

JAKSON MANFREDINI VASSOLER

ESTUDO DE UM MODELAMENTO PARA ANÁLISE DE JUNTAS COLADAS

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Orientadores: Prof. Dr. Giorgio Chiandussi - Politecnico di Torino
Prof. Dr. Luca Goglio - Politecnico di Torino
Prof. Ph.D. Jun Sérgio Ono Fonseca - UFRGS

Porto Alegre
2004



Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Departamento de Engenharia Mecânica

ESTUDO DE UM MODELAMENTO PARA ANÁLISE DE JUNTAS COLADAS

JAKSON MANFREDINI VASSOLER

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS RE-
QUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
ENGENHEIRO(A) MECÂNICO(A)
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. FLÁVIO JOSÉ LORINI
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. WALTER JESUS PAUCAR CASAS
UFRGS / DEMEC

Prof. Dr. BRANCA FREITAS DE OLIVEIRA
UFRGS / DEMEC

Prof. M. JUAN PABLO RAGGIO QUINTAS
UFRGS / DEMEC

Porto Alegre
2004

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a minha família pelo apoio e incentivo aos meus estudos.

aos meus orientadores, *Prof. Dr. Giorgio Chiandussi* e *Prof. Dr. Luca Goglio*, do Politecnico di Torino - Itália através do programa ALPIP, que me orientaram e me auxiliaram na realização do trabalho de diplomação.

à todos meu professores e especialmente ao *Prof. Ph.D. Jun Sérgio Ono Fonseca* que não somente me auxiliou no meu trabalho de diplomação, mas também na minha formação acadêmica sendo meu orientador em trabalhos de iniciação científica.

VASSOLER, J. M. **Estudo de um Modelamento para Análise de Juntas Coladas**. 2004. 15f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

RESUMO

O trabalho propõe um modelamento para juntas coladas com elementos de vigas e placas. A metodologia usada consiste em uma comparação com o modelo de referência. Neste estudo também determinou se a necessidade da utilização de parâmetros de rigidez. Com a metodologia adotada sobre o modelamento proposto, é possível caracterizar o comportamento da junta através do uso de parâmetros de rigidez.

PALAVRAS-CHAVE: Juntas Coladas, Junta Sobreposta Simples

VASSOLER, J. M. **Study on Models for Bonded Joints Analysis**. 2004. 15f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

ABSTRACT

This work proposes a model for bonded joints with beam and shell elements. The methodology used consists in a comparison with a reference model. This study has shown the need of the use of stiffness parameters. The methodology chosen in the proposed model allows the simulation of the joint behavior through the use of the stiffness parameters.

KEYWORDS: Bonded Joints, Single-Lap Joints

SUMÁRIO

RESUMO.....	4
ABSTRACT	5
1. INTRODUÇÃO	7
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	9
3. MODELAMENTO	9
3.1. GEOMETRIA E CONDIÇÕES DE CONTORNO.....	10
3.2. METODOLOGIA.....	12
3.2.1. <i>O Modelo de Referência</i>	13
3.2.2. <i>O Modelo Proposto</i>	13
4. RESULTADOS	18
4.1 - MODELO DE REFERÊNCIA.....	18
4.2 - MODELO PROPOSTO	19
5. CONCLUSÃO.....	21
6. REFERÊNCIAS	22
7. BIBLIOGRAFIA CONSULTADA	22
APÊNDICE A	23

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o estudo da utilização de adesivos nas juntas estruturais aumentou em comparação com outros métodos de junção usadas em vários setores industriais. Esse particular interesse é devido as suas características que fornecem um melhoramento de níveis de ruído, corrosão, vibração, aumentando a durabilidade com uma redução de peso e diminuição da concentração de tensões, em comparação com outros mecanismos de ligação. Estas concentrações de tensões ficam associadas à descontinuidade da estrutura, uma vez que a conexão colada tem uma junção contínua.

Ainda existe uma carência de métodos teoricamente corretos e aplicáveis para prever o comportamento e, principalmente, o cálculo da resistência das ligações. Essa situação dificulta a escolha construtiva.

A técnica de junção entre elementos, com materiais diferentes, mais utilizada por razões de custo e simplicidade, é a da colagem. O adesivo é constituído por material epóxi com comportamento linear elástico e de ruptura frágil. A geometria utilizada é aquela da simples sobreposição dos elementos a unir (aderentes), chamada de junta sobreposta simples, com interposição do adesivo, porém essa configuração apresenta elevados picos de tensão nas extremidades, interface aderente-adesivo, com notável perigo de ruptura da ligação. Na extremidade do adesivo têm-se cantos vivos, mostrados em detalhe na figura 1.1, e esses geram altos gradientes de tensão na sua extremidade e assim devem ser modelados com uma malha muito fina, o que representa um elevado número de elementos. O número mínimo de divisões na espessura do adesivo é de 4 a 6 divisões para fornecer uma análise correta [5]. Um exemplo de um modelamento de uma junta colada é apresentado na figura 1.2.

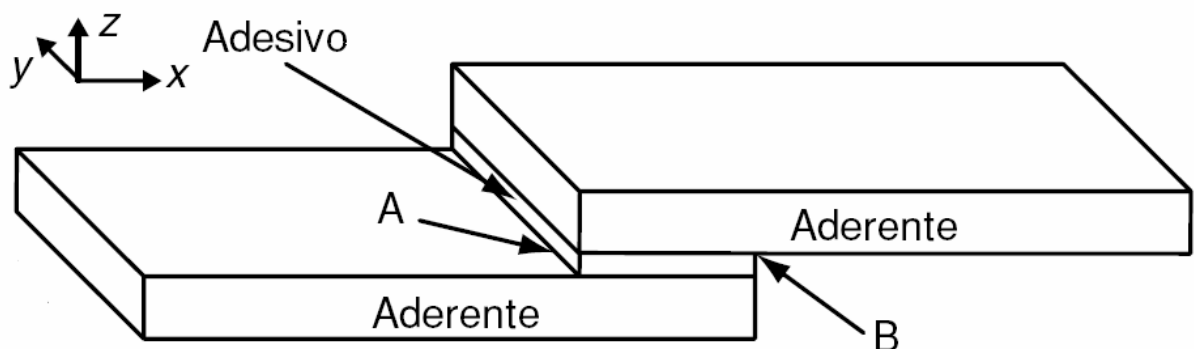


Figura 1.1 - Geometria da junta sobreposta simples com os cantos vivos entre a interface adesivo-aderente em detalhe.

