



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Thaiane Oliveira Toscano Ximenes

Validação de modelo de elementos finitos para análise de juntas coladas como alternativa às análises experimentais

Belo Horizonte

2022

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Thaiane Oliveira Toscano Ximenes

Validação de modelo de elementos finitos para análise de juntas coladas como alternativa às análises experimentais

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Engenharia de Manufatura e Materiais

Linha de Pesquisa: Processo de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Antônio Ferreira Ávila

Belo Horizonte

2022

X7v

Ximenes, Thaiane Oliveira Toscano.

Validação de modelo de elementos finitos para análise de juntas coladas como alternativa às análises experimentais [recurso eletrônico] / Thaiane Oliveira Toscano Ximenes. - 2022.

1 recurso online (87 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Antonio Ferreira Ávila.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Apêndices: f. 82-87..

Inclui bibliografia.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Juntas (Engenharia) - Teses. 3. Método dos elementos finitos - Teses. 4. Compósitos - Teses. I. Ávila, Antonio Ferreira. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 621(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

FOLHA DE APROVAÇÃO

VALIDAÇÃO DE MODELO DE ELEMENTOS FINITOS PARA ANÁLISE DE JUNTAS COLADAS COMO ALTERNATIVA ÀS ANÁLISES EXPERIMENTAIS

THAIANE OLIVEIRA TOSCANO XIMENES

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, constituída pelos Professores: Dr. Antonio Ferreira Ávila (Orientador - Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG), Dr. Alexandre Queiroz Bracarense (Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG), Dr. Rudolf Huebner (Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG) e Dr. Almir Silva Neto (Departamento de Metalurgia e Química/CEFET-MG Timóteo), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "**Mestre em Engenharia Mecânica**", na área de concentração de "Engenharia de Manufatura e Materiais".

Dissertação aprovada no dia 21 de fevereiro de 2022.



Documento assinado eletronicamente por **Antonio Ferreira Avila, Professor do Magistério Superior**, em 03/03/2022, às 18:22, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Alexandre Queiroz Bracarense, Professor do Magistério Superior**, em 03/03/2022, às 20:49, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Rudolf Huebner, Professor do Magistério Superior**, em 04/03/2022, às 19:15, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Almir Silva Neto, Usuário Externo**, em 05/03/2022, às 09:03, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

A autenticidade deste documento pode ser conferida no site
https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?



[acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0](#), informando o código verificador **1271444** e o código CRC **55A63079**.

Referência: Processo nº 23072.210434/2022-91

SEI nº 1271444

A todos os cientistas que atuaram na busca da vacina para a COVID-19. Vocês trouxeram luz e esperança para tempos difíceis!

Agradecimentos

Não foi fácil chegar ao fim de uma jornada como essa, especialmente em um período tão atípico e de sofrimento para muitas famílias. Para chegar ao fim, foi preciso contar com a ajuda de muitas pessoas, que tornaram esse sonho possível. Primeiramente, meu agradecimento especial a meu orientador, Prof. Dr. Antônio Ferreira Ávila, que foi um exemplo de dedicação, paciência e profissionalismo ao longo desse trabalho. Professor, eu não chegaria ao fim sem o senhor!

Agradeço também aos professores Dr. Alexandre Queiroz Bracarense, Dr. Almir Silva Neto e Dr. Rudolf Huebner por terem aceitado participar desse momento tão especial fazendo parte da banca. Ao corpo docente do DEMEC importante na construção do conhecimento ao longo do programa para que fosse possível concluir esse trabalho. Em tempo, estendo os agradecimentos ao time administrativo, especialmente a Marina, que é uma pessoa incrível e me ajudou em vários momentos cruciais dessa jornada.

Por fim, agradeço aos meus pais, Carlos Alberto e Rovênia, aos meus irmãos, Pedro Henrique e Thayse, ao meu marido, Richardson, e a todos meus amigos. Cada um de vocês sabe a importância na minha vida e nenhum agradecimento será suficiente para expressar minha gratidão. Meu sincero obrigado a todos vocês!

“Para pequenas criaturas como nós, a vastidão é suportável somente através do amor.”

Carl Sagan

Resumo

As juntas coladas são cada vez mais utilizadas como alternativa aos métodos de fixação tradicionais. Porém, uma das principais desvantagens desse tipo de fixação é relacionado à dificuldade na realização de análises experimentais devido ao custo e o tempo despendido. Nesse sentido, o presente trabalho propõe a validação de uma metodologia para realizar análise de juntas coladas por elementos finitos. Para isso, o trabalho foi realizado em duas etapas. A primeira, para validação do método, onde utilizou-se como base modelos teóricos existentes e foram obtidos resultados com uma variação de apenas 0,34% em relação ao modelo de base, mostrando que o *script* utilizado funcionava de maneira adequada. Ainda nesta etapa, considerando a grande possibilidade da existência de algum tipo de dano durante a fabricação da junta colada, o *script* foi testado para uma junta com dano para se obter um aumento da tensão máxima de *Von Mises* na região da falha. Como resultado, foi obtido um aumento de 38%, mostrando, mais uma vez, a eficácia do modelo. Na segunda etapa, foi aplicado o *script* ao modelo de uma junta colada real, onde foi feito um estudo comparativo com resultados obtidos experimentalmente. Foram utilizados dois modelos, um com substrato de alumínio e um segundo com substrato de fibra de carbono. Além dessa condição, foram também analisadas amostras acrescidas de grafeno e submetidas a envelhecidos através de exposição à luz UV. Os resultados mostraram compatibilidade com os resultados experimentais por meio de duas análises. A primeira mostrou que, assim como nos resultados experimentais, as amostras que utilizaram fibra de carbono conseguiram suportar uma carga de aproximadamente 9% a mais do que as amostras que utilizaram substrato de alumínio. Já a segunda análise observou o comportamento das amostras que utilizaram grafeno e que foram submetidas a um envelhecimento por luz UV em comparação às amostras padrão, sem grafeno e sem envelhecimento. Como conclusão desta etapa, foram analisadas as distribuições de tensão das juntas obtidas através da análise de elementos finitos, onde foi possível observar que a região crítica da falha está compatível com a solução analítica, ou seja, se encontra na região de singularidade.

Palavras-chave: Junta colada. Elementos finitos. Compósitos.

