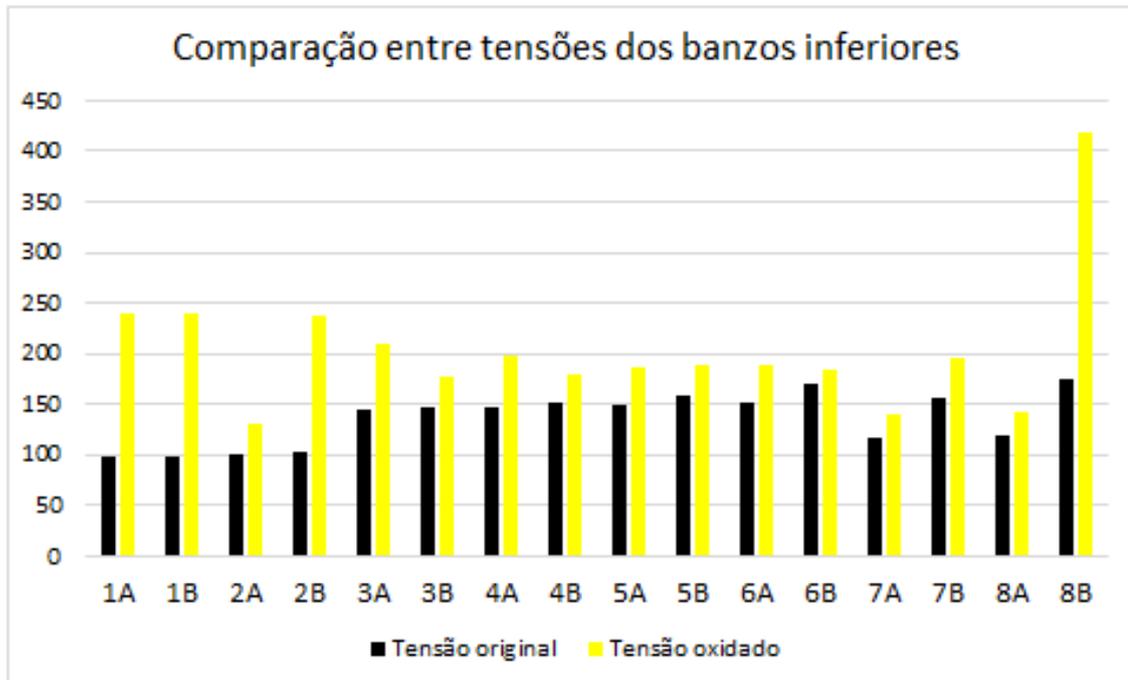
Fonte: Autor (2017)

Os elementos que apresentam menor margem de segurança quanto à flambagem são 09A e 09B existindo apenas 2,27% de diferença entre o valor limitante e o valor atuante na estrutura.

