

5 Resultados

5.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo são apresentados os resultados das análises descritas no capítulo anterior. Essas análises tiveram o objetivo de validar o método de distribuição transversal de solicitações da AASHTO LRFD em pontes de vigas de concreto e de aço em comparação com o MEF e com outros métodos simplificados.

Todas as análises em elementos finitos foram realizadas considerando-se as recomendações das normas pertinentes como a NBR 6118 (2007) e a NBR 7188 (2013). No total, 168 pontes foram modeladas e analisadas dentro do programa *Autodesk Robot* 2013, sendo 84 com vigas de concreto e 84 com vigas metálicas. Foram verificadas as solicitações de momento fletor e força cortante nas vigas e os deslocamentos máximos de cada modelo.

Para o cálculo dos momentos fletores é necessário a etapa de pós-processamento dos resultados encontrados, já discutida anteriormente. Durante as análises notou-se que a parcela do momento fletor do tabuleiro M_{casca} tem uma influência muito pequena no momento fletor total da viga, então de forma a simplificar a análise, foi desconsiderado. Portanto o momento fletor total de uma viga é dado por:

$$\begin{aligned} M_{MEF} &= M_{barra} + M_{axial} \\ M_{MEF} &= SM_{1b} + (-SF_{1b} \cdot e) \end{aligned} \quad (5.1)$$

As análises bidimensionais dos outros métodos e o processo de obtenção das solicitações em cada um deles já foi detalhado em capítulos anteriores, sendo que para a determinação do momento máximo o veículo é considerado no meio do vão da ponte, e para a determinação da força cortante máxima, o veículo é considerado com uma roda sobre o apoio.

Os resultados encontrados são apresentados como a razão entre as solicitações calculadas nas análises simplificadas e as solicitações calculadas nas análises por elementos finitos em três gráficos distintos, que incluem os resultados das pontes com espessuras de tabuleiro de 15, 20 e 25 cm. Na sequência são apresentados os resultados das comparações do método LRFD com os outros métodos simplificados de EC e MVM de maneira similar.

Para melhor detalhamento dos resultados as pontes foram divididas em três grupos. O grupo 1 inclui as pontes com vãos menores, de 10 m, o grupo 2 inclui as pontes com vãos intermediários, de 20, 28, 32, 36 e 40 m e o grupo 3 inclui as pontes com vãos maiores, de 50 m.

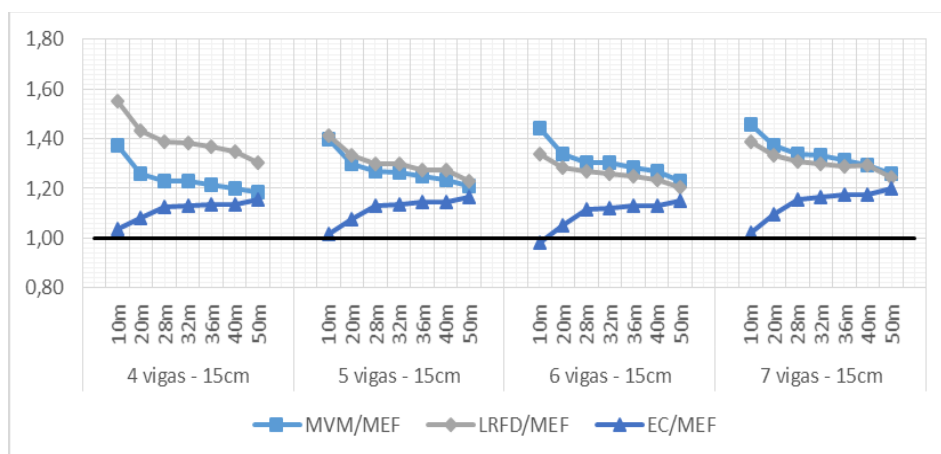
5.2

Pontes com Vigas de Concreto

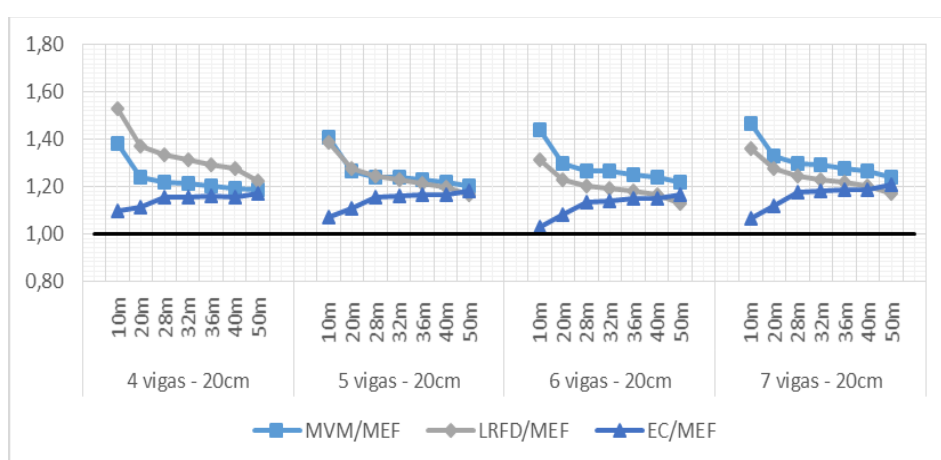
5.2.1

Momento Fletor

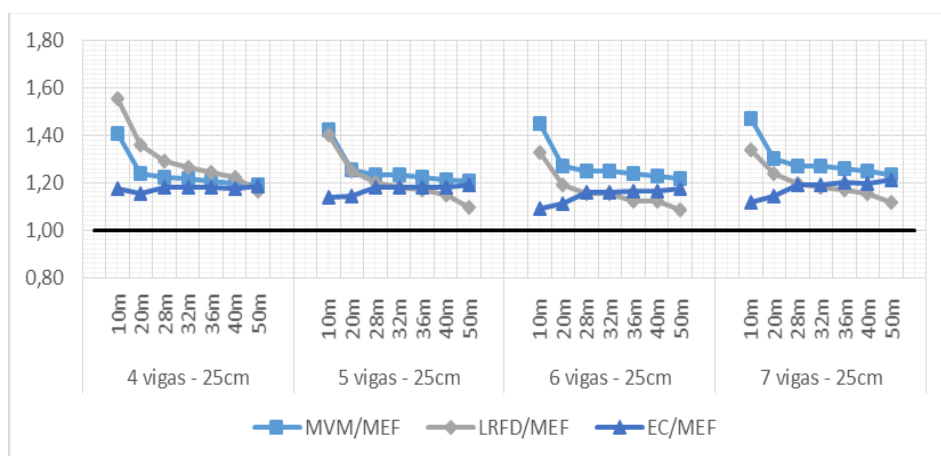
Na Figura 5.1 são apresentadas as razões entre os momentos máximos calculados nas análises dos métodos simplificados pelos obtidos nas análises por elementos finitos das pontes com vigas de concreto.



(a)



(b)



(c)

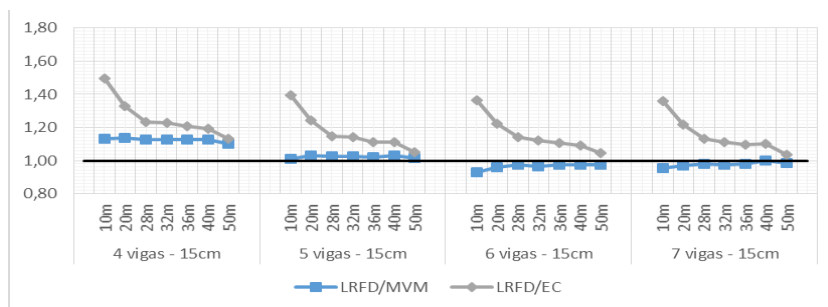
Figura 5.1 – Comparações entre os métodos simplificados e o MEF dos momentos fletores máximos em vigas de concreto: (a) Tabuleiro com 15 cm; (b) Tabuleiro com 20 cm; (c) Tabuleiro com 25 cm.