Abstract

Bonded joints are increasingly used as an alternative to traditional fastening methods. However, one of its main disadvantages is the experimental analysis due to cost and required time. This work aims to validate a methodology to perform finite element analysis of bonded joints. For this purpose, this work was carried out in two stages. The first one to validate the method used the existing theoretical models as a reference and obtained the results with a slight variation of 0.34%, demonstrating that the script worked properly. Additionally, considering that damages in bonded joints are very likely during its manufacturing, the script was tested for a damaged bonded joint to obtain an increase in the maximum Von Mises stress in the region of the failure. As a result, an increase of 38% was obtained, demonstrating again the effectiveness of the model. In the second stage, the script was applied to the model of an actual bonded joint, where a comparative study was carried out concerning the results obtained experimentally. Two models were used, one with an aluminum substrate and one with a carbon fiber substrate, both aged or not through exposure to UV light and with or without graphene. The results demonstrated compatibility with the experimental results, based on two analyses. The first one proved that the samples that used carbon fiber could withstand a load of approximately 9% more than the samples that used aluminum substrate, results that are compatible with the ones obtained experimentally. The second analysis studied the behavior of samples that used graphene and were aged through exposure to UV light, compared to standard samples, without graphene and aging. As a conclusion, the stress distributions of the joints obtained through the analysis of finite elements were analyzed, where it was possible to observe that the critical region of the failure is compatible with the analytical solution, i.e., it is in the region of singularity.

Keywords: Bonded Joints. Finite Element. Composites.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Exemplo de material compósito e suas fases	19
Figura 2 – Exemplos de aplicação de compósitos na industria	21
Figura 3 – Comportamento mecânico de vários materiais	22
Figura 4 – Classificação geral dos compósitos	23
Figura 5 – Interação reforço x matriz	25
Figura 6 – Concreto Armado	27
Figura 7 – Exemplo de aplicação de matriz carbonosa	28
Figura 8 – Classificação dos nanocompósitos quanto à geometria	29
Figura 9 – Classificação quanto à dispersão das nanopartículas	30
Figura 10 – As quatro ligações do Carbono	31
Figura 11 – Estrutura do Grafeno	32
Figura 12 – Método de Esfoliação Mecânica (método da fita adesiva)	33
Figura 13 – Representação esquemática das rotas do processo de esfoliação química	34
Figura 14 – Representação esquemática do método de decomposição térmica	34
Figura 15 – Esquema da formação do grafeno por quimioabsorção	35
Figura 16 – Tipos de CNT	36
Figura 17 – Propriedades e Aplicações do CNT	37
Figura 18 – Estrutura típica de uma junta colada	38
Figura 19 – Exemplos de aplicações de adesivo na indústria aeronáutica	40
Figura 20 – Exemplos de aplicações de adesivo na indústria automobilística	40
Figura 21 – Tipos de juntas de sobreposição e qualificação da distribuição de tensão	41
Figura 22 – Malha de Elementos Finitos (para problema plano)	42
Figura 23 – Corpos de prova: Juntas <i>single-lap</i> A) Alumínio, B) Fibra de carbono	44
Figura 24 – <i>Tabs</i> de alinhamento	45
Figura 25 – Geometria do problema	45
Figura 26 – Configuração e parâmetros geométricos de SLJ sem fissuras	46
Figura 27 – Modos de utilização do ANSYS	46
Figura 28 – Selecionando o tipo de análise	47
Figura 29 – Tipo de Elemento	48
Figura 30 – Tipo de Elemento	48
Figura 31 – Definindo o primeiro material	49
Figura 32 – Definindo o segundo material	50
Figura 33 – Definindo o material	51
Figura 34 – Passo a Passo: Definindo os pontos	52
Figura 35 – Definindo a área	53
Figura 36 – Definindo tamanho do elemento para toda geometria	53

Figura 37 – Definindo tamanho do elemento para o adesivo	53
Figura 38 – Atributos da Malha	54
Figura 39 – Gerando a malha	55
Figura 40 – Tipo de Análise	56
Figura 41 – Passo a Passo: Aplicando a carga	56
Figura 42 – Aplicando condições de contorno	56
Figura 43 – Ativando a não-linearidade	57
Figura 44 – Passo a Passo: Solução	58
Figura 45 – Pós-Processamento	59
Figura 46 – Plotando Tensões de Von-Mises	59
Figura 47 – Malha gerada e condições de contorno aplicadas para análise de tensões.	62
Figura 48 – Solução Nodal da junta colada proposta no ensaio preliminar.	63
Figura 49 – Estrutura da junta colada do problema proposto 1.	64
Figura 50 – Malha gerada e condições de contorno aplicadas para análise de tensões.	65
Figura 51 – Malha gerada e condições de contorno aplicadas para análise de tensões	66
Figura 52 – Solução Nodal para a junta colada com 0% de adição de grafeno e sem envelhecimento	69
Figura 53 – Solução Nodal para a junta colada com 1% de adição de grafeno e 200h de envelhecimento.	70
Figura 54 – Solução Nodal para a junta colada com 2% de adição de grafeno e 400h de envelhecimento.	71

Lista de tabelas

Tabela 1 – Exemplos de matrizes por tipo de natureza	26
Tabela 2 – Comparação de métodos de síntese de grafeno. Mostra o número típico de camadas produzidas, tamanho das camadas de grafeno (maior dimensão) e mobilidade em Si/SiO ₂	32
Tabela 3 – Classificação dos Adesivos. Adaptado de Wahab (2014).	39
Tabela 4 – Comparação do Resultado	63
Tabela 5 – Variação de Resultados entre o modelo do ensaio preliminar e o problema proposto 1	66
Tabela 6 – Quantidade de nanopartícula utilizada e tempo de exposição à radiação UV	67
Tabela 7 – Máxima Tensão de <i>Von Mises</i> para substratos de Alumínio e Fibra de Carbono	68
Tabela 8 – Variação das tensões em comparação à amostra padrão	72

Lista de abreviaturas e siglas

APDL	<i>Ansys Parametric Design Language</i>
CNT	Nanotubos de Carbono (<i>Carbon Nanotubes</i>)
CVD	Deposição Química em Fase Vapor (<i>Chemical Vapour Deposition</i>)
FEA	Análise por Elementos Finitos (<i>Finite Elements Analysis</i>)
HOPG	Grafita Pirolítica Altamente Orientada (<i>Highly Ordered Pyrolytic Graphite</i>)
MWNT	Tubos de Carbono de Múltiplas Paredes (<i>Multi-Walled Carbon Nanotube</i>)
SLJ	Junta Sobreposta Única (<i>Single Lap Joint</i>)
SWNT	Tubos de Carbono de Parede Única (<i>Single Walled Carbon Nanotube</i>)
UV	Ultravioleta