#### 4.5 COMPARAÇÃO DA ESTRUTURAL ORIGINAL E OXIDADA

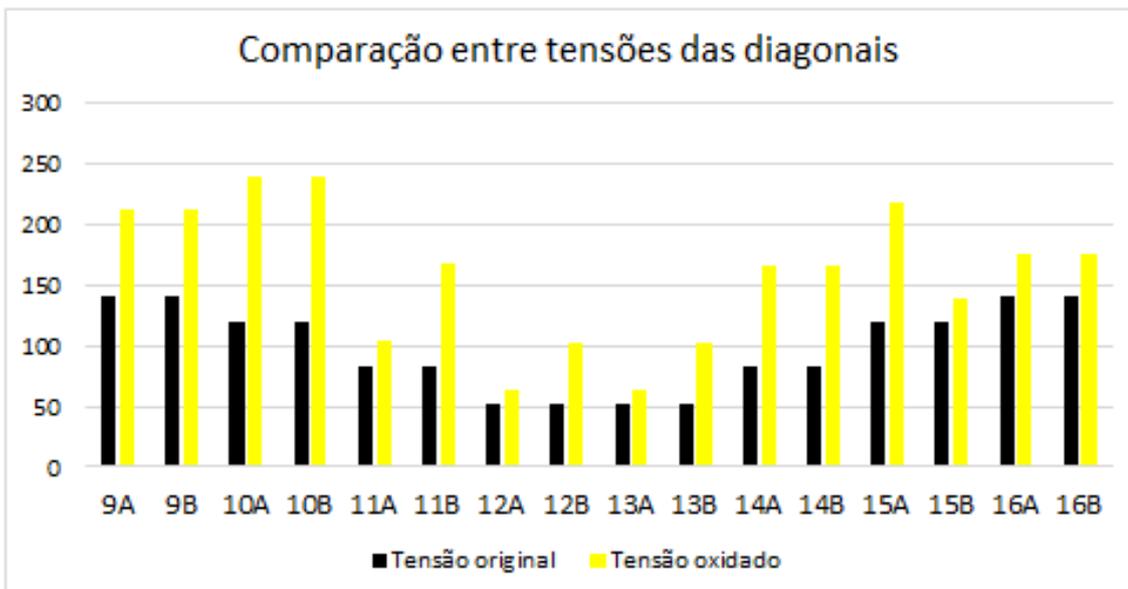
Após as estruturas original e oxidada terem sido analisadas, pode-se realizar uma comparação da tensão entre os perfis originais e oxidados, conforme mostrado nas Figuras 51, 52, 53 e 54 para os banzos inferiores, diagonais, montantes e banzos superiores, respectivamente. Nas colunas em azul têm-se as tensões dos perfis originais e nas colunas em vermelho as tensões dos perfis oxidados.

Figura 51 – Comparação entre tensões dos banzos inferiores



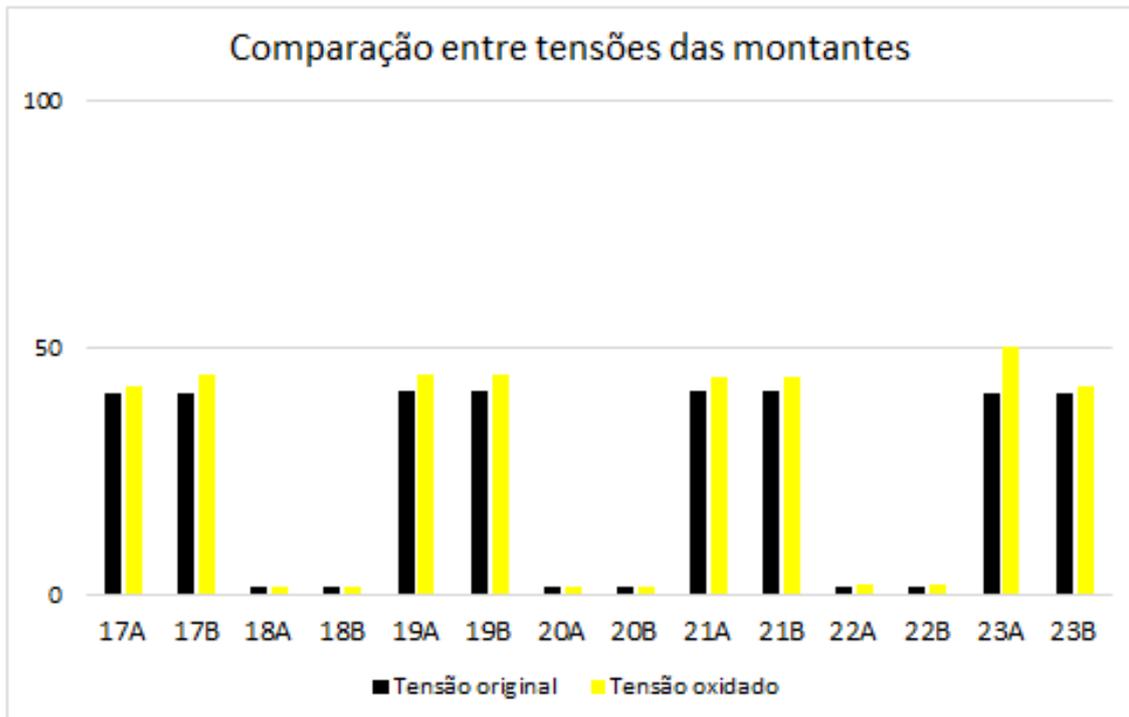
Fonte: Autor (2017)