Ao analisar os gráficos percebe-se claramente duas características de comportamento. A primeira é que nas pontes do grupo 1 as diferenças encontradas entre os momentos obtidos por meio dos métodos simplificados e através da análise por elementos finitos se destoam para os três métodos. Para o LRFD e o MVM aumentam, chegando a ser até 55% e 47% maiores que o do MEF, respectivamente, já para o EC a diferença reduz para até -2%. Para os grupos 2 e 3 as diferenças máximas encontradas nas análises de todos os métodos foram sempre conservadoras, variando entre 9% para vãos de 50 m e tabuleiro de 25 cm e 43% para vãos de 20 m e tabuleiro de 15 cm. A outra característica é que as diferenças entre os métodos tendem a serem menores quanto maiores forem os comprimentos dos vãos e a espessura do tabuleiro, se estabilizando em torno de 20%. A Tabela 5.1 – apresenta um resumo com as diferenças encontradas.

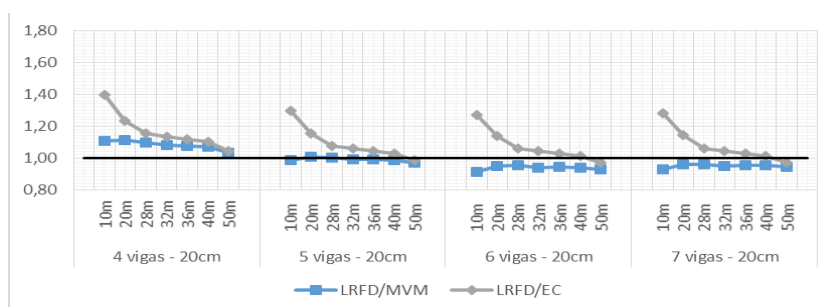
Tabela 5.1 – Resumo das diferenças entre métodos simplificados e MEF nos cálculos de momento fletor máximo em pontes de vigas de concreto

RESUMO	MVM	LRFD	EC
Grupo 1			
Diferença máxima	47%	55%	14%
Diferença mínima	37%	31%	-2%
Média das diferenças	43%	41%	7%
Grupo 2			
Diferença máxima	37%	43%	20%
Diferença mínima	19%	12%	5%
Média das diferenças	26%	26%	15%
Grupo 3			
Diferença máxima	26%	30%	21%
Diferença mínima	18%	9%	15%
Média das diferenças	22%	18%	18%
Média total das diferenças	28%	26%	14%

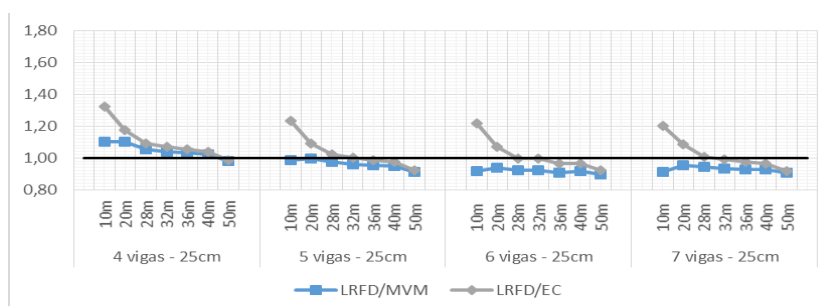
Na Figura 5.2 o LRFD é comparado com os outros métodos simplificados diretamente.



(a)



(b)



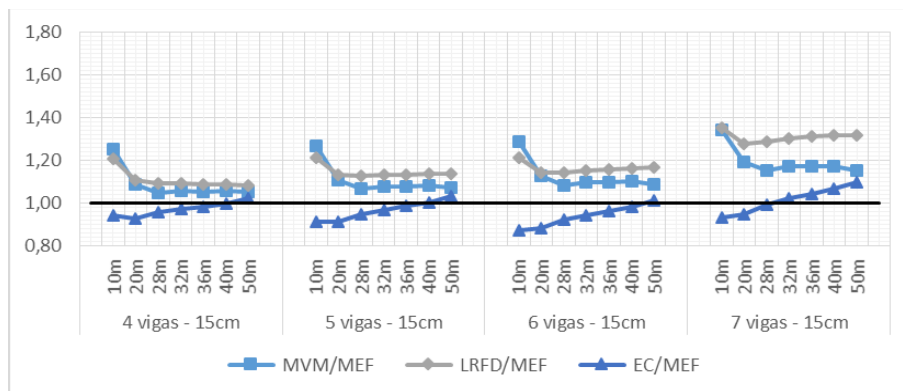
(c)

Figura 5.2 – Comparações dos momentos entre os métodos simplificados nas pontes com vigas de concreto: (a) Tabuleiro com 15 cm; (b) Tabuleiro com 20 cm; (c) Tabuleiro com 25 cm.

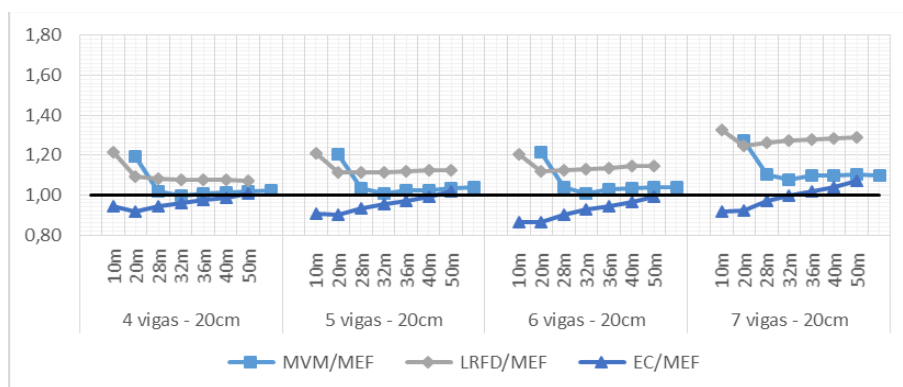
Fica evidente a similaridade entre o comportamento do MVM e do LRFD, onde há uma alternância do conservadorismo entre eles. Para pontes com maiores espaçamentos entre vigas, o LRFD é até 14% mais conservador e com espaçamentos menores, o MVM é até 11% mais conservador. Já na comparação entre o LRFD e o EC, o LRFD é mais conservador na maioria dos casos. As diferenças entre as análises de do grupo 1 chegam até a 50%. Para os outros grupos, as diferenças variam entre o LRFD mais conservador em até 33% para pontes do grupo 2 e o EC mais conservador em até 8% para pontes do grupo 3.

5.2.2 Força Cortante

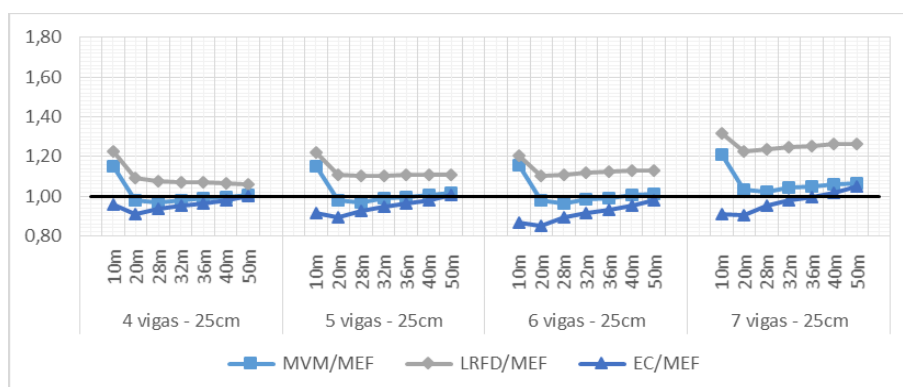
Na Figura 5.3 são apresentadas as razões entre as forças cortantes máximas calculadas nas análises dos métodos simplificados pelos obtidos nas análises por elementos finitos.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.3 – Comparações entre os métodos simplificados e o MEF cortantes máximos em vigas de concreto: (a) Tabuleiro com 15 cm; (b) Tabuleiro com 20 cm; (c) Tabuleiro com 25 cm.