Sumário

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Objetivos	18
1.2	Organização do Trabalho	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1	Compósitos	19
2.1.1	Histórico	20
2.1.2	Vantagens e Limitações	20
2.1.3	Classificação dos Compósitos	22
2.1.3.1	Classificação de acordo com o reforço	23
2.1.3.1.1	Compósitos Particulados	23
2.1.3.1.2	Compósitos Fibrosos	24
2.1.3.1.3	Compósitos Estrutural	24
2.1.3.1.4	Compósitos Laminados	24
2.1.3.2	Classificação de acordo com a matriz	24
2.1.3.2.1	Matriz Polimérica	24
2.1.3.2.2	Matriz Metálica	26
2.1.3.2.3	Matriz Cerâmica	26
2.1.3.2.4	Matriz Carbonosa	27
2.1.4	Propriedades	27
2.2	Nanocompósitos	27
2.2.1	Nanoestruturas de carbono	30
2.2.2	Grafeno	31
2.2.2.1	Método de Esfoliação Mecânica	33
2.2.2.2	Método Esfoliação Química	33
2.2.2.3	Método da Sublimação dos Carbetos (SiC - Térmico)	33
2.2.2.4	Método de Deposição Química na Fase Vapor (CVD)	34
2.2.3	Nanotubos de carbono (CNT)	35
2.2.3.1	Métodos de Síntese	36
2.2.3.2	Propriedades e Aplicações	37
2.3	Juntas coladas	38
2.3.1	Definição	38
2.3.2	Vantagem e Desvantagens	38
2.3.3	Classificação dos adesivos	39
2.3.4	Aplicações	40

2.3.5	Tipos de Juntas	41
2.4	Elementos Finitos	41
2.4.1	Ferramenta para Análise de Elementos Finitos - ANSYS	42
3	METODOLOGIA	44
3.1	Modelo dos resultados obtidos em análises experimentais	44
3.2	Modelos de Validação	45
3.3	ANSYS APDL	46
3.3.1	Roteiro para criação do modelo em elementos finitos	46
3.3.2	Definindo o tipo de Análise	47
3.3.3	Propriedades Mecânicas	48
3.3.4	Modelagem da junta de sobreposição simples	51
3.3.5	Geração da malha	52
3.3.6	Análise de Tensões	55
3.3.7	Grandes Deformações	57
3.3.8	Pós-Processamento	58
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	61
4.1	Modelagem de juntas coladas SLJ para predição de trincas	61
4.2	Ensaio Preliminar	61
4.3	Problema Proposto 1	63
4.4	Problema Proposto 2	66
5	CONCLUSÕES	74
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	75
	REFERÊNCIAS	76
	APÊNDICES	81
	APÊNDICE A – SCRIPTS	82

1 Introdução

Ao longo da evolução humana, houve uma constante busca de melhorias que trouxessem cada vez mais conforto e praticidade. O homem conseguiu dominar o fogo, criar técnicas para armazenar alimentos, criou a roda e nunca parou de inovar. A cada etapa, também surgiu a necessidade de novos materiais para suportar a inovação, a exemplo dos materiais compósitos artificiais, como madeira compensada, cartonagem, concreto e papel *maché*, que já são utilizados há mais de 2000 anos (SANTOS, 2019).

Como parte desse processo, também surgiram as juntas coladas, que são superfícies coladas de maneira definitiva através de um adesivo. Entre as inúmeras vantagens das juntas coladas, está a possibilidade de juntar os mais diversos tipos e formatos de materiais, porém, uma de suas principais desvantagens é a dificuldade de analisar/inspecionar as juntas, uma vez que estão coladas.

De acordo com Monteiro e Avila (2017), a evolução das juntas coladas nos últimos anos tem sido significativa, com o desenvolvimento de novos adesivos e novos formatos de juntas. No entanto, o estudo experimental de juntas coladas esbarra em alguns entraves. Os principais problemas são o custo do procedimento experimental e o tempo despendido durante os ensaios, principalmente no que diz respeito a problemas dependentes do tempo, tais como fadiga e envelhecimento. O problema de envelhecimento de juntas coladas foi estudado por Cruz (2013) e, nesse estudo, as juntas coladas foram expostas a luz ultravioleta para simular a exposição à luz solar. Muito embora o trabalho de Cruz (2013) possa ter fornecido resultados importantes, a grande maioria representou a resposta macroscópica da junta colada de sobreposição simples. Um estudo dos campos de deformação e de tensão no interior da junta não foi possível de ser realizado devido às condições do ensaio.

Nesse contexto, as análises experimentais possuem limitações importantes. Assim, procurando contribuir no modo de análise de juntas coladas, o presente trabalho propõe uma metodologia de análise por elementos finitos que permite mostrar a distribuição das tensões no estado plano de deformação nas condições experimentais do trabalho de Cruz (2013). O resultado das análises mostra que a simulação por esse método possui resultados compatíveis com o método experimental, demonstrando ainda o potencial de auxiliar na predição das tensões de falha da junta, porém, mais dados e experimentos precisam ser realizados para validar tal hipótese, sendo uma das sugestões para trabalhos futuros.

1.1 Objetivos

O principal objetivo deste trabalho é criar uma metodologia na forma de um *script* de modo a automatizar a análise de juntas coladas utilizando dois tipos de aderentes: metálicos e compósitos. Através dos resultados obtidos por uma análise de elementos finitos, possibilitada pelo *script*, é realizado um estudo comparativo entre a distribuição de suas tensões dentro da junta colada e os resultados obtidos experimentalmente.

1.2 Organização do Trabalho

O restante deste trabalho está organizado da seguinte forma:

- No **Capítulo 2**, é apresentada a revisão bibliográfica usada como referencial teórico para o desenvolvimento do trabalho. Buscou-se introduzir conceitos de materiais compósitos, nanocompósitos e juntas coladas, discutindo conceitos, propriedades, vantagens/desvantagens e aplicações. Ainda nesse item, também é abordado o tema de elementos finitos, método de análise utilizado nesse trabalho;
- No **Capítulo 3** traz a metodologia utilizada no trabalho, que é a análise por elementos finitos utilizando a plataforma *ANSYS Mechanical APDL*. Também detalha os passos necessários para a realização de uma análise nesse contexto para os modelos de juntas coladas;
- Na sequência, o **Capítulo 4** apresenta os problemas analisados, ou seja, onde o método anterior foi aplicado e apresenta uma discussão dos resultados encontrados;
- Por fim, o **Capítulo 5** finaliza esse trabalho resumando as conclusões e delineando sugestões para trabalhos futuros.