Figura 52 – Comparação entre tensões das diagonais



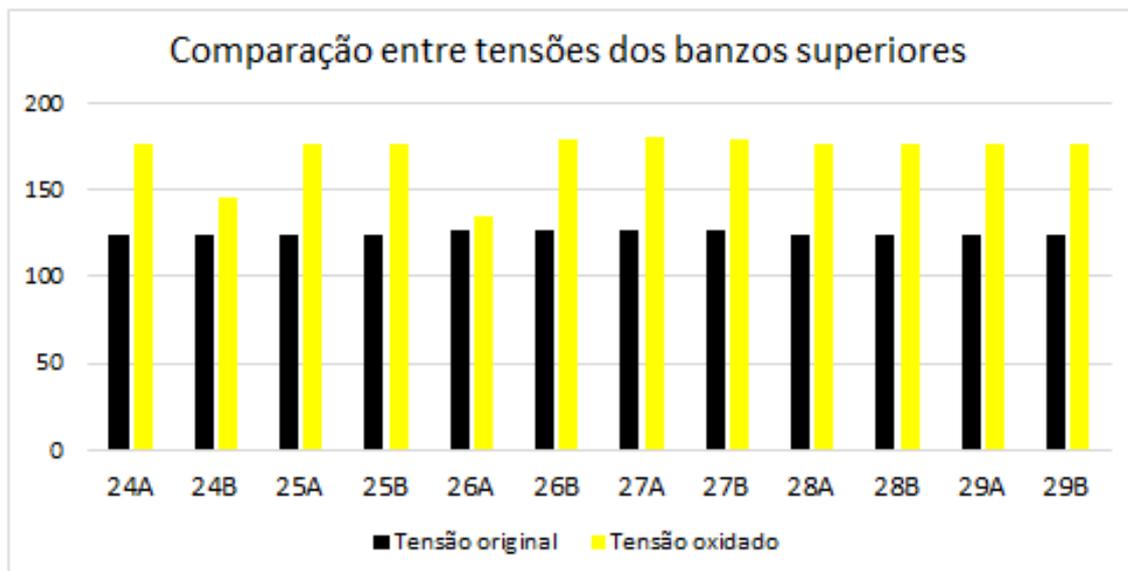
Fonte: Autor (2017)

Figura 53 – Comparação entre tensões dos montantes



Fonte: Autor (2017)

Figura 54 – Comparação entre tensões dos banzos superiores



Fonte: Autor (2017)

#### 4.6 PONTOS CRÍTICOS DA ESTRUTURA

Os pontos críticos da estrutura são aqueles onde o grau de incerteza quanto à oxidação são altos, onde há uma proximidade muito grande entre as tensões aplicadas e as suportadas ou ainda onde houve grande perda da seção metálica. Identificou-se na análise que todos os banzos superiores da treliça têm alto grau de incerteza quanto à real porcentagem de oxidação, especialmente por ser uma região de difícil acesso e manutenção. Nos banzos 1A, 1B, 2B e 8B identificou-se forte perda da seção metálica devido à oxidação. Já nas diagonais 15A, 10B e 10A além da oxidação avançada têm-se também tensões muito próximas à tensão de escoamento da ponte.

## 5 CONCLUSÕES

O presente trabalho abordou o estudo sobre a ponte ferroviária treliçada no município de Içara cujo objetivo foi analisar a estrutura em sua forma original e oxidada. O uso do software SAP2000 permitiu que o estudo estrutural fosse realizada de forma mais rápida e eficiente, já que, além das cargas permanentes, foi considerado um carregamento móvel sobre a estrutura.