Ao se analisar os gráficos percebem-se variações em algumas características de comportamento. As diferenças encontradas também se deparam para pontes do grupo 1, alcançando variações máximas de 35% e 34% para o LRFD e o MVM, respectivamente. Para as pontes dos grupos 2 e 3 o LRFD tem uma diferença média de 15%, sendo mínima de 6% e máxima de 32%, e o MVM tem uma diferença média de 5%, sendo mínima de -4% e máxima de 19%.

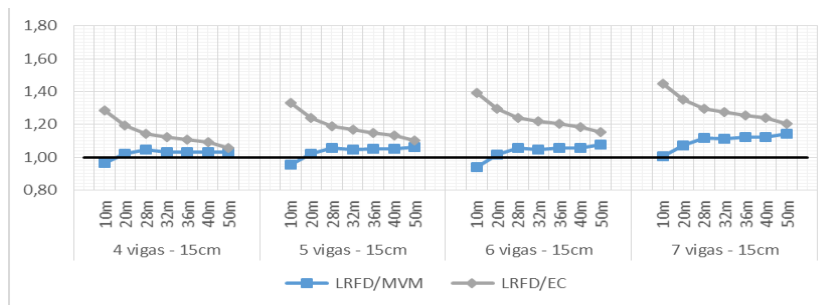
O método de EC se comporta de forma um pouco diferente dos outros, fornecendo na maior parte das análises resultados menores do que os encontrados pelo MEF. A média das diferenças encontradas foi de -4%, mínima de -15% e máxima de 10%.

A Tabela 5.2 – Tabela 5.1 – apresenta um resumo das diferenças encontradas.

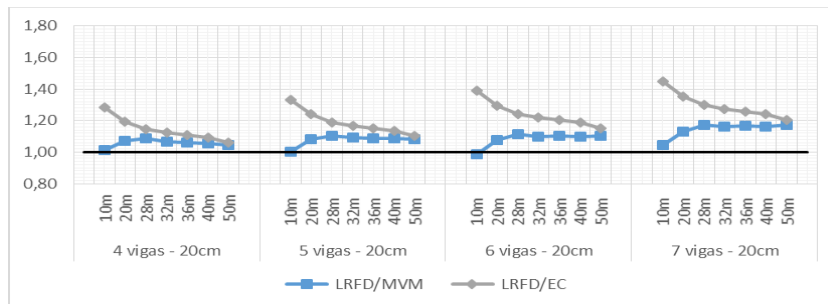
Tabela 5.2 – Resumo das diferenças entre métodos simplificados e MEF nos cálculos da força cortante máximo em pontes de vigas de concreto

RESUMO	MVM	LRFD	EC
Grupo 1			
Diferença máxima	34%	35%	-14%
Diferença mínima	15%	20%	-4%
Média das diferenças	23%	24%	-9%
Grupo 2			
Diferença máxima	19%	32%	6%
Diferença mínima	-4%	7%	-15%
Média das diferenças	5%	15%	-4%
Grupo 3			
Diferença máxima	15%	32%	10%
Diferença mínima	1%	6%	-2%
Média das diferenças	6%	16%	2%
Média total das diferenças	7%	16%	-4%

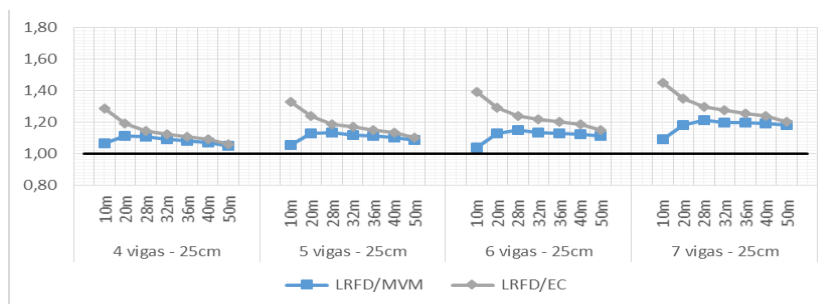
Na Figura 5.4 o LRFD é comparado com os outros métodos simplificados diretamente.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.4 – Comparações dos cortantes entre os métodos simplificados em vigas de concreto: (a) Tabuleiro com 15 cm; (b) Tabuleiro com 20 cm; (c) Tabuleiro com 25 cm.

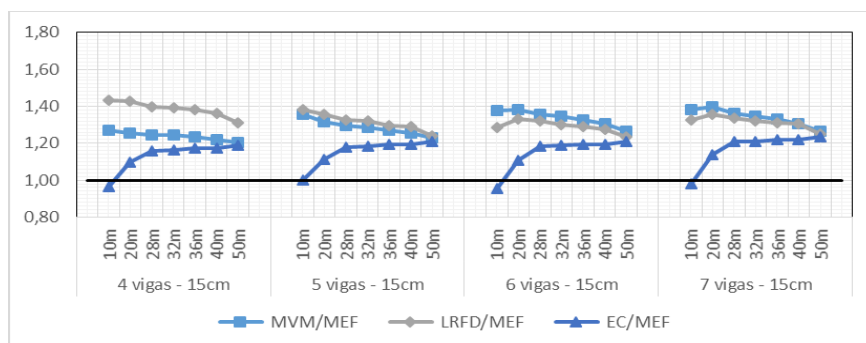
Nessa situação também é evidente a similaridade entre o comportamento do MVM e do LRFD. Excluindo-se as pontes do grupo 1 há pouca variabilidade nas diferenças encontradas na comparação entre os dois métodos. A média das diferenças entre eles é de 9%, com mínima de -6% (grupo 1) e máxima de 21%. Ao não se considerar as pontes do grupo 1 a diferença mínima passa a ser 1%.

Já a diferença entre os LRFD e o EC é bem maior. A média encontrada é de 22%, com 6% e 45% de diferença mínima e máxima respectivamente. Ao não se considerar as pontes do grupo 1 a diferença máxima passa a ser 35%.

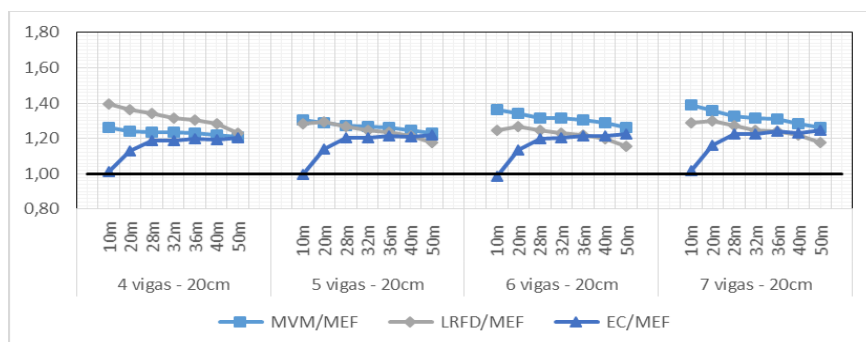
5.2.3 Deslocamentos

Para o cálculo dos deslocamentos nos métodos simplificados a inércia da seção transversal considerada é a equivalente da seção composta pela viga com o a largura efetiva do tabuleiro. Para a simplificação da análise a largura efetiva considerada é o espaçamento entre as vigas de cada modelo.