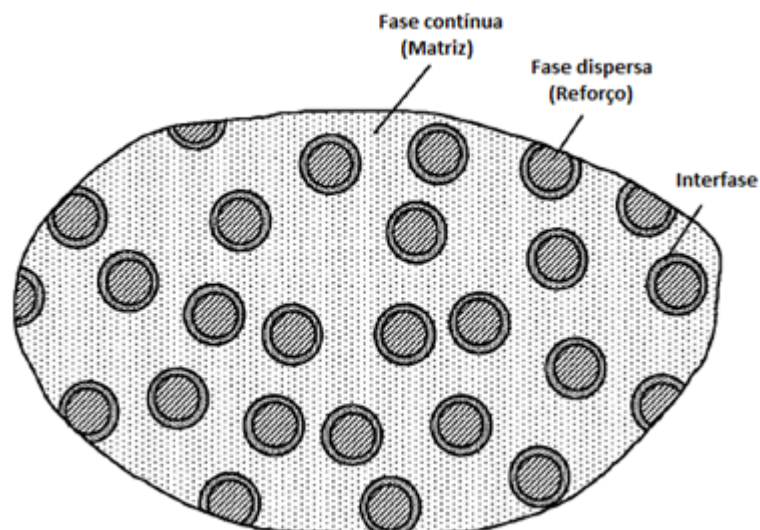
2 Revisão Bibliográfica

2.1 Compósitos

O dicionário [Aulete \(2020\)](#) define a palavra compósito como "composto, mesclado, heterogêneo; que tem vários préstimos, serve a diversas finalidades; feito de várias partes ou elementos diferentes; material formado pela mistura e aglutinação de duas ou mais substâncias". Um material compósito não é diferente disto, dizemos que um material é um compósito quando é composto de dois ou mais materiais combinados em uma escala macroscópica de maneira a formar um terceiro material ([JONES, 1998](#)). Ao se unirem, esses materiais não se descaracterizam, pois o objetivo é que mantenham suas propriedades físicas e mecânicas, de modo que, juntos, possam obter o melhor de cada estrutura, criando um material com propriedades superiores às dos materiais individuais usados como base.

As fases do compósito são comumente chamadas de reforço e matriz. O reforço é normalmente a parte descontínua, mais rígida e forte do material; já a matriz, é a fase menos rígida, mais fraca e é contínua ([DANIEL; ISHAI, 2006](#)). Entre as duas primeiras fases, ainda é possível que surja uma terceira fase, fruto da interação entre elas, chamada de interfase. Todas as fases estão demonstradas na Figura 1.

Figura 1 – Exemplo de material compósito e suas fases



Fonte: adaptado de [Daniel e Ishai \(2006\)](#)

Segundo [Daniel e Ishai \(2006\)](#), embora a interfase seja menor em dimensão, ela tem um importante papel no controle do mecanismo de falha, propagação, tenacidade à fratura e, sobretudo, no comportamento da tensão e deformação do material. Já o equilíbrio

entre as fases do material e suas devidas funções depende de sua aplicação. Como exemplo, Daniel e Ishai (2006) traz o caso dos compósitos estruturais de alta *performance*, onde o reforço da fibra é a espinha dorsal do material, o que determina sua rigidez e resistência na direção da fibra.

2.1.1 Histórico

Materiais compósitos, em sua forma natural, são usados desde a pré-história. Por exemplo, a madeira é uma combinação de fibras de celulosa e lignina. Já os compósitos artificiais evoluíram com a humanidade e estão inseridos no cotidiano há muitos séculos, a exemplo da fabricação de tijolos de barro reforçados com palha, com relatos de sua utilização já pelos egípcios. Outros tipos de compósitos comuns atualmente já eram usados há mais de 2000 anos, como a madeira compensada, cartonagem, concreto e papel *mâché* (SANTOS, 2019).

Com o passar do tempo e com o avanço das tecnologias, surgiram demandas por melhorias dos materiais, com grandes marcos nessa área registrados ao longo do século 20. No ano de 1942, foi concluída a construção do primeiro barco de fibra de vidro, seu uso em mísseis em 1950 e a descoberta da fibra de boro e carbono em 1960. Tal necessidade de melhoria se dava, principalmente, por uma busca de aumento de desempenho, de redução de peso e de ampliação da durabilidade (DANIEL; ISHAI, 2006).

Atualmente, os compósitos são essenciais em muitas indústrias, como aeroespacial, automobilística, náutica, energia, infraestrutura, estrutura, biomédica e petrolífera. A Figura 2 apresenta exemplos de algumas dessas aplicações.

2.1.2 Vantagens e Limitações

Há inúmeras vantagens de um material compósito em relação a um material monolítico. Daniel e Ishai (2006) cita como base do seu desempenho estrutural superior a alta resistência específica (resistência x densidade), alta rigidez específica e no caráter anisotrópico e heterogêneo do material. Apesar dessas e muitas outras vantagens, os compósitos também possuem limitações em relação a esses materiais, como o custo e complexidade do processo de fabricação. Nesse sentido, Daniel e Ishai (2006) aprofunda as vantagens e limitações dos materiais compósitos, caracterizando-as nas seguintes categorias:

1. **Micromecânica:** por sua alta rigidez e fibras de alta resistência, nesta escala o compósito tem vantagem sobre os materiais convencionais que, devido à sua homogeneidade, apresentam maior sensibilidade a falhas locais, tendo assim um comportamento frágil ou dúctil;

Figura 2 – Exemplos de aplicação de compósitos na industria



Fonte: Ventura (2012)

2. **Macromecânica:** a análise mais importante de um projeto estrutural. Nesta análise, deve-se encarar o material como homogêneo e anisotrópico. Como somente as propriedades em escala macroscópica são analisadas, o material convencional, cuja análise é muito mais simples, tem vantagens em relação aos materiais compósitos;
3. **Caracterização mecânica:** essa análise depende das propriedades e disposições dos materiais constituintes do compósito. Por demandar uma análise mais detalhada, essa análise também é mais simples para materiais isotrópicos convencionais;
4. **Projeto estrutural, análises e otimização:** uma de suas vantagens é poder criar simultaneamente e em um único processo, o projeto do material, o procedimento de fabricação e a estrutura. Por ser um processo flexível, que possibilita inúmeras vertentes, sua análise é mais complexa. Por outro lado, por mais simples que seja a análise do material convencional, ele é limitado no processo de otimização;
5. **Tecnologia de fabricação:** para os materiais convencionais são geralmente aplicados dois processos de fabricação diferentes: um para o material base e outro para a estrutura. Isso é diferente no compósito, visto que o processo de fabricação já é parte do elemento estrutural ou mesmo da estrutura completa (JONES, 1998);
6. **Facilidade de manutenção e durabilidade:** materiais convencionais tem a desvantagem de serem sensíveis a ambientes hostis, onde sofrem a ação de agentes

que afetam sua durabilidade (por exemplo, a corrosão para metais). Por sua vez, os materiais compósitos se comportam bem em tais ambientes por serem resistentes a fadiga e ser de fácil reparo e manutenção;