A partir da análise da ponte oxidada, observou-se que todos os elementos estavam dentro da tensão admissível do material, exceto o elemento 8B. Este elemento é de fundamental importância para representar o alto grau de oxidação da estrutura. Também mostra que a simplificação de ignorar as chapas de união pontuais ao longo da barra, que fortalecem a seção, não demonstra sua real rigidez, já que parte da solicitação é transmitida ao nó através de uma destas chapas. Por outro lado, o contraventamento, as longarinas e as transversinas estão todas em ótimo estado de manutenção, merecendo apenas uma vistoria comprobatória e eventuais manutenções leves.

Ainda, para concluir a análise da estrutura, recomenda-se a manutenção pontual nas regiões mais críticas apresentadas neste trabalho e também de forma global para interromper o processo de oxidação nos demais elementos. Assim, pode-se manter o uso da estrutura de forma segura.

Por fim, ao realizar este trabalho e devido aos resultados encontrados, de forma a melhorar a infraestrutura do país, sugere-se, para futuros trabalhos, que seja realizada uma análise mecânica destrutiva de alguns elementos oxidados da treliça para comparar e validar os resultados teóricos aqui encontrados. Além disso, é importante determinar e prever o porquê das oxidações serem mais graves nas uniões entre os perfis e também determinar a influência sobre a estrutura da qualidade da água do córrego.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7188: Carga móvel rodoviária e de pedestres em pontes, viadutos, passarelas e outras estruturas.** Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7189:** Cargas móveis para projeto estrutural de obras ferroviárias. 1 ed. Rio de Janeiro: 1983. 2 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NB2: Projeto e execução de pontes de concreto armado.** Rio de Janeiro, 1961.

BRINA, H L. **Estradas de Ferro.** Belo Horizonte: UFMG, 1983. 216 p.

CURY, M. V. Q. **Escolha entre a bitola larga brasileira e a bitola internacional padrão para a linha 4 do metrô do rio de janeiro.** Rio de Janeiro, 2011.

Garopaba. **Confira o novo cartão postal de Santa Catarina: a Ponte Anita Garibaldi.** 2016. Disponível em: <<http://www.garopaba10.com.br/noticias>>. Acesso em: 14 maio 2017.

G1. **Apagão na Ilha de SC completa 10 anos e população relembra caos.** 2013. Disponível em: <<http://g1.globo.com/sc/santa-catarina/noticia/2013/10/apagao-na-ilha-de-sc-completa-10-anos-e-populacao-relembra-caos.html>>. Acesso em: 12 abr. 2017.

KARLSEN, G. G. et al. **Wooden structures.** Moscow: Mir Publishers, 1967. 638p.

LAZZARI, P. M. **Estudo de Projeto Estrutural de Ponde Rodoviária em Arco Inferior em Concreto Armado no Município de Saudades/SC.** 2008. 119 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

MAGALHAES, P. **Brasil: Ferrovia Transnordestina.** 2010. Disponível em: <<http://www.skyscrapercity.com/showthread.php?p=92739821>>. Acesso em: 25 abr. 2017.

MATTOS, T. S.. **Programa Para Análise De Superestruturas De Pontes De Concreto Armado E Protendido.** 2001. 156 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001.

MORAES, V. M. **Ponte mista de madeira – concreto em vigas treliçadas de madeira**. Tese (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2007.

PINTO, P M. **Curso de especialização em transporte ferroviário de carga**. 2012. 63 f. Monografia (Especialização) - Curso de Programa de Pós- Graduação em Transporte Ferroviário de Carga, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2012.

PFEIL, W. Pontes em Concreto Armado. Volume 1: Elementos de Projeto. Solicitações. Superestrutura. 3ª ed. Rio de Janeiro, LTC, 1983.

SABIA, V. R. **Espetaculares pontes móveis**. 2013. Disponível em: <<http://www.vocerealmentesabia.com/2013/09/espetaculares-pontes-moveis.html>>. Acesso em: 14 abr. 2017.

WIKIPÉDIA. **Içara**. 2017. Disponível em: <<https://pt.wikipedia.org/wiki/Içara>>. Acesso em: 01 jun. 2017.