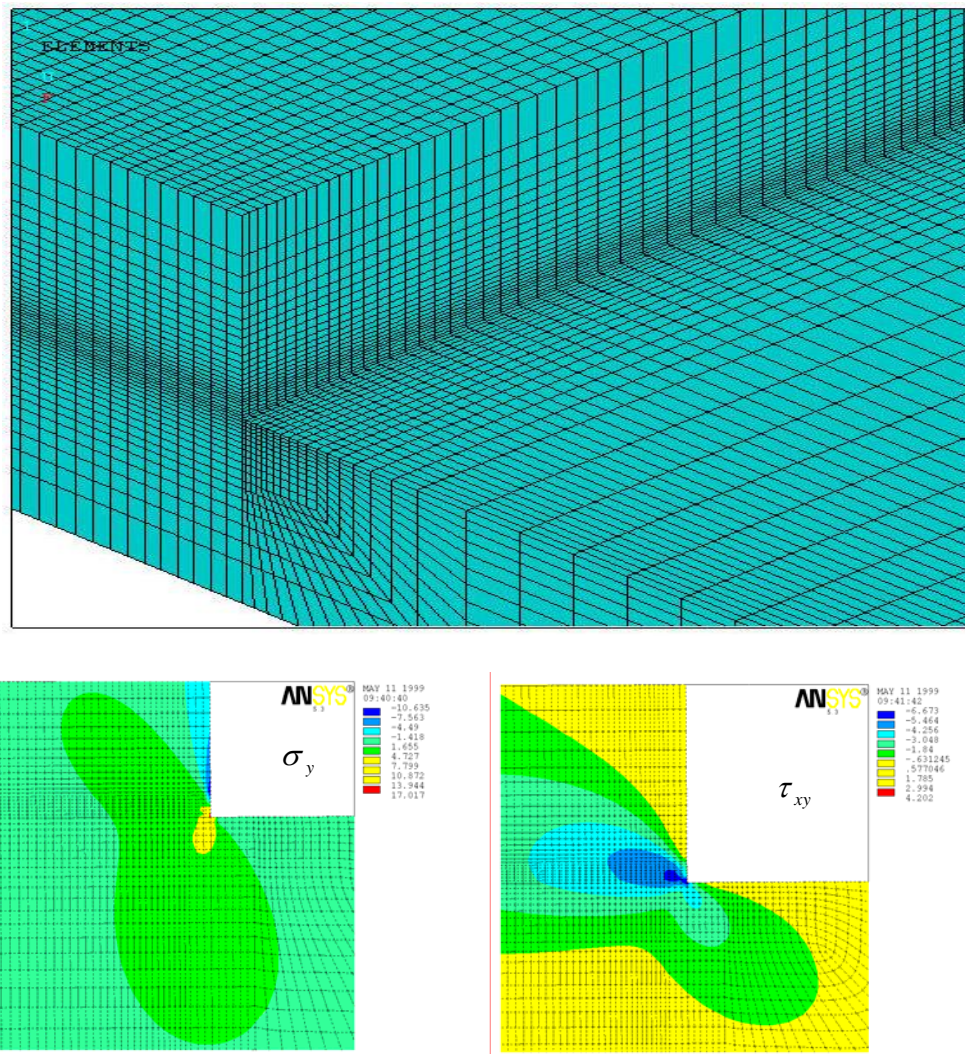


Figura 1.2 - Detalhe de um modelamento com elementos sólidos de uma junta colada devido ao gradiente de tensão nos cantos da interface aderente-adesivo.

Devido à dificuldade de prever o comportamento na análise de juntas coladas, neste estudo propõe-se um modelamento, aplicando o método de elementos finitos, para análise de estruturas coladas. Foi proposto um modelamento para reduzir o número de graus de liberdade de uma típica análise de juntas coladas, que hoje ainda é modelada com elementos sólidos.

Especificamente neste estudo, o modelo considera a geometria de uma junta sobreposta simples, apresentada na Figura 1.1, que posteriormente pode ser aplicado a outros modelos de estruturas coladas. Os resultados permitirão determinar o comportamento da estrutura e validar o modelo proposto. Com esse estudo pretende-se diminuir o tempo de análise além de propor um novo tipo de modelamento para facilitar o trabalho do projetista.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A análise de juntas coladas requer instrumentos confiáveis e eficientes para obter parâmetros de esforços, deformação e falha. A maioria dos métodos utilizados requer grandes investimentos computacionais e de tempo para o modelamento uma vez que os picos de tensão nos cantos entre adesivo e aderente requerem uma malha muito fina.

Nos últimos anos foram desenvolvidos métodos e propostos modelos para prever o comportamento das ligações coladas. Wooley e Carvey [1] publicaram a primeira análise de elementos finitos nas juntas sobrepostas simples. Eles usaram elementos de estado plano de tensão com análise linear. Inúmeros outros estudos bidimensionais para esse tipo de junta foram desenvolvidos depois deste primeiro estudo. Atualmente, elementos especiais são desenvolvidos para modelar o comportamento do adesivo. No campo bidimensional e tridimensional, Aduet, Dillard e Holzer [3], e no campo tridimensional Gonçalves, de Moura e de Castro [2] e [4]. Estes desenvolveram elementos lineares elásticos com elementos finitos de uma junta sobreposta simples na qual consideraram geometrias não lineares.

Uma consideração de natureza tridimensional se faz sobre as juntas coladas, onde o cálculo acurado da tensão na interface aderente-adesivo é de grande importância, pois a falha das juntas coladas ocorre no adesivo (falha coesiva) ou na interface aderente-adesivo (falha adesiva). Assim, com o objetivo de desenvolver um novo tipo de modelamento para este tipo de junta analisada, propõe-se um modelamento tridimensional assumindo elementos tridimensionais de barra para o adesivo e elementos de placa tridimensional para a superfície aderente.

3. MODELAMENTO

Com o aumento da aplicação das ligações coladas veio o desenvolvimento de modelos matemáticos para analisar o comportamento dessas ligações. Ambos métodos analíticos e numéricos tem sido desenvolvidos. Em meio a tantos métodos, o método de elementos finitos é o mais usado. A junta sobreposta simples é usada na maioria dos estudos devido a sua simplicidade, aplicação prática e dados disponíveis para comparação.

O modelamento proposto será estudado em uma junta sobreposta simples tridimensional. A ferramenta escolhida para a análise do comportamento é o software comercial ANSYS que utiliza o método de elementos finitos.

A metodologia escolhida consiste em validar o modelo proposto através de dados de um modelo de referência. Como a simples aplicação de elementos de viga no adesivo resulta em uma rigidez reduzida, criaram-se parâmetros de rigidez para enrijecer estes elementos e aproximar se ao modelamento mais realístico, feito com elementos sólidos.

3.1. GEOMETRIA E CONDIÇÕES DE CONTORNO

Neste estudo consideraram-se os aderentes com a mesma espessura e comprimento, variando apenas o comprimento de sobreposição e a espessura de adesivo.

Com o objetivo de fazer uma comparação entre os modelos de referência e aquele proposto, foi escolhido para a análise:

- Placas de aço para os aderentes, de espessura de 5 mm e comprimento sem sobreposição de 150 mm e base de 20 mm,
- O adesivo utilizado é uma resina epóxi,

Com suas características apresentadas na tabela 3.1. Ambos aderentes e adesivo são tratados como materiais isotrópicos com comportamento linear elástico.

Tabela 3.1 - Propriedades elásticas dos materiais.

Propriedade	Aderente	Adesivo
Módulo de Young	210 GPa	3.32 GPa
Coefficiente de Poisson	0.3	0.31

O comprimento de sobreposição das duas placas e a espessura do adesivo, que é um valor muito pequeno se comparado com as espessuras dos aderentes, são os principais fatores que influenciam uma estrutura colada. Assim, criaram-se dois parâmetros de razão:

- razão entre a espessura do adesivo e a espessura do aderente (r_1)
- razão entre comprimento de sobreposição do aderente e espessura do aderente (r_2)

dadas respectivamente pelas expressões 3.1 e 3.2.

O sistema de vínculo é isostático, isso prevê um apoio simples na extremidade não carregada que vincula os deslocamentos nas direções X e Y, e um apoio simples na extremidade carregada o qual permite rotações livres segundo a direção longitudinal X. A força externa T_0 , neste caso escolheu-se como uma força unitária de pura tração que gera um momento fletor M_0 , expressão 3.3, devido à excentricidade (b) com que esta é aplicada. As características geométricas e condições de contorno estão apresentadas na Figura 3.1.

$$r_t = \frac{t}{h_1} = \frac{t}{h_2} \quad (3.1)$$

$$r_l = \frac{L}{h_1} = \frac{L}{h_2} \quad (3.2)$$

$$M_0 = T_0 \times \left(\frac{h_1}{2} + \frac{h_2}{2} + t \right) = T_0 \times b \quad (3.3)$$

Os parâmetros r_t e r_l são parâmetros importantes na definição do comportamento da junta estudada porque eles regem o comportamento da junta segundo suas diversas aplicações.