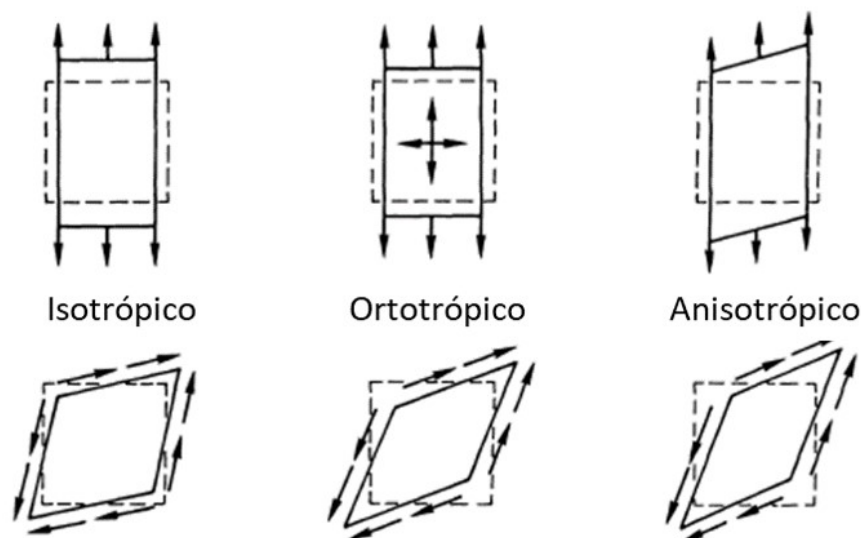
7. **Eficácia de custos:** os compósitos possuem grande vantagem nos custos ao longo de sua vida útil, dada a baixa necessidade de manutenção. Além disso, os custos com equipamentos para sua fabricação são inferiores aos usados no processo do material convencional, mas o custo da matéria-prima ainda é muito alto. Em contrapartida, os materiais convencionais têm alto custo nos equipamentos e mesmo no processo de fabricação, o que ainda é compensado pelo baixo custo de matéria-prima.

2.1.3 Classificação dos Compósitos

Um conceito muito utilizado e importante neste trabalho é a classificação segundo o comportamento do material, sendo as mais comuns:

- **Isotrópico:** quando as propriedades do material tem o mesmo valor, independente da direção;
- **Anisotrópico:** quando os valores das propriedades dependem da direção;
- **Ortotrópico:** quando os materiais são diferentes em direções perpendiculares entre si, ou seja, existe simetria em relação aos três planos perpendiculares (CAETANO, 2015). Jones (1998) mostra apresenta o comportamento de materiais segundo essa classificação, sob tensão normal e cisalhamento, na Figura 3.

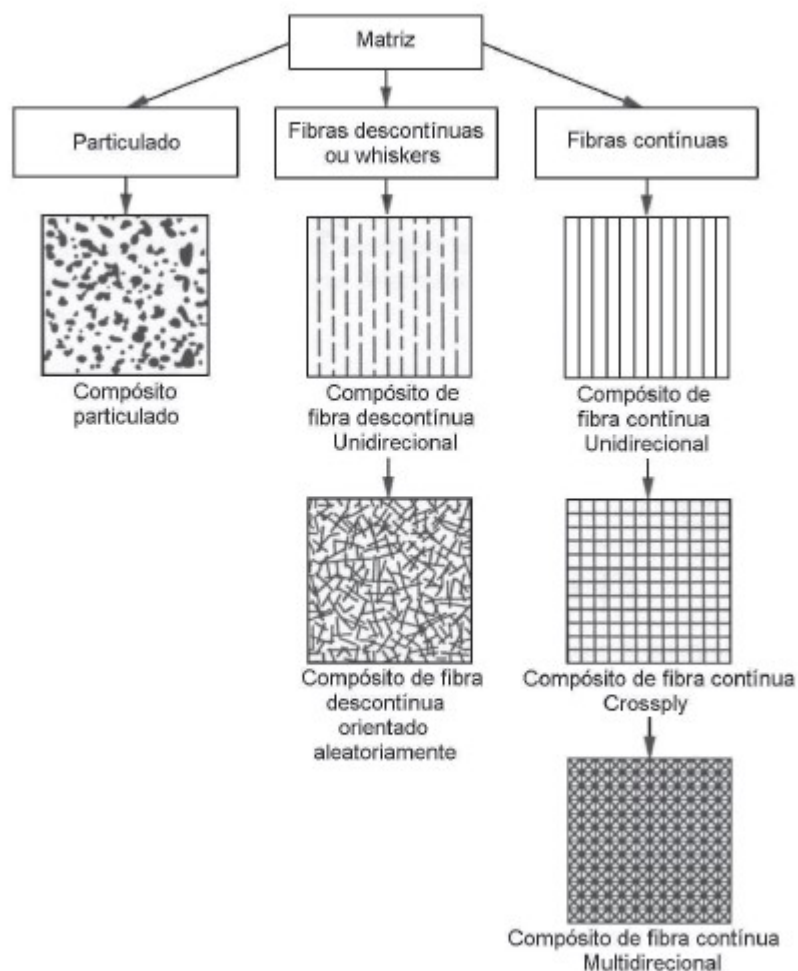
Figura 3 – Comportamento mecânico de vários materiais



Fonte: adaptado de Jones (1998)

De acordo com [Neto e Pardini \(2016\)](#), a classificação mais geral de um material compósito é definida como **Natural** ou **Sintético**. No presente trabalho, será dado ênfase aos materiais sintéticos. A classificação deles se dá em relação ao reforço e à matriz utilizados, conforme apresentado na Figura 4 e na subseção a seguir.

Figura 4 – Classificação geral dos compósitos



Fonte: [Monteiro \(2016\)](#)

2.1.3.1 Classificação de acordo com o reforço

Como já dito, o reforço é normalmente a parte descontínua, mais rígida e forte do material, eles podem ser classificados em Particulados, Fibrosos, Estrutural e Laminados.

2.1.3.1.1 Compósitos Particulados

Neste tipo de compósito, a matriz é constituída por partículas de tamanhos variados e formatos aleatórios, tornando-os quase homogêneo e isotrópico se avaliados em escala maior que o espaçamento macroscópico. Segundo [Daniel e Ishai \(2006\)](#), há também a possibilidade de distribuição uniforme, tornando-o mais heterogêneo.

2.1.3.1.2 Compósitos Fibrosos

Daniel e Ishai (2006) subdividem os compósitos reforçados com fibra em duas categorias: descontínuos (ou de fibra curta) e contínuos. Os descontínuos apresentam como reforço fibras curtas, nanotubos ou *whiskers* complementando a matriz.

2.1.3.1.3 Compósitos Estrutural

Na fase contínua, o reforço é composto por fibras longas e contínuas, caracterizando o compósito estrutural, pois apresenta vantagens quando se trata de rigidez e eficiência, já que oferece maior eficiência nestes quesitos.

2.1.3.1.4 Compósitos Laminados

A camada plana ou curva de fibras unidirecionais ou tecidos em uma matriz são denominadas de lâmina ou dobra. Os compósitos laminados são materiais ortotrópicos e, portanto, formados por duas ou mais camadas unidirecionais empilhadas em várias orientações e até espessuras. Esse material pode até ser híbrido, ou seja, composto de materiais diferentes.