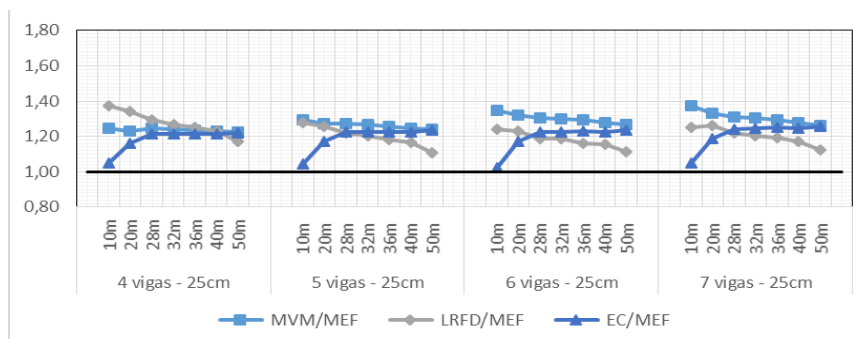
Na Figura 5.5 são apresentadas as razões entre os deslocamentos máximos calculados nas análises dos métodos simplificados pelos obtidos nas análises por elementos finitos das pontes com vigas de concreto.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.5 – Comparações entre os métodos simplificados e o MEF dos deslocamentos máximos em vigas de concreto: (a) Tabuleiro com 15 cm; (b) Tabuleiro com 20 cm; (c) Tabuleiro com 25 cm.

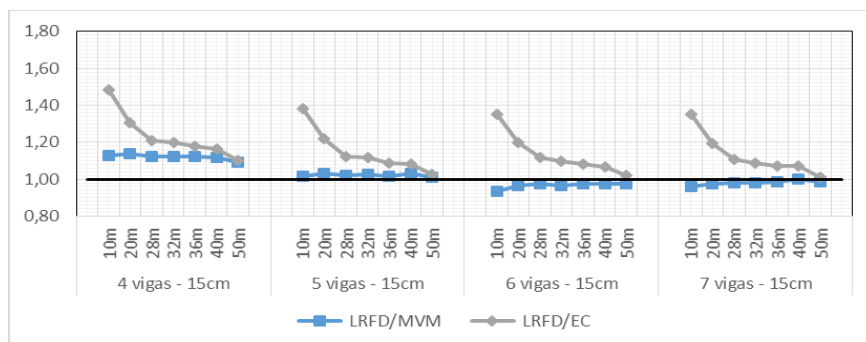
Ao se analisar os gráficos percebe-se claramente a semelhança entre as comparações dos momentos e dos deslocamentos no comportamento dos métodos, com um importante detalhe, que para os métodos MVM e LRFD os resultados para as pontes do grupo 1 não se destoam tanto dos outros, e apenas para o método de EC que essa característica foi acentuada em relação a comparação dos momentos. Uma outra diferença entre o método de EC e os métodos MVM e LRFD é que o EC tem uma pequena tendência em afastar mais os resultados dos valores encontrados nas análises por EF a medida que o vão tem seu comprimento aumentado, ao contrário do que ocorre nas análises utilizando-se os outros métodos.

A Tabela 5.3 – apresenta um resumo das diferenças encontradas.

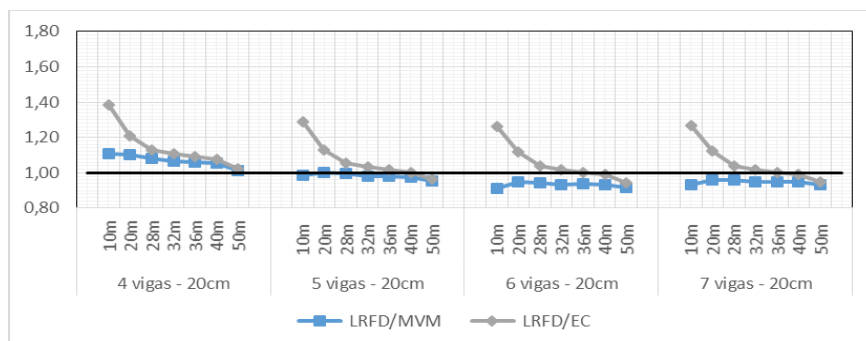
Tabela 5.3 – Resumo das diferenças entre métodos simplificados e MEF nos cálculos de deslocamento máximo em pontes de vigas de concreto

RESUMO	MVM	LRFD	EC
Grupo 1			
Diferença máxima	39%	43%	5%
Diferença mínima	25%	24%	-5%
Média das diferenças	33%	32%	1%
Grupo 2			
Diferença máxima	40%	43%	25%
Diferença mínima	22%	16%	9%
Média das diferenças	29%	27%	20%
Grupo 3			
Diferença máxima	27%	31%	26%
Diferença mínima	20%	11%	19%
Média das diferenças	24%	19%	22%
Média total das diferenças	29%	27%	17%

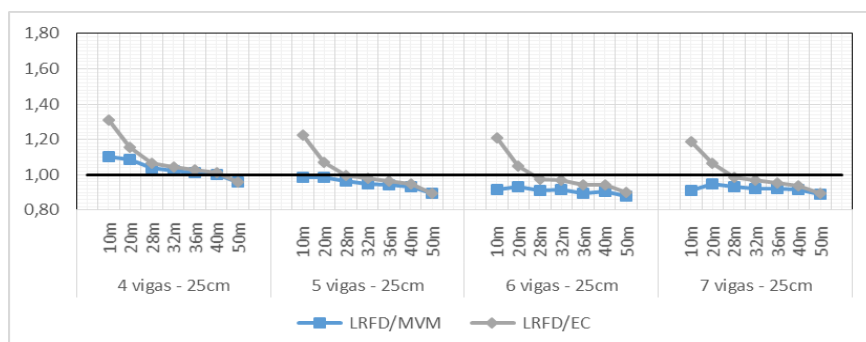
Na Figura 5.6 o LRFD é comparado com os outros métodos simplificados diretamente.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.6 – Comparações dos deslocamentos máximos entre os métodos simplificados em vigas de concreto: (a) Tabuleiro com 15 cm; (b) Tabuleiro com 20 cm; (c) Tabuleiro com 25 cm.

Fica evidente a similaridade entre o comportamento do MVM e do LRFD, onde há uma alternância do conservadorismo entre eles. Para pontes com maiores espaçamentos entre vigas o LRFD é até 13% mais conservador, e com espaçamentos menores o MVM é até 9% mais conservador. Já na comparação entre o LRFD e o EC, o LRFD é mais conservador na maior parte dos casos. As diferenças entre as análises de do Grupo 1 chegam até a 48%. Para os outros grupos as diferenças variam entre o LRFD mais conservador em até 30% para pontes do Grupo 2, e o EC mais conservador em até 10% para pontes do Grupo 3.