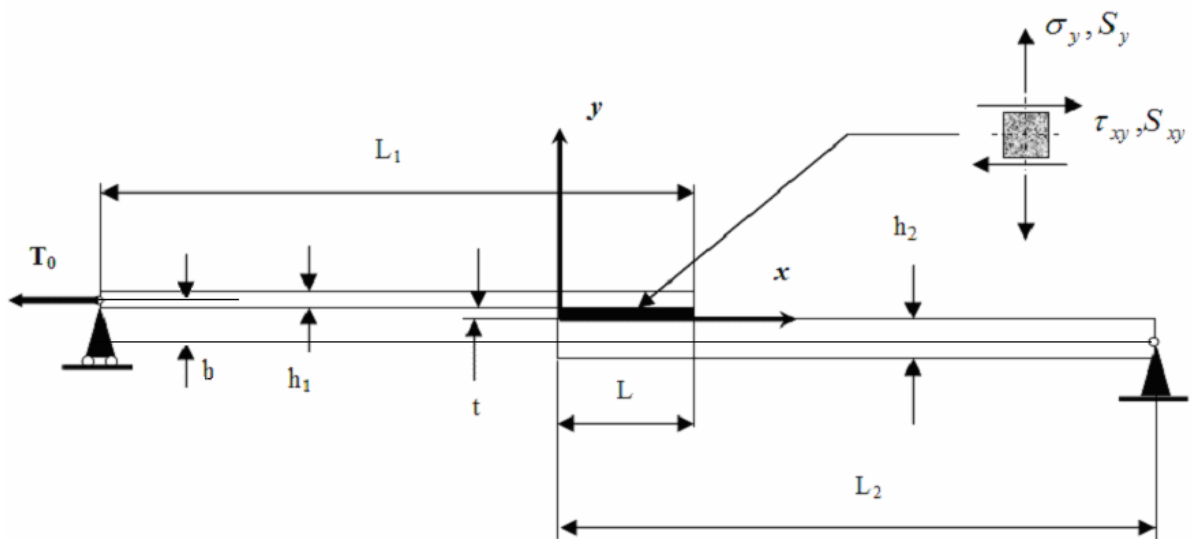


Figura 3.1 - Junta sobreposta simples analisada: características geométricas e condições de contorno aplicadas.

A distribuição de tensão no interior de qualquer aderente é em primeira aproximação a soma de uma distribuição constante de tensão devido à tração e de uma distribuição variavelmente linear devido ao momento fletor. Tal campo de tensão é transmitido de um aderente a outro passando pela camada de adesivo.

3.2. METODOLOGIA

Foram feitas diversas análises com diferentes valores de r_t e r_l , com o objetivo de validar o modelo proposto para diversos casos de aplicação. Os valores de r_t e r_l usados estão apresentados na tabela 3.2, e correspondem a valores comumente usados em estudos.

Tabela 3.2 - Valores dos parâmetros analisados no estudo.

r_t	r_l
0.05	10
0.1	15
0.25	20
0.5	30

O dado escolhido para validação do modelo é a comparação entre os deslocamentos do modelo proposto e de referência segundo as condições de contorno já apresentadas. A comparação de tensões resultantes no adesivo seria de difícil obtenção, já que esse seria modelado com elementos de viga, conforme será apresentando mais adiante.

Os nós escolhidos para comparação são aqueles que compõe a linha média, em vermelho, das camadas passando pelo plano médio X-Z apresentada na figura 3.2.

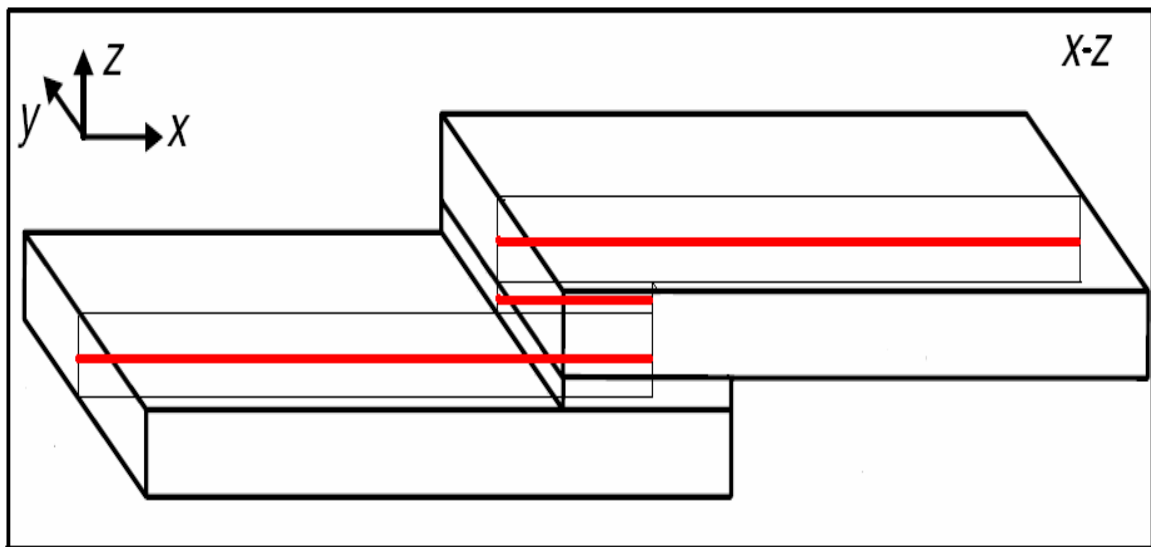


Figura 3.2 - Localização dos nós tomados para comparação entre deslocamento do modelo de referência e do modelo proposto.

3.2.1. O Modelo de Referência

O modelo de referência consiste em um modelo com elementos tridimensionais sólidos, que é o modelo mais usado atualmente e apresenta uma boa acuracidade em comparação com testes experimentais feitos em análises de juntas sobrepostas simples.

Utilizou-se uma malha muito fina com o intuito de trabalhar com dados mais próximos possíveis de uma aplicação prática. Geraram-se dados através de 16 geometrias diferentes segundo os parâmetros da tabela 3.2.

3.2.2. O Modelo Proposto

O modelo proposto consiste em um modelo tridimensional assumindo elementos tridimensionais de barra para o adesivo e elementos de placa tridimensional para a superfície aderente, mostrado na figura 3.3. Esses elementos foram escolhidos devido a sua eventual simplificação do modelo e diminuição do número final de elementos.