2.1.3.2 Classificação de acordo com a matriz

Cruz (2013) descreve a matriz de um compósito como responsável por dar forma ao componente e principalmente por:

- Transferir o esforço solicitante para dentro e para fora das fibras;
- Separar as fibras para prevenir a falha de fibras adjacentes quando uma falhar;
- Proteger a fibra do ambiente.

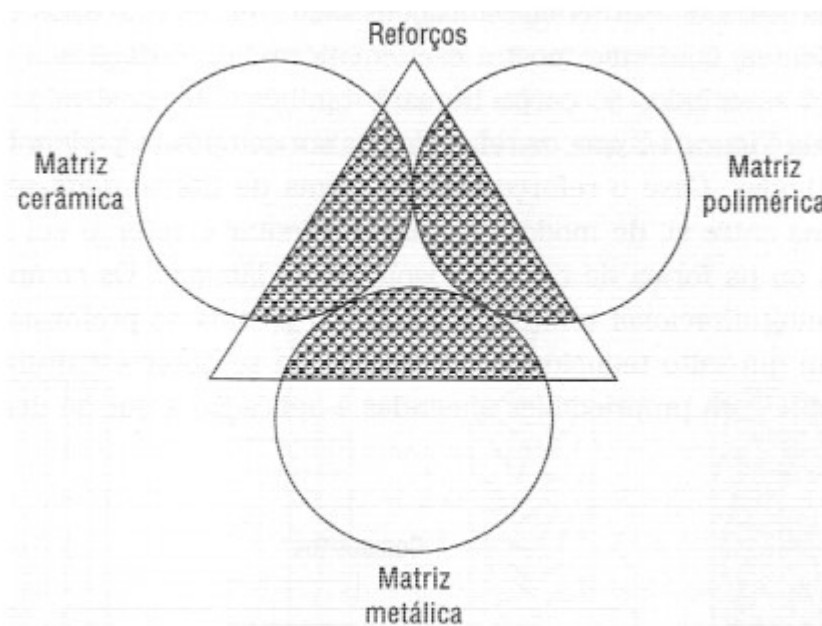
A Figura 5 mostra a relação de uma matriz com o reforço em compósito e as subseções a seguir aprofundam a classificação de acordo com a matriz.

2.1.3.2.1 Matriz Polimérica

Certamente, é o tipo de sistema de matriz mais utilizado. Essa matriz pode ser classificada como termorrígida ou termoplástica, ou seja, rígida ou maleável.

Os polímeros termorrígidos, também chamados de termofixos ou termoendurecidos, sofrem polimerização e reticulação durante o processo de cura, que é feito em altas temperaturas e com o auxílio de um agente endurecedor. Os termofixos mais comuns são poliésteres insaturados, epóxis, poliamidas e vinilésteres (DANIEL; ISHAI, 2006). Esse

Figura 5 – Interação reforço x matriz



Fonte: Soares (2018)

tipo de matriz polimérica apresenta ligação predominantemente covalente e, por isso, para o seu rompimento, é necessária uma grande quantidade de energia, logo, não são facilmente conformados (SOARES, 2018).

Já os termoplásticos, também conhecidos como resinas, são formados por cadeias saturadas, por isso, são materiais com maior capacidade de amolecer e fluir, portanto, são considerados materiais fáceis de serem conformados. Após conformado, esse processo pode ser revertido algumas vezes sem maiores danos às suas propriedades (CHEKER, 2016).

A Tabela 1 mostra alguns exemplos de matriz polimérica de acordo com sua natureza.

Tabela 1 – Exemplos de matrizes por tipo de natureza

Componente	Natureza	Exemplos
Matricial	Termoplástica	Poliamidas alifáticas Policarbonato Poli(sulfeto de fenileno) Poli(óxido de metileno) Poli-sulfonas Policetonas Poli(tereftalato de butileno)
	Termorrígida	Resina epoxídica Resina fenólica Poliéster insturado Poli-imidas

Fonte: adaptado de Soares (2018)

2.1.3.2.2 Matriz Metálica

Segundo Mallick (2007), a matriz metálica tem vantagem sobre a matriz polimérica quando sua aplicação exige resistência a longo prazo em ambientes severos, como altas temperaturas. Além disso, a matriz metálica pode ser deformada plasticamente e reforçada por uma série de tratamentos térmicos e mecânicos. Apesar disso, esse tipo de matriz tem como desvantagem o alto ponto de fusão, a alta densidade e uma tendência a corrosão na interface com o reforço.

Alguns exemplos de matrizes metálicas são as superligas à base de níquel, cobalto e molibdênio, ligas de alumínio, ligas de magnésio, ligas de titânio e ligas de cobre. Uma liga de alumínio combinado com fibra de carbono é um exemplo de compósito que tem sua aplicação em componentes de motores de automóveis.

2.1.3.2.3 Matriz Cerâmica

Callister (2006) define os materiais cerâmicos como compostos entre elementos metálicos e não-metálicos. É natural associar o termo cerâmica ao material tradicional, composto por cimento, vidro e minerais de argila, que é a porcelana. Porém, além destes, o autor destaca outros elementos comuns como óxido de alumínio (ou alumina, Al_2O_3), dióxido de silício (ou sílica, SiO_2), carboneto de silício (SiC) e nitreto de silício (Si_3N_4), que são desejáveis para aplicações com alta temperatura. Os materiais cerâmicos devem ainda ser divididos em duas formas, massa e fibra, cada um deles tem suas características próprias.

Algumas características da matriz cerâmica na forma de massa são: baixa resistência à tração e tenacidade, boa estabilidade térmica, alta dureza, baixa fluência e alta resistência à erosão. As cerâmicas na forma fibrosa são melhores em relação à resistência, à tração,

rigidez, fluência e estabilidade térmica (DANIEL; ISHAI, 2006). Um exemplo desse tipo de matriz é o concreto armado, mostrado na Figura 6, onde o concreto é a matriz e a ferragem é o reforço.

Figura 6 – Concreto Armado



Fonte: [Materiais Junior \(2020\)](#)

2.1.3.2.4 Matriz Carbonosa

Grande resistência mecânica, alta fluidez, baixa expansão térmica e ótima condutividade térmica, fazem dessa matriz uma das mais avançadas da engenharia atual. As matrizes carbonosas podem ser oriundas de resinas termorrígidas (principalmente resinas fenólicas), piche de petróleo, piche de alcatrão de hulha ou pela decomposição de gases orgânicos (metano e propano, por exemplo) (PARDINI; GONÇALVES, 2009). Dessa forma, é correto afirmar que há uma grande quantidade de carbonos diferentes a depender da matéria-prima e temperatura do tratamento térmico escolhido (SOARES, 2018). Um exemplo de uso dessa matriz é na indústria aeroespacial, como mostrado na Figura 7.