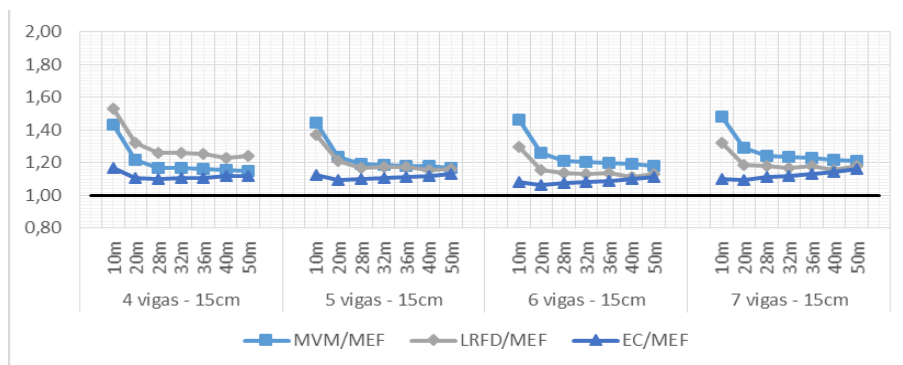
5.3

Pontes com Vigas Metálicas

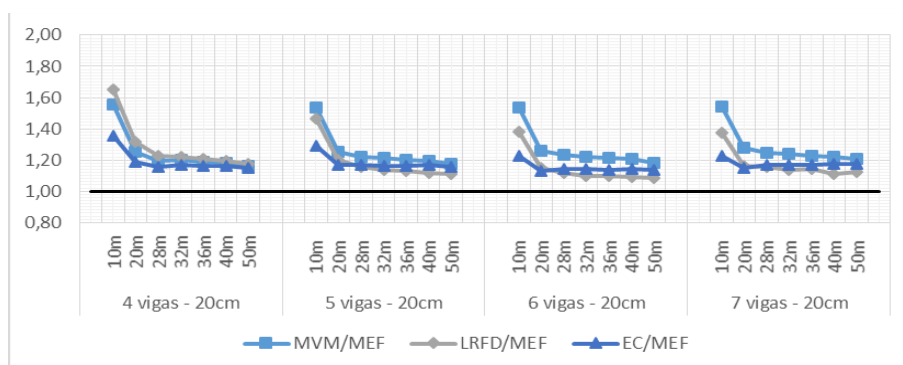
5.3.1

Momento Fletor

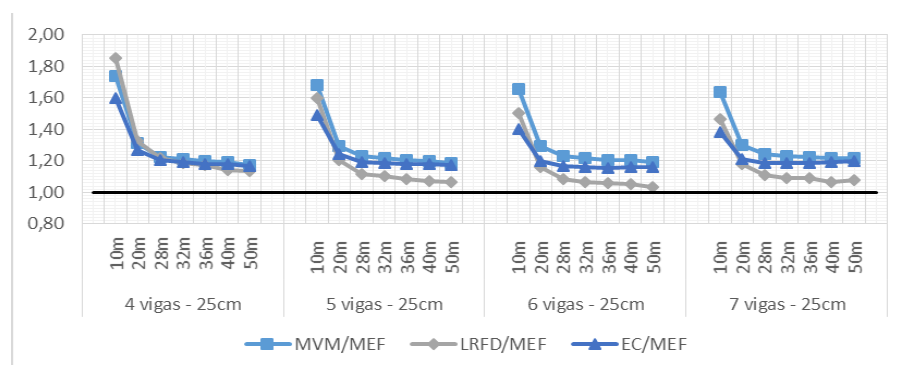
Na Figura 5.7 são apresentadas as razões entre os momentos máximos calculados pelos métodos simplificados e pelos obtidos nas análises por elementos finitos para as pontes com vigas metálicas.



(a)



(b)



(c)

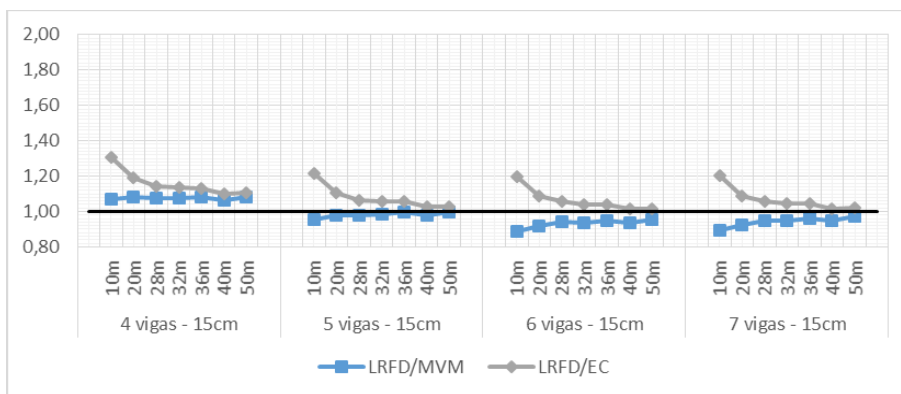
Figura 5.7 – Comparações entre os métodos simplificados e o MEF dos momentos fletorres máximos em vigas metálicas: (a) Tabuleiro com 15 cm; (b) Tabuleiro com 20 cm; (c) Tabuleiro com 25 cm.

A análise dos gráficos permite verificar que o comportamento dos métodos na determinação do momento fletor nas vigas de pontes com vigas metálicas é similar ao de pontes com vigas de concreto. Nesse caso, também para as pontes do grupo 1, as diferenças encontradas se destoam para os três métodos. O MVM fornece resultados até 74% maiores do que os encontrados nas análises por elementos finitos nesses casos e o LRFD e o EC fornecem resultados até 85% e 60% maiores respectivamente. Percebe-se então que os métodos simplificados não se aplicam para esses casos específicos. A Tabela 5.4 –Tabela 5.1 – apresenta um resumo com as diferenças encontradas para os três grupos de pontes.

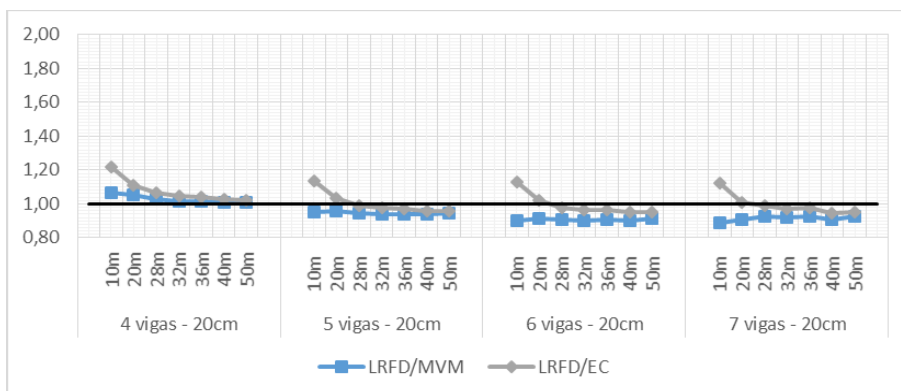
Tabela 5.4 – Resumo das diferenças entre métodos simplificados e MEF nos cálculos de momento fletor máximo em pontes de vigas metálicas

RESUMO	MVM	LRFD	EC
Grupo 1			
Diferença máxima	74%	85%	60%
Diferença mínima	43%	30%	8%
Média das diferenças	56%	49%	29%
Grupo 2			
Diferença máxima	31%	32%	27%
Diferença mínima	16%	5%	8%
Média das diferenças	22%	16%	15%
Grupo 3			
Diferença máxima	22%	24%	20%
Diferença mínima	15%	3%	11%
Média das diferenças	18%	13%	15%
Média total das diferenças	26%	20%	16%

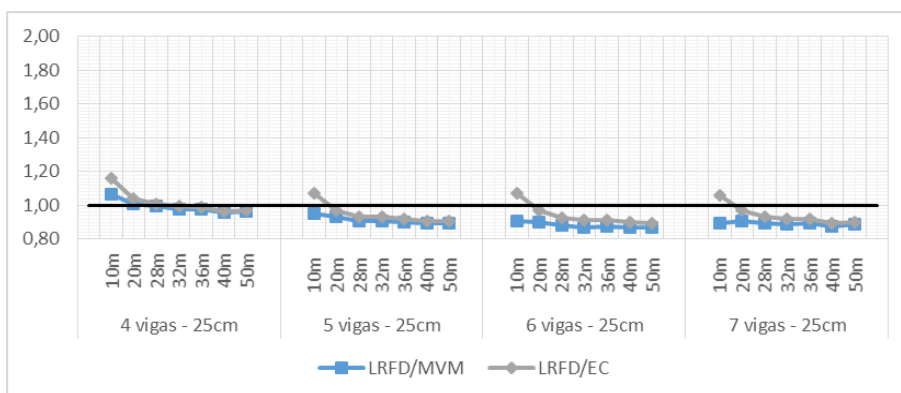
Na Figura 5.8 o LRFD é comparado com os outros métodos simplificados diretamente.