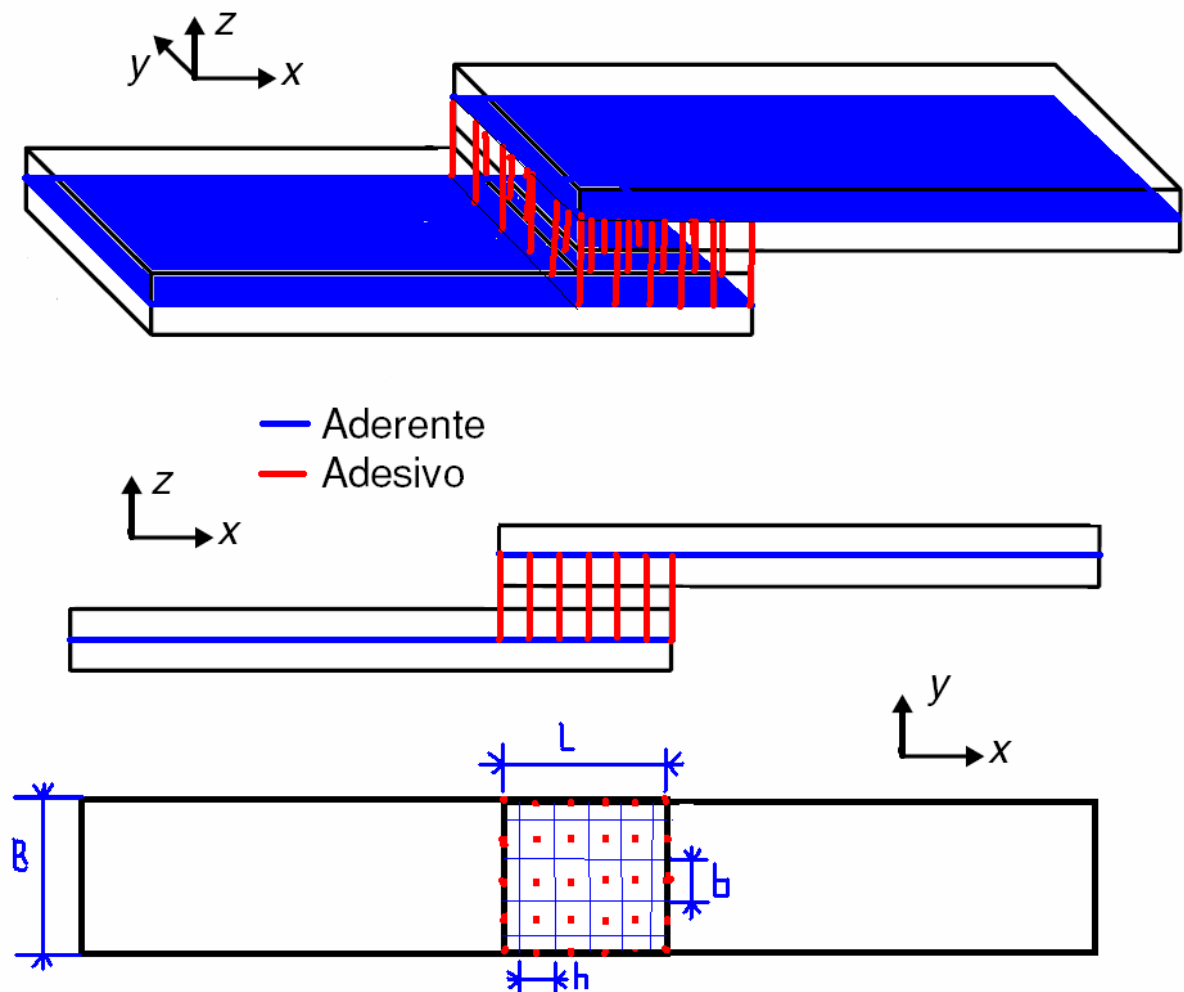


Figura 3.3 - Modelo proposto.

A ligação dos elementos de viga com os elementos de placa foram tomados na linha média da camada aderente.

3.2.2.1 – Propriedades dos Elementos

Para as propriedades das vigas partiu-se do princípio de que a área de cada viga seria igual à área total de sobreposição dividido pelo número de elementos, assim chegou-se ao valor da altura e da base da seção da viga, sempre considerando uma viga de seção quadrada. A altura da seção da viga (h), na direção X, e a base da seção da viga (b), na direção Y, estão apresentadas respectivamente nas expressões 3.4 e 3.5.

$$h = \frac{L}{nds + 1} \quad (3.4)$$

$$b = \frac{B}{ndb+1} \quad (3.5)$$

onde nds e ndb , são o número de divisões de elementos e $(nbs+1)$ e $(ndb+1)$ o número de elementos em suas respectivas direções.

Para entrada de dados das propriedades geométricas, área e momento de inércia, a serem aplicadas nos elementos de viga, criou-se 3 parâmetros de rigidez. Sendo eles, um parâmetro de rigidez de área (p_a) e dois parâmetros de rigidez de inércia (p_{iy} e p_{ix}). Esses parâmetros são diretamente multiplicados pelas propriedades de cada viga. Assim teremos propriedades geométricas simples e enrijecidas, que estão apresentadas na tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Propriedades Geométricas a serem aplicadas nos elementos de vigas

	Simple	Enrijecidas
Área	$As = b.h$	$Ae = p_a.As$
I_{yy}	$I_{yy_s} = \frac{b.h^3}{12}$	$I_{yy_e} = p_{i_y}.I_{yy_s}$
I_{xx}	$I_{xx_s} = \frac{h.b^3}{12}$	$I_{xx_e} = p_{i_x}.I_{xx_s}$

O objetivo de enrijecer esses elementos se deve ao fato de que o modelamento com elementos de viga resulta em uma rigidez total do adesivo menor do que seria em um modelo aplicando elementos sólidos, que é o modelamento coerente com a realidade física do modelamento do adesivo. Isso se deve ao fato que esse modelamento com elementos de viga não exista um vínculo entre os deslocamentos de suas faces, assim ocorre um deslocamento relativo (escorregamento), que pode ser visualizado na figura 3.4.

Neste estudo, deu-se ênfase somente ao deslocamento longitudinal e vertical, direções X e Z, assim não foram recolhidos dados do parâmetro de rigidez p_{ix} para validação do modelo proposto. Este foi tratado como igual a p_{iy} , pois considerou se uma seção quadrada para viga.

3.2.2.2 – Valores dos Parâmetros Propostos

Uma das maiores dificuldades desse estudo era de como encontrar os valores de p_a e p_{iy} , uma vez que estes dependem de muitas variáveis, como r_l , r_t , número de elementos de viga.

Uma solução para esse problema foi utilizar o módulo de otimização de variáveis do software ANSYS com o modelo apresentado na figura 3.5.

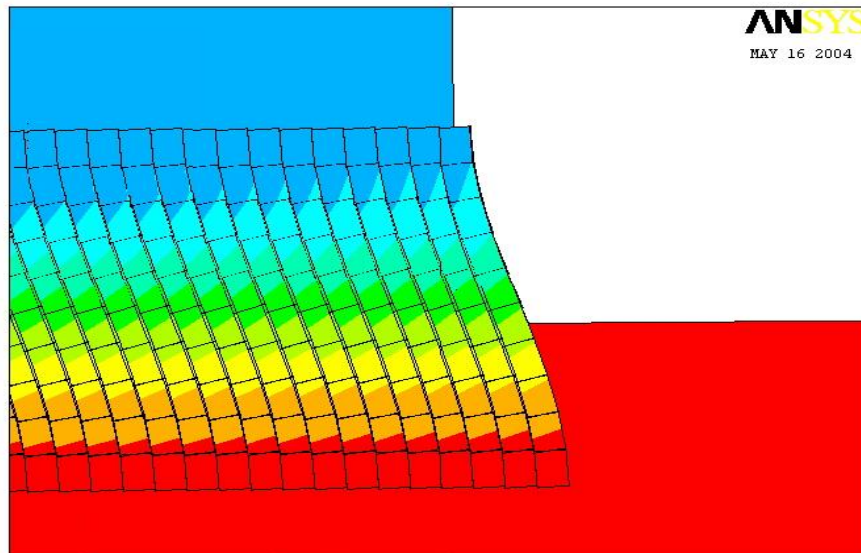


Figura 3.4 - Forma da deformação dos elementos de vigas.