2.1.4 Propriedades

As propriedades dos materiais compósitos são definidas por características como natureza dos materiais constituintes, proporção, distribuição, comportamento mecânico e suas afinidades químicas, que afetarão a anisotropia do material (DANIEL; ISHAI, 2006).

Jones (1998) cita algumas das propriedades que podem ser melhoradas a partir da formação de um material compósito, como: resistência, rigidez, resistência a corrosão, resistência ao desgaste, atratividade, peso, vida útil, comportamento dependente da temperatura, isolamento térmico, condutividade térmica e isolamento acústico.

2.2 Nanocompósitos

Nesta sessão, serão analisados os materiais compósitos em sua escala nanométrica. Hussain et al. (2006) explica que essa transição de micropartículas para nanopartículas

Figura 7 – Exemplo de aplicação de matriz carbonosa



Fonte: Soares (2018)

produz mudanças dramáticas nas propriedades físicas. Dessa maneira, nanocompósito é quando um material compósito apresenta ao menos um de seus componentes em escala nanométrica, ou seja, menor que 100 nm. Devido às inúmeras propriedades e possíveis aplicações desses materiais, sua descoberta trouxe novas possibilidades no campo de ciência dos materiais, fazendo com que a academia e a indústria (como a aeroespacial, automobilística e médica), despertassem grande interesse sobre o assunto.

O seu desenvolvimento se deu da necessidade de sanar o principal problema na utilização do compósito tradicional, que apesar de suas muitas vantagens, tem como limitação a dimensão de suas fases. Essa linha de pesquisa tem como principal objetivo fazer uso de propriedades intrínsecas ligadas à estrutura básica dos materiais envolvidos, tais como ligações químicas primárias e arranjo atômico (BARBOSA, 2020).

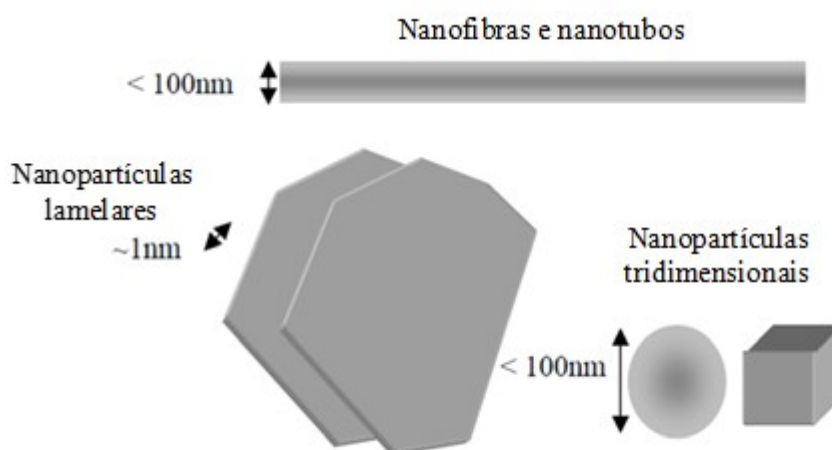
A exemplo do compósito tradicional, os nanocompósitos também são subclassificados de acordo com sua base. No presente trabalho, serão abordados os nanocompósitos poliméricos, que são aqueles com nanopartículas na matriz polimérica, como polímeros reforçados por uma pequena quantidade de nanopartículas. Segundo Hussain et al. (2006), são dois os principais fatores que diferenciam as propriedades de um nanocompósito de outros materiais: o aumento da área da superfície e efeitos quânticos.

O nanocompósito polimérico é bastante atrativo por apresentar vantagens como o processo de fabricação e processamento similar ao compósito polimérico convencional, a combinação única das suas características (como tamanho e propriedades mecânicas) e as baixas concentrações necessárias para alterar eficientemente uma matriz polimérica (HUSSAIN et al., 2006). Outra vantagem das nanopartículas é que não criam concentrações

de tensão, não comprometendo assim a ductilidade da matriz, resultando ainda em um aumento da área na interface do compósito (AJAYAN; SCHADLER; BRAUN, 2003).

Os nanocompósitos podem ser classificados quanto à geometria, sendo divididos em materiais fibrosos (nanofibras ou nanotubos), em camadas (nanopartículas lamelares) ou particulados (nanopartículas tridimensionais) (AJAYAN; SCHADLER; BRAUN, 2003; HUSSAIN et al., 2006). Tais classificações são representadas na Figura 8.

Figura 8 – Classificação dos nanocompósitos quanto à geometria



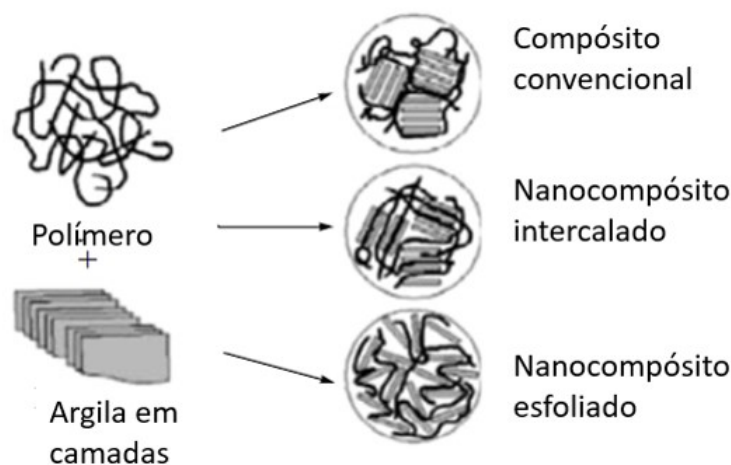
Fonte: adaptado de Ajayan, Schadler e Braun (2003)

Uma das grandes questões dos estudos relacionados aos nanocompósitos é a interface, isso porque, segundo Suvorova et al. (2013), junto com a natureza das interações nas fases, a estrutura das áreas da interface é um fator muito importante na definição das propriedades finais do material. Um exemplo de um caso que pode apresentar grandes modificações nas propriedades do polímero base é o aumento da área de interface devido à adição de nanopartículas, que cria uma região onde a interface interage em três dimensões dentro da matriz polimérica (AJAYAN; SCHADLER; BRAUN, 2003).

Além da classificação discutida anteriormente, as nanopartículas fibrosas e nanopartículas em camadas podem ser classificadas quanto à dispersão das nanopartículas na matriz polimérica, podendo ser aglomerados ou convencionais, intercalado ou esfoliado, conforme exemplo apresentado na Figura 9.