(a)



(b)



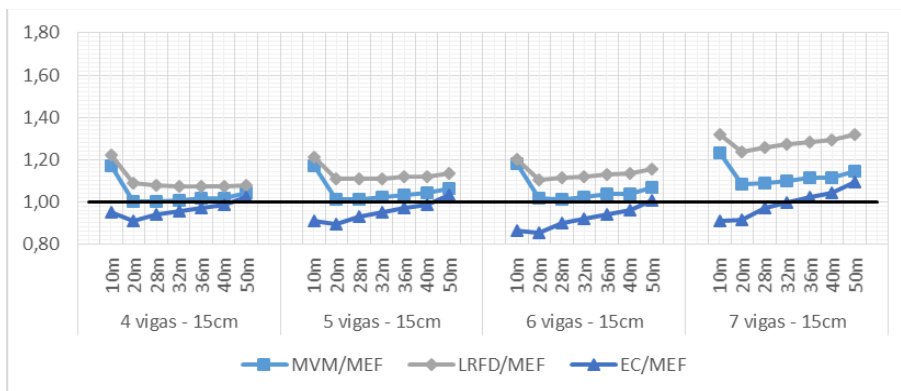
(c)

Figura 5.8 – Comparações dos momentos entre os métodos simplificados: (a) Tabuleiro com 15 cm; (b) Tabuleiro com 20 cm; (c) Tabuleiro com 25 cm.

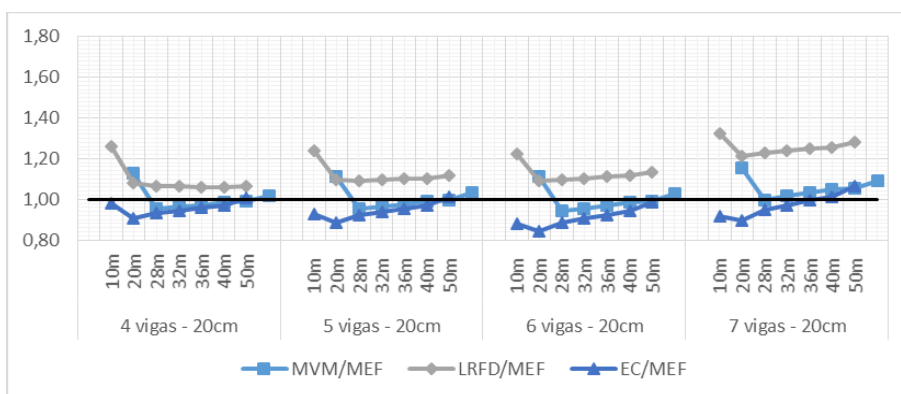
Os três métodos apresentam comportamentos semelhantes, com basicamente a maior diferença ocorrendo em pontes do grupo 1. Porém, de forma geral, o LRFD é o menos conservador entre eles para o cálculo de momento fletor em pontes de vigas metálicas, fornecendo resultados em média até 5% menores em comparação com o MVM e 1% menores em comparação com o EC.

5.3.2 Força Cortante

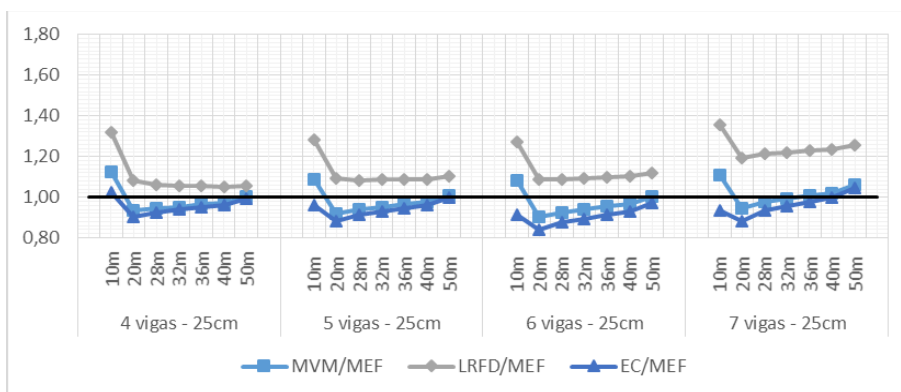
Na Figura 5.9 são apresentadas as razões entre as forças cortantes máximas calculadas nas análises dos métodos simplificados pelos obtidos nas análises por elementos finitos.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.9 – Comparações entre os métodos simplificados e o MEF dos cortantes máximos em vigas metálicas: (a) Tabuleiro com 15 cm; (b) Tabuleiro com 20 cm; (c) Tabuleiro com 25 cm.

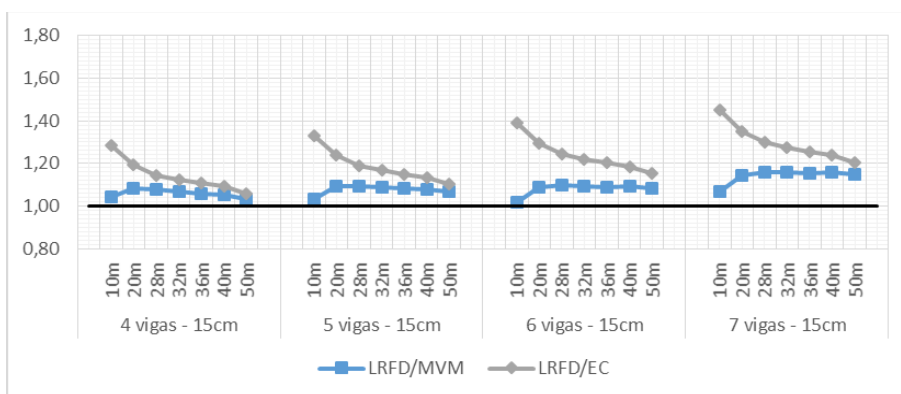
As diferenças encontradas nesse caso também se dectoam para pontes do grupo 1, alcançando uma variação máxima de 35% e 23% para o LRFD e o MVM, respectivamente. Para os outros grupos o LRFD tem uma diferença média de 13%, mínima de 5% e máxima de 32%, o MVM tem uma diferença média de 1%, mínima de -8% e máxima de 14% e o EC, que fornece na maior parte das análises resultados menores que os encontrados nas análises pelo MEF, tem uma diferença média de -5%, mínima de -16% e máxima de 9%.

A Tabela 5.5 – apresenta um resumo com as diferenças encontradas.