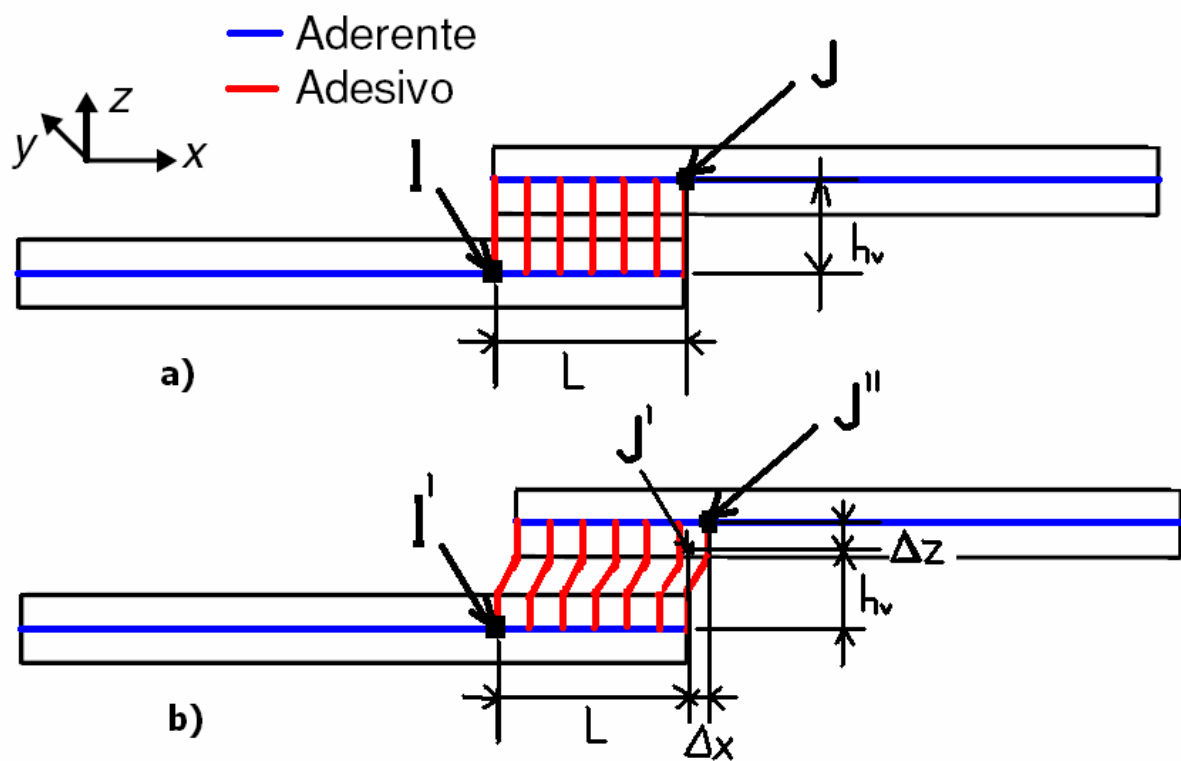


Figura 3.5 - Modelo para análise de otimização de variáveis, a) não deformado, b) deformado.

Onde L é o comprimento de sobreposição de adesivo, h_v a altura das vigas, Δx é a deformação na direção X do comprimento de sobreposição do adesivo e Δz a deformação na direção Z do segmento de reta entre os pontos I e J.

De posse dos valores de deslocamento e deformações do modelo de referência, pode-se gerar análises de otimização de variáveis. Assim tomou-se:

- os parâmetros de rigidez p_a e p_{iy} , como variáveis de projeto (DV)
- a deformação horizontal (Δx) do comprimento de sobreposição e a deformação vertical (Δz), sempre entre os pontos I e J do modelo proposto, como variáveis de estado (SV).
- a diferença entre as deformações horizontal (Δx) do modelo proposto e do modelo de referência, sempre entre os pontos I e J, como função objetivo (OBJ).

3.2.2.3 – Número de Elementos x Tamanho do Elemento

Após encontrar a relação entre os parâmetros r_l e r_t com o comportamento da junta colada, é preciso identificar possíveis correções devido ao número de elementos usado para modelar o adesivo, bem como o tamanho associado à seção da viga (h e b). Para isso fazem-se novos estudos dos casos apresentados na tabela 3.2. Todos os parâmetros são considerados constantes alterando-se apenas o número e tamanho do elemento.

Primeiro muda-se o número de elementos sem mudar o tamanho do elemento. Neste caso é possível mudar o número de elemento mudando o parâmetro r_t , assim o tamanho de elemento continua igual.

Para analisar a influência sobre os resultados, na mudança do tamanho do elemento (h e b da seção), analisa-se cada caso da tabela 3.2 mudando apenas o valor de h e b . Como a mudança de h e b está diretamente associada ao número de divisões dos elementos da camada de sobreposição (nds e ndb), utiliza-se a expressão 3.6 para alterar o valor de h e b .

$$nds = r_e \cdot r_l \cdot 6 \tag{3.6}$$

onde r_e é um parâmetro criado para mudança de nds e conseqüentemente do valor de h e b sem alterar o número de elementos ou qualquer outro parâmetro utilizado inicialmente.

Com essa metodologia pretende-se validar o modelo proposto e identificar quais são os parâmetros necessários para sua validação, bem como chegar a conclusões sobre a influência destes sobre o comportamento em uma análise de juntas coladas.

4. RESULTADOS

4.1 - MODELO DE REFERÊNCIA

Os resultados do modelo de referência que serão utilizados para validação do modelo proposto, segundo modelamento da figura 3.1, estão apresentados na tabela 4.1 de forma simplificada. Para uma melhor visualização dos resultados, é apresentado um gráfico com os deslocamentos que servirão para posterior comparação com o modelo proposto, figura 4.1.

Tabela 4.1 - Valores de Δx para o modelo de referência expressos em metros.

r_l		10	15	20	30
r_l	0.05	2.9854180E-10	2.7667604E-10	2.6123077E-10	2.4429590E-10
	0.1	3.3371301E-10	3.0751303E-10	2.8853549E-10	2.6620786E-10
	0.25	4.4125181E-10	4.0125861E-10	3.7127544E-10	3.3220136E-10
	0.5	6.4302840E-10	5.7634526E-10	5.2537308E-10	4.5451517E-10