No caso dos aglomerados, é obtido um compósito de fase separada, que, em termos de propriedades, é bem similar ao microcompósito comum, visto que o polímero não é capaz de penetrar entre as camadas da nanopartícula. O contrário ocorre nas intercaladas, pois o polímero consegue penetrar entre as camadas da nanopartícula, apresentando camadas de nanopartículas e polímeros bem definidas. Por fim, quando a nanopartícula é completamente dispersa e uniforme na matriz polimérica, obtém-se a estrutura esfoliada (HUSSAIN et al., 2006). Dessas três classificações, a esfoliada é a que apresenta melhor

Figura 9 – Classificação quanto à dispersão das nanopartículas



Fonte: adaptado de [Suvorova et al. \(2013\)](#)

características mecânicas, como módulo de elasticidade ([SUVOROVA et al., 2013](#)).

Alguns materiais de origem natural são muito utilizados em nanocompósitos poliméricos, a exemplo da argila. Porém, esse tipo de material não apresenta uma boa condutividade térmica e elétrica. Por isso, materiais nanoestruturados, como os nanotubos de carbono, grafeno, nanocerâmicas, nanopartículas de prata, ouro e sílica são mais explorados. Segundo [Kuilla et al. \(2010\)](#), as nanoestruturas de carbono são inseridas na preparação dos nanocompósitos com o objetivo de melhorar a condutividade desses materiais.

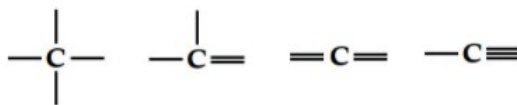
2.2.1 Nanoestruturas de carbono

O carbono, na sua forma de carvão vegetal, é utilizado pelo homem desde a pré-história, mas só em 1779 foi descrito por Antoine Lavoisier como um elemento químico ([HOLGADO, 2012](#)). Nesse sentido, é um elemento que apresenta alotropia, ou seja, pode ser encontrado em diversas formas, sendo as mais comuns o grafite e o diamante ([FERREIRA, 2020](#)).

No meio dos compósitos há um grande interesse em utilizar carbono devido a sua combinação única de propriedades físicas e químicas. Por apresentar alta reatividade, o carbono é capaz de formar vários compostos moleculares e sólidos cristalinos. É ainda um composto tetravalente, ou seja, ele é capaz de realizar quatro ligações químicas covalentes com outros átomos ([FERREIRA, 2020](#)). Essas quatro ligações podem se apresentar nas formas de ligações simples, duplas ou triplas conforme mostrado na Figura 10.

De forma mais recente, houve a descoberta do carbono em sua forma cristalina e seus representantes mais comuns são os nanotubos de carbono (CNT, do inglês *Carbon*

Figura 10 – As quatro ligações do Carbono



Fonte: [Ferreira \(2020\)](#)

Nanotubes) e o grafeno. Segundo [Wong e Akinwande \(2011\)](#), essas novas formas apresentam propriedades bem diferentes dos alótropos de carbono mais conhecidos como grafite e diamante.

[Souza \(2014\)](#) explica em seu trabalho que em todos os cristais existem planos que são constituídos de íons, átomos ou moléculas de um determinado tipo. Se em um determinado plano a energia de ligação é maior que nos demais, então essa estrutura é classificada como lamelar. Isso significa que, mesmo submetido a um processo físico ou químico a distância, o plano pode até mudar, mas a estrutura entre cada plano permanece idêntica.

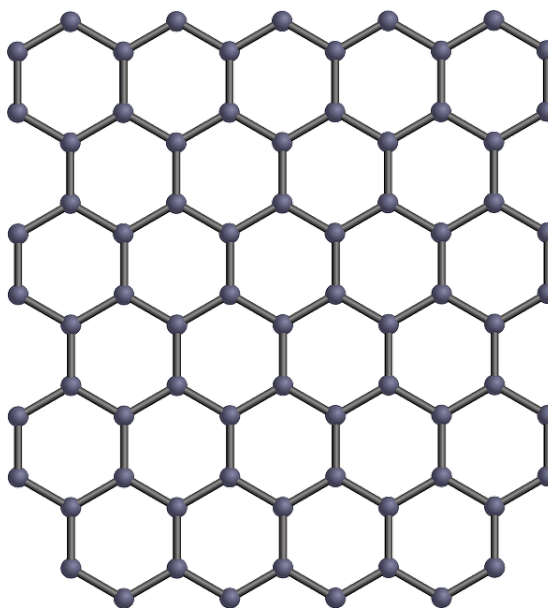
O carbono é um dos cinco elementos responsáveis pela formação dessas estruturas lamelares, e o responsável pela estrutura do grafite. Entre as características que tornam o grafite um material com grande potencial, destacam-se: excelente condutividade de calor e de eletricidade, resistência a altas temperaturas e ataques químicos, compressão, maleabilidade, altamente refratário em atmosfera inerte, biocompatível e com ponto de fusão de aproximadamente 3650° C ([SOUZA, 2014](#)).

2.2.2 Grafeno

[Azevedo \(2007\)](#) define o grafeno como um material composto por uma camada bidimensional de átomos de carbono organizados em estruturas hexagonais, mostrado na Figura 11, cuja altura é equivalente à um átomo. O grafeno é também considerado a estrutura básica responsável pela formação de outros alótropos de carbono como os fulerenos, nanotubos de carbono e grafite [Polschikov et al. \(2013\)](#).

O grafeno foi descoberto em 2004 e, desde então, tem chamado atenção por conta de suas propriedades, o que resultou no aumento de pesquisas em diferentes áreas de interesse. Uma delas, é o campo da eletrônica e optoeletrônica. [Tavakoli et al. \(2020\)](#) descrevem o grafeno como um dos materiais 2D mais promissores do mundo, devido às suas ótimas propriedades físicas como: alta condutividade elétrica, altíssima mobilidade, enorme área de transferência ($\approx 2600m^2g^{-1}$), alta transmitância da luz visível ($\approx 98\%$), além de ótimas propriedades mecânicas. Em outra pesquisa, [Avila et al. \(2010\)](#) mostraram que a presença de nanofolhas de grafeno em uma matriz polimérica parece ter influência na resistência dos compósitos ao fogo. Em outra frente, [Segundo e Vilar \(2016\)](#) discutem o papel do grafeno no campo da eficiência energética diante da crescente demanda de consumo de

Figura 11 – Estrutura do Grafeno



Fonte: Pixabay (2013)

energia, o que leva à necessidade de desenvolvimento de sistemas e dispositivos de alto desempenho que possibilitem um consumo mais eficiente.

São muitos os processos que vem sendo desenvolvidos para a produção do grafeno. Nestes, o principal objetivo é aproximar-se ao máximo de suas propriedades teóricas, produzindo estruturas com baixa densidade de defeitos e com o menor número de camadas possível. Assim, alguns dos principais métodos de síntese do grafeno são: esfoliação mecânica, sublimação