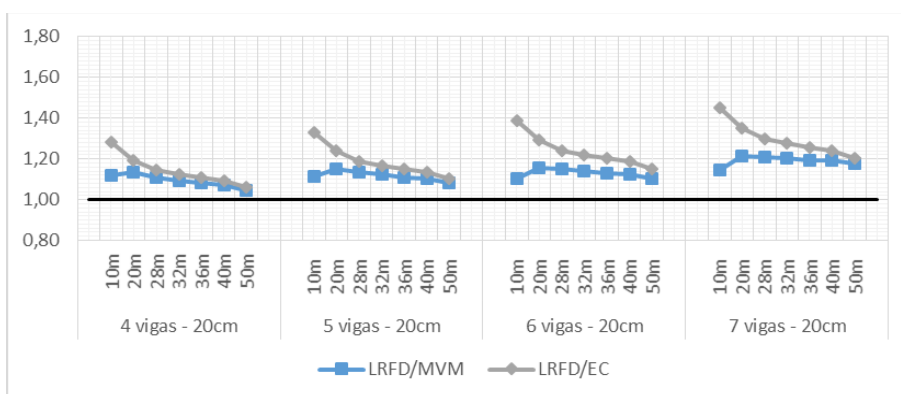
Tabela 5.5 – Resumo das diferenças entre métodos simplificados e MEF nos cálculos de força cortante máximo em pontes de vigas metálicas

RESUMO	MVM	LRFD	EC
Grupo 1			
Diferença máxima	23%	35%	3%
Diferença mínima	9%	20%	-14%
Média das diferenças	14%	27%	-7%
Grupo 2			
Diferença máxima	11%	29%	4%
Diferença mínima	-8%	5%	-16%
Média das diferenças	-1%	13%	-6%
Grupo 3			
Diferença máxima	14%	32%	9%
Diferença mínima	0%	5%	-3%
Média das diferenças	5%	15%	2%
Média total das diferenças	2%	15%	-5%

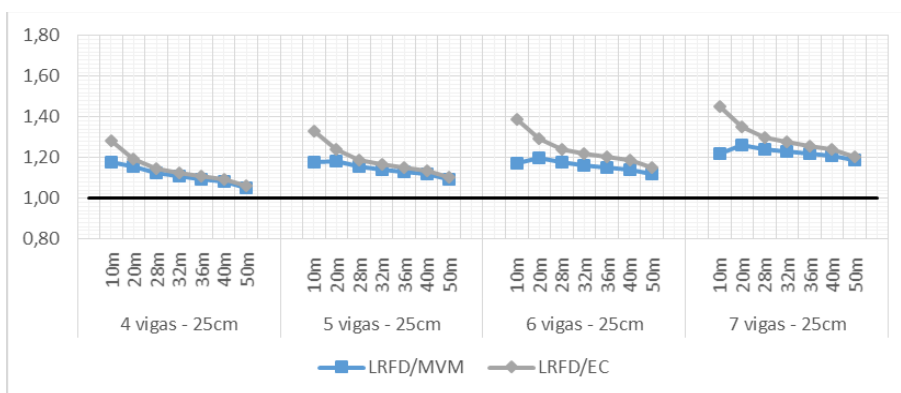
Na Figura 5.10 o LRFD é comparado com os outros métodos simplificados diretamente.



(a)



(b)



(c)

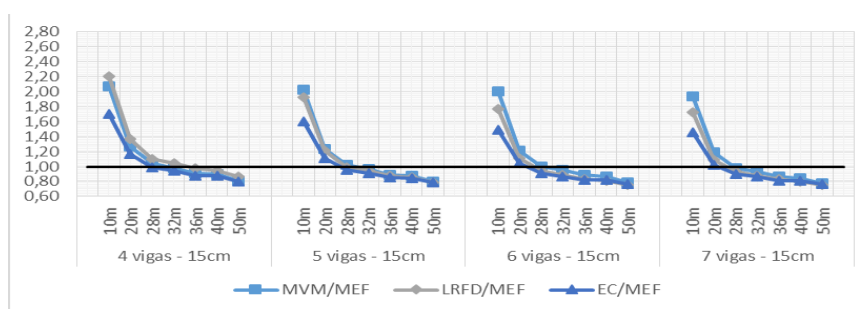
Figura 5.10 – Comparações dos cortantes entre os métodos simplificados em vigas metálicas: (a) Tabuleiro com 15 cm; (b) Tabuleiro com 20 cm; (c) Tabuleiro com 25 cm.

Nessa situação fica evidente como o LRFD é mais conservador que os outros métodos simplificados. Isso ocorre porque para grande parte dos modelos os métodos MVM e EC fornecem resultados menores do que os obtidos nas análises por elementos finitos, portanto, resultados que são contra a segurança das pontes. A média das diferenças entre o LRFD e o MVM é de 13%, com mínima de 2% e máxima de 26%.

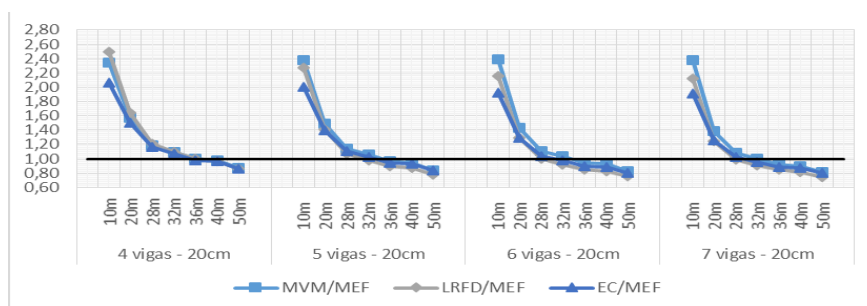
Já a diferença entre os LRFD e o EC é maior. A média encontrada é de 19%, com 6% e 45% de diferença mínima e máxima, respectivamente. Ao não se considerar as pontes do grupo 1 a diferença máxima passa a ser 35%.

5.3.3 Deslocamentos

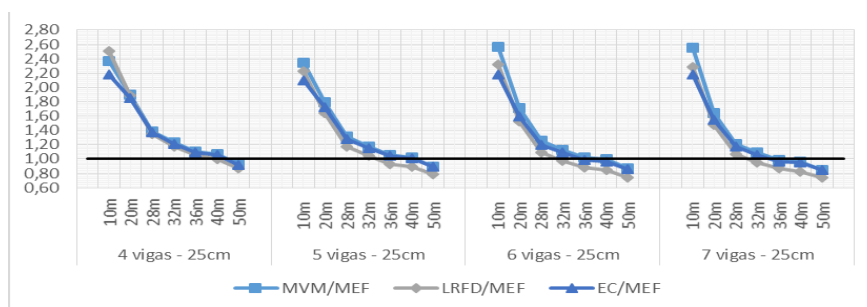
Na Figura 5.11 são apresentadas as razões entre os deslocamentos máximos calculados nas análises dos métodos simplificados pelos obtidos nas análises por elementos finitos das pontes com vigas metálicas.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.11 – Comparações entre os métodos simplificados e o MEF dos deslocamentos máximos em vigas metálicas: (a) Tabuleiro com 15 cm; (b) Tabuleiro com 20 cm; (c) Tabuleiro com 25 cm.

A análise dos gráficos mostra como os métodos simplificados são imprecisos para o cálculo dos deslocamentos máximos em pontes de vigas metálicas. Para as pontes do grupo 1 e as pontes com 20 m de comprimento de vão do grupo 2, os deslocamentos encontrados nas análises dos métodos simplificados chegaram a ser até 2,5 vezes maiores do que os encontrados nas análises por elementos finitos. Já para as pontes do Grupo 3 as análises simplificadas encontraram deslocamentos até 21% menores, sendo, portanto, contra a segurança.

A Tabela 5.6 – apresenta um resumo das diferenças encontradas.

Tabela 5.6 – Resumo das diferenças entre métodos simplificados e MEF nos cálculos de deslocamento máximo em pontes de vigas metálicas

RESUMO	MVM	LRFD	EC
Grupo 1			
Diferença máxima	156%	150%	118%
Diferença mínima	94%	73%	45%
Média das diferenças	128%	117%	90%
Grupo 2			
Diferença máxima	90%	89%	85%
Diferença mínima	-15%	-17%	-19%
Média das diferenças	12%	5%	6%
Grupo 3			
Diferença máxima	-8%	-13%	-8%
Diferença mínima	-22%	-26%	-24%
Média das diferenças	-16%	-21%	-17%
Média total das diferenças	24%	17%	15%

Os motivos que levam a essa inconsistência nos deslocamentos encontrados pelos métodos simplificados para pontes de vigas metálicas podem ser diversos. Não foi realizada neste trabalho uma análise profunda para entender a causa desse problema, porém o fato de sua ocorrência apenas para as pontes com vigas metálicas levantou a questão sobre a influência da rigidez das vigas nesse resultado, pois nas pontes com vãos menores as vigas metálicas consideradas têm rigidez relativamente baixa, bem inferior as vigas de concreto.