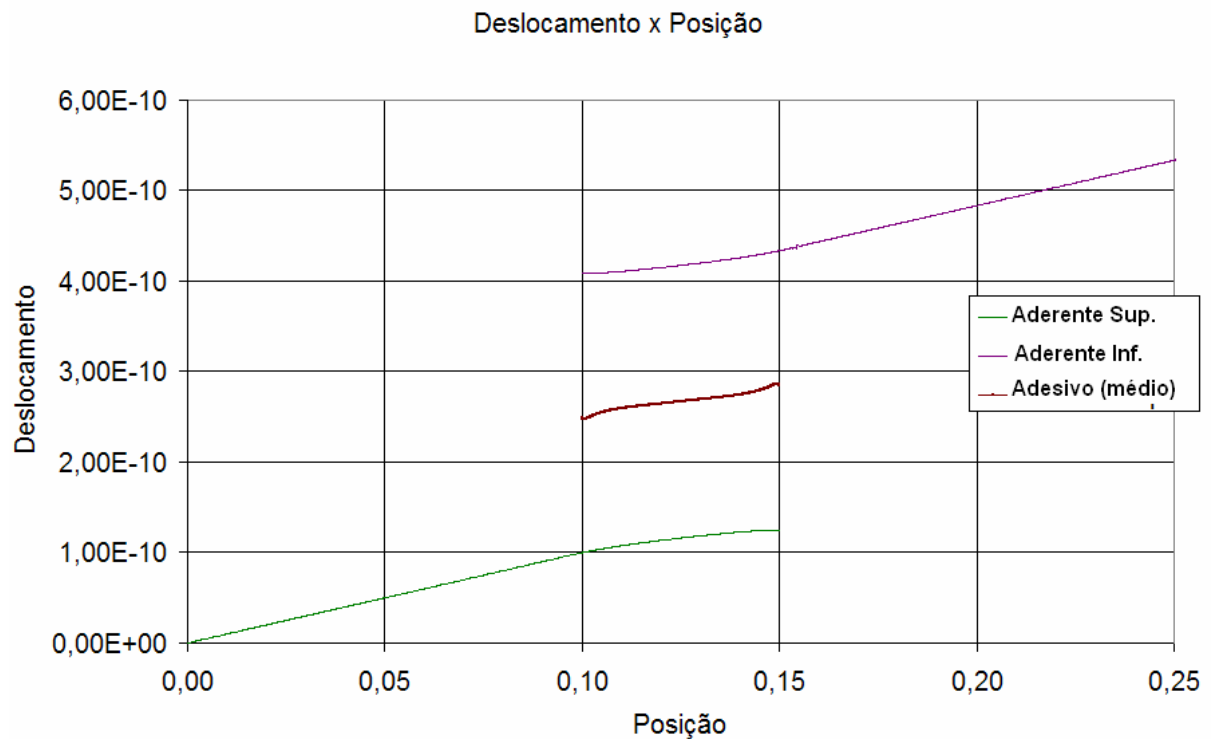


Figura 4.1 - Gráfico do deslocamento nos nós em X do modelo de referência para $r_l = 10$ e $r_l = 0.1$, valores expressos em metros.

4.2 - MODELO PROPOSTO

Segundo as análises, o valor de p_a deve ser considerado constante e igual a 10. Para valores diferentes de 10, o modelo apresenta resultados com erros acentuados e longe dos esperados, vide tabela 4.3. Na análise da influência do número de elementos, deixando inalterado o tamanho h e b dos elementos de viga, o modelo não apresentou mudanças com a variação dos mesmos. Já para a análise do tamanho do elemento, o valor de p_{iy} apresenta mudanças significativas, como mostrado na tabela 4.2 e figura 4.2. Na figura pode-se notar que o comportamento para os diferentes valores de r_e é muito similar. Os valores encontrados de p_{iy} para $p_a=10$ estão apresentados na figura 4.3, de forma tridimensional.

Tabela 4.2 - Valores encontrados de p_i em relação à mudança do tamanho da seção dos elementos de viga para $p_a=10$.

r_e		0.5	1	2
r_t	0.05	230	1350	6800
	0.1	62	295	1320
	0.25	24	105	440
	0.5	18	76	310

Tabela 4.3 - Erro para $r_l = 10$ e $r_e = 1$, com p_a e p_i diferentes daqueles valores propostos.

Caso		$p_a = 1$ e $p_{iy} = 1$	$p_a = 10$ e $p_{iy} = 1$	$p_a = 1$ e $p_{iy} =$ tabela 4.2
		Erro %	Erro %	Erro %
r_t	0.05	482.49	456.98	25.8
	0.1	491.11	466.99	25.2
	0.25	534.66	513.36	22.2
	0.5	624.08	605.71	19.2

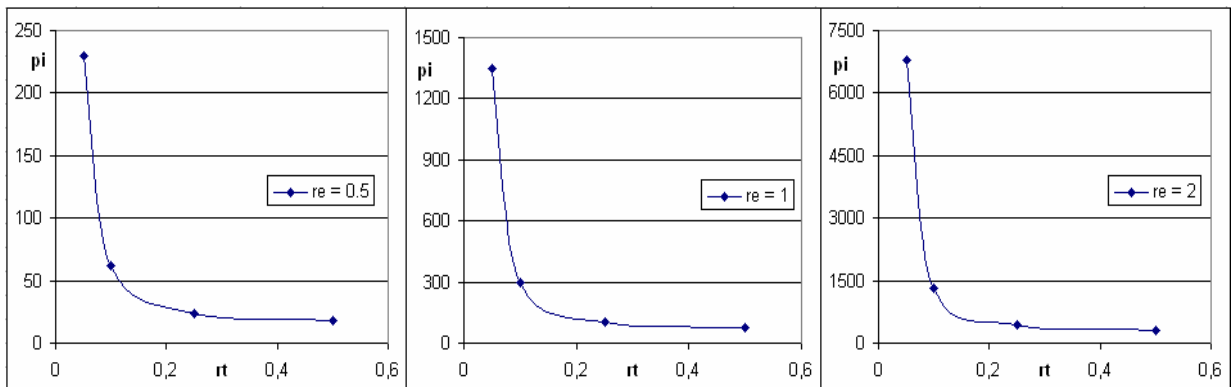


Figura 4.2 - Comportamento de p_{iy} segundo o parâmetro r_e .

As discrepâncias entre os resultados do modelo de referência e o proposto, para todas as análises, estão apresentadas nas tabelas 4.4 e 4.5. Nota-se que o erro encontrado, em relação

ao modelo de referência, é muito pequeno, abaixo de 0.1 % para todos os casos. Para pequenas mudanças nos valores da tabela 4.2, as análises apresentaram valores com erros mais acentuados para casos com r_e maiores.

Tabela 4.3 - Valores de erro percentual em relação a Δx do modelo de referência

r_l		10			15		
r_e		0.5	1	2	0.5	1	2
		Erro %	Erro %	Erro %	Erro %	Erro %	Erro %
r_t	0.05	0.0016	-0.027	-0.038	-0.059	-0.038	-0.015
	0.1	-0.085	0.0192	0.0043	0.0544	-0.037	-0.016
	0.25	0.45	0.1716	0.0858	0.0575	-0.042	-0.049
	0.5	0.8293	0.4593	0.4336	0.1243	0.0162	0.066

Tabela 4.4 - Valores de erro percentual em relação a Δx do modelo de referência

r_l		20			30		
r_e		0.5	1	2	0.5	1	2
		Erro %	Erro %	Erro %	Erro %	Erro %	Erro %
r_t	0.05	-0.056	-0.004	0.0227	-0.009	0.0577	-0.093
	0.1	-0.106	-0.031	0.0018	-0.076	0.0103	0.0469
	0.25	-0.019	-0.057	-0.038	-0.003	0.0002	0.0343
	0.5	-0.03	-0.048	0.0384	-0.028	0.0137	0.1224

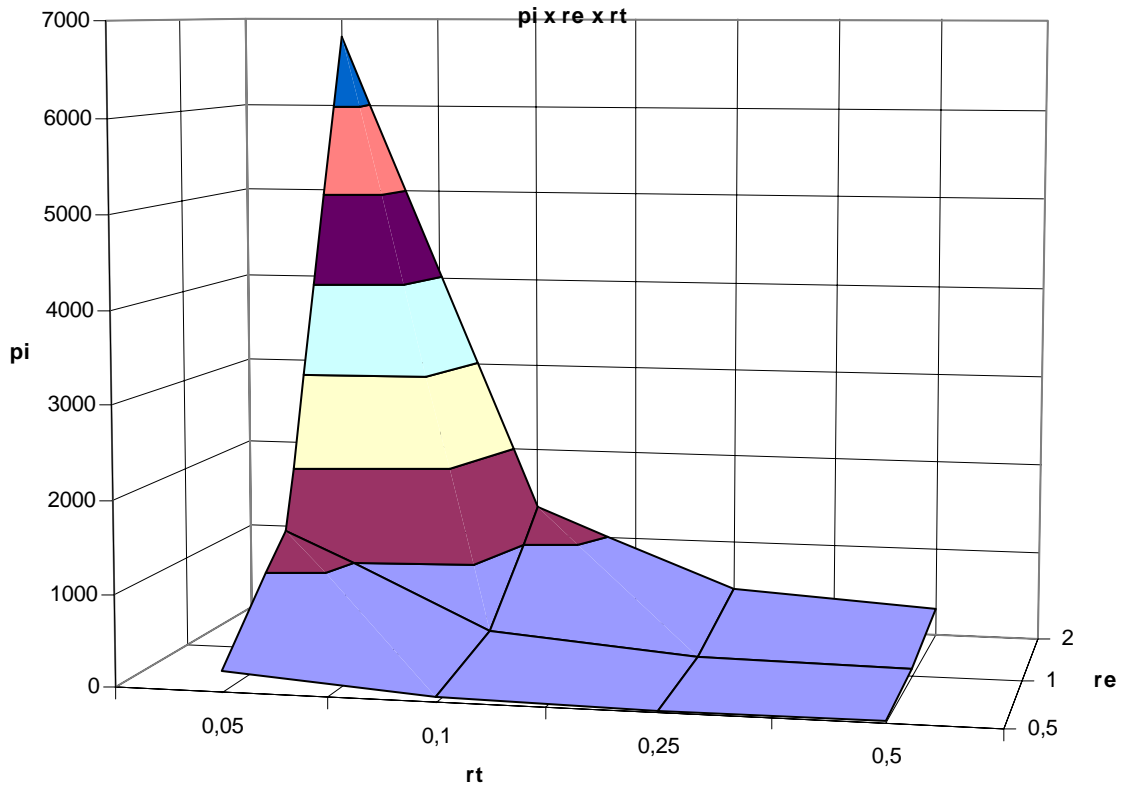


Figura 4.3 - Superfície que representa os valores de p_{iy} em função de r_e e r_t .

Uma comparação entre o deslocamento da linha média das camadas aderentes e do adesivo, do modelo de referência, apresentado na figura 4.1, e do modelo de referência, é apresentado no APÊNDICE A.

5. CONCLUSÃO

O parâmetro de rigidez p_a , segundo as análises de otimização de variável, foi considerado constante e igual a 10. Valor este encontrado através das análises.

O comportamento da linha média da camada aderente foi bem caracterizado, até mesmo onde há sobreposição do adesivo, parte não linear do gráfico no APÊNDICE A. Porém a calibração do modelo foi feita apenas com carga trativa na junta, para futuros estudos existe a necessidade de se testar os parâmetros com cargas transversais, de descolamento, momentos, etc.

Com a metodologia adotada sobre o modelamento proposto, foi possível caracterizar muito bem o comportamento da camada aderente através do uso de parâmetros de rigidez. Ainda considerando diversos valores para a seção quadrada dos elementos de viga.

Se a verificação do adesivo se faz necessária, é possível tomar os valores de deslocamento da linha média da camada aderente como condição de contorno para um submodelamento, ou ainda os esforços atuantes nos pontos I e J e aplicá-los em um modelo simplificado.

Os valores de p_a e p_{iy} encontrados parecem ser coerentes quanto aos resultados das análises. O fato de o número de elementos de viga não alterar o valor de p_{iy} é sustentado devido que as propriedades geométricas são aplicadas a cada elemento de viga. O tamanho da seção influencia o valor de p_{iy} , pois este muda as propriedades geométricas de cada elemento, assim, quanto maior a seção do elemento de viga, menor será a correção, ou seja, o enrijecimento necessário para aproximar-se do caso modelado por elementos sólidos.

Através deste estudo foi possível propor um novo tipo de modelamento para análise de juntas coladas. Neste estudo também determinou se a necessidade da utilização de parâmetros de rigidez propostos na metodologia adotada, sem os quais, sua aplicação não corresponde a resultados coerentes.

6. REFERÊNCIAS

- [1] Wooley G. R., Carver D. R. 'Stress Concentration Factors for Bonded Lap Joints' *Journal of Aircraft*, vol.8 n°10, 1971, pp 817.
- [2] Gonçalves, JPM, de Moura MFSF, de Castro PMST, 'A three-dimensional finite element model for stress analysis of adhesive joints' *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 2002; 22:357-365.
- [3] Andruet RH, Dillard DA, Holzer SM 'Two and three-dimensional geometrical nonlinear finite elements for analysis of adhesive joints' *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 2001; 21: 17-34.
- [4] Gonçalves, JPM, de Moura MFSF, de Castro PMST, 'Application of interface finite elements to three-dimensional progressive failure analysis of adhesive joints' *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, vol.26, (5), 2003, pp.479-486.
- [5] Relazione Tecnica n° 1/99, 'Materiale Speciale per Tecnologie Avanzate 2' Dipartimento di Meccanica, Politecnico di Torino.

7. BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

- [1] Adams RD, Comyn J, Wake WC, 'Structural Adhesive Joints in Engineering' Chapman & Hall, London, 1997.
- [2] Wagner DA, 'FEA (Finite Element Analysis) modeling for body-in-white adhesives', SAE Paper N° 960784, Society of Automotive Engineers, Inc, 1996.
- [3] Goglio L, Rosseto M, 'Un criterio di resistenza statica dei giunti incollati basato sulle tensioni efficaci' XXXII Convegno AIAS, Salerno, 3-6 Settembre 2003.
- [4] Wang CH, Rose LRF, 'Determination of triaxial stresses in bonded joints' *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 1997, 17:17-25.
- [5] Crocombe, A.D., Bigwood, D.A. and Richardson, G. 'Analysing structural adhesive joints for failure' *Journal of Adhesion and Adhesives*, 1990, vol.10 N° 3 pp. 167-178.
- [6] Hart-Smith, L.J. 'Adhesive bonded single-lap joints: technical report' CR-112236 (NASA, Langley Research Centre), January 1973.

APÊNDICE A

A Comparação entre os deslocamentos do modelo proposto, da figura 3.1 (com $r_l = 10$, $r_t = 0.1$, $p_a = 10$, $p_{iy} = 295$ e $r_e = 1$), e do modelo de referência é apresentado na figura 1 e a linha média de cada camada em detalhe nas figuras 2, 3 e 4.

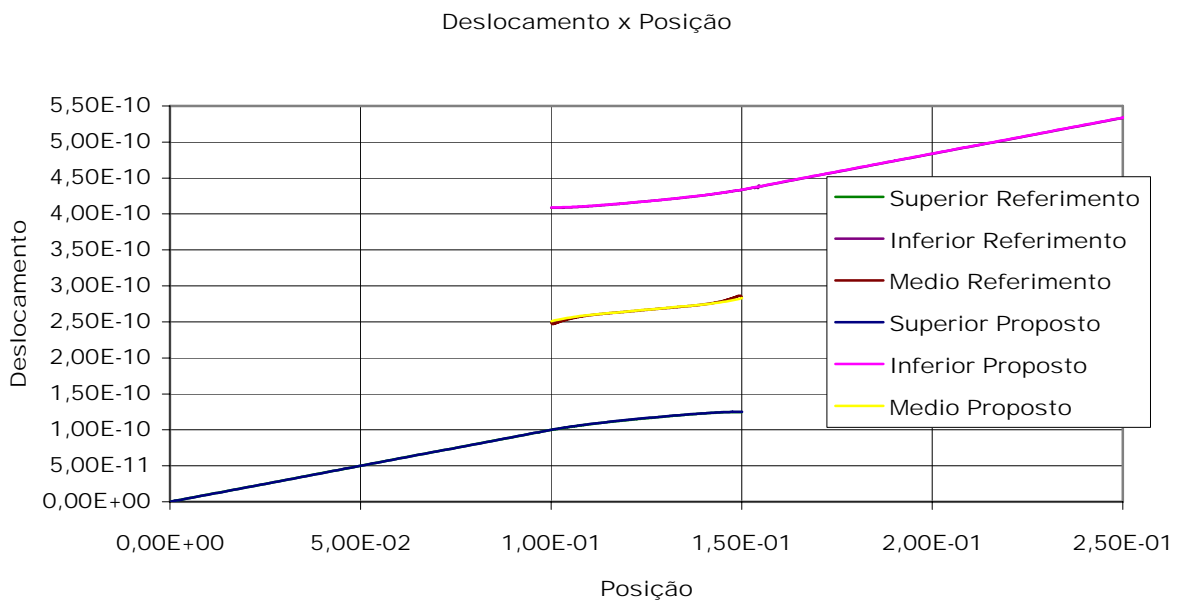


Figura 1 - Comparação entre as linhas médias do modelo proposto e de referência, com valores expressos em metros.