Portanto, foi analisada a relação entre a rigidez equivalente dos tabuleiros por metro com as diferenças encontradas nas análises, onde a rigidez relativa dos tabuleiros é dada por: $N_{vigas} \cdot EI_{eq} / L$, na qual N_{vigas} é a quantidade de vigas na ponte, E é o módulo de elasticidade equivalente da seção composta pela viga e o ta-

buleiro com sua largura equivalente, I_{eq} é a inércia equivalente da seção composta e L é o comprimento do vão. A Figura 5.12 apresenta essa relação.

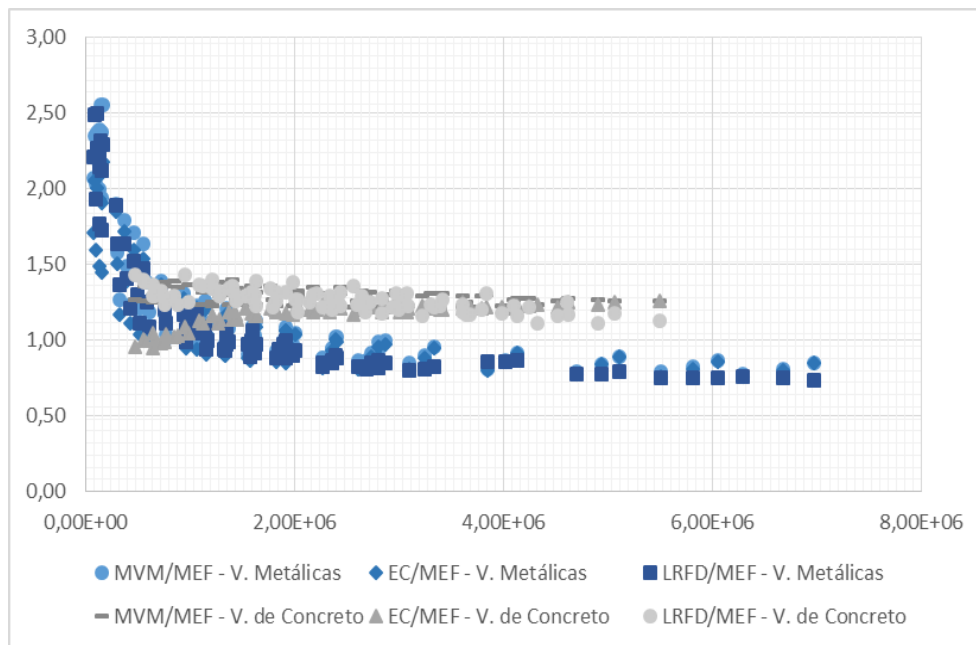
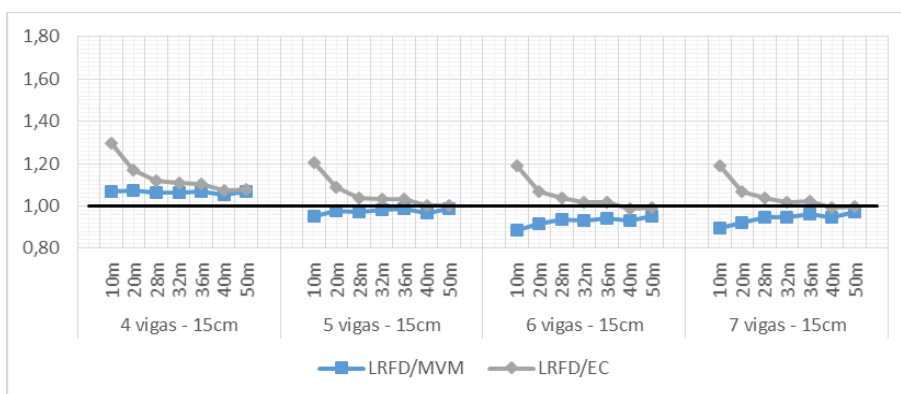


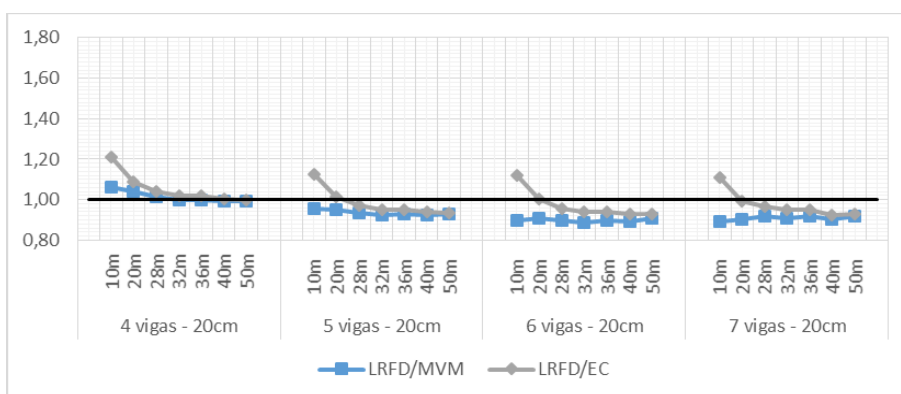
Figura 5.12 – Relação entre a rigidez das vigas e as diferenças dos resultados.

Essa análise indica que os resultados encontrados estão relacionados diretamente com a rigidez das vigas. Para os casos em que a rigidez das vigas é muito pequena em relação ao comprimento do vão, nenhum método simplificado reproduz de forma confiável o comportamento de um tabuleiro, superestimando os deslocamentos.

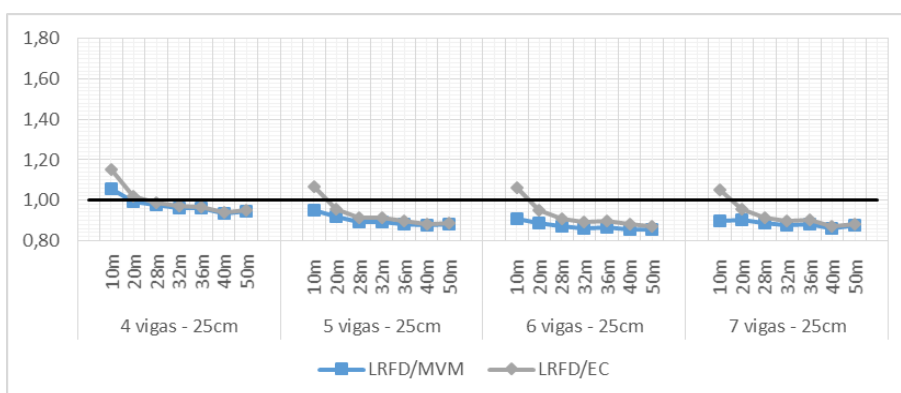
O LRFD também foi comparado diretamente com os outros métodos simplificados. A Figura 5.13 apresenta essa análise.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.13 – Comparações dos deslocamentos máximos entre os métodos simplificados em vigas metálicas: (a) Tabuleiro com 15 cm; (b) Tabuleiro com 20 cm; (c) Tabuleiro com 25 cm.

Com excessão dos resultados das pontes do Grupo 1 os métodos simplificados apresentam resultados bem próximos. Assim como em outros casos os resultados das pontes do grupo 1 nas análises pelo método de EC também se destoam um pouco. Para os outros grupos a maior diferença encontrada entre os resultados das análises utilizando-se o MVM e o LRFD é de 15%, e entre as análises utilizando o EC e o LRFD é de 17%.