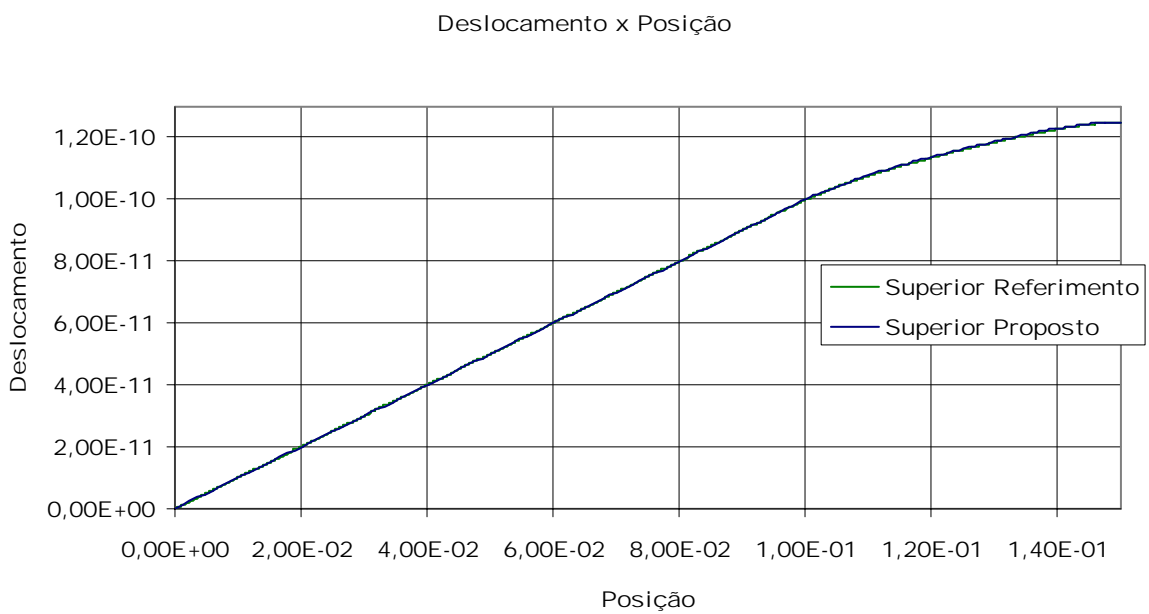


Figura 2 - Detalhe da comparação entre o modelo proposto e de referência, na linha média do aderente superior, com valores expressos em metros.

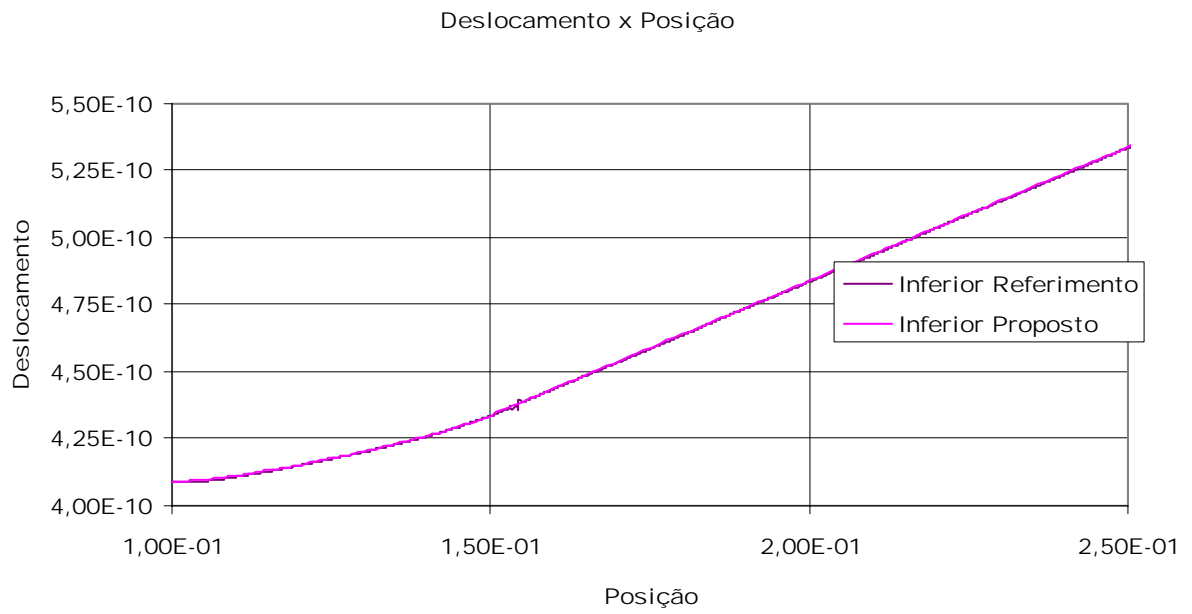


Figura 3 - Detalhe da comparação entre o modelo proposto e de referência, na linha média do aderente inferior, com valores expressos em metros.

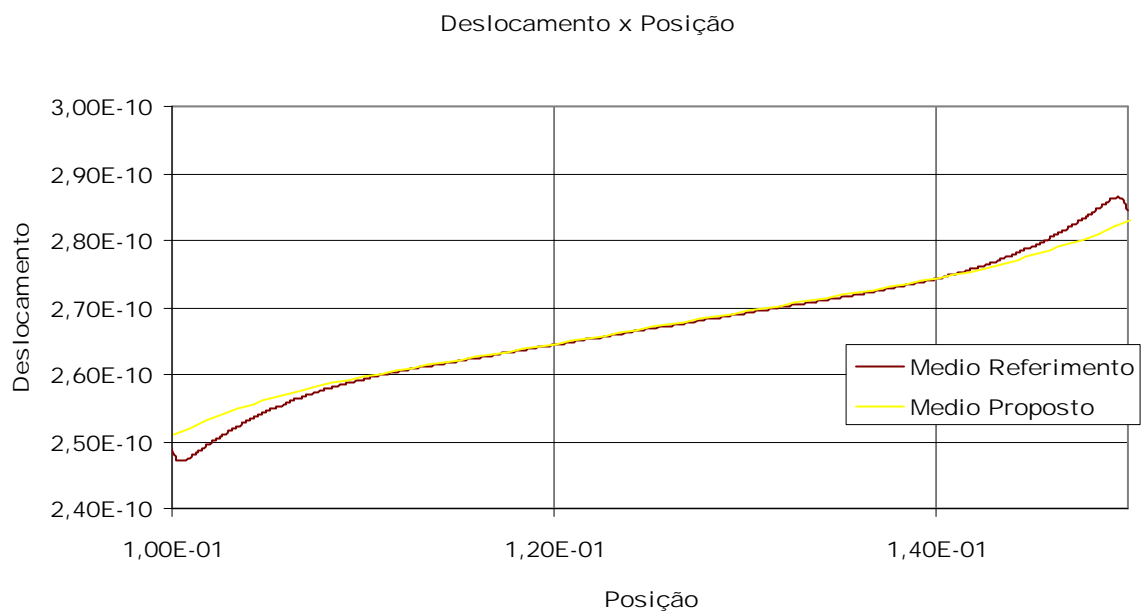


Figura 4 - Detalhe da comparação entre o modelo proposto e de referência, na linha média do adesivo, com valores expressos em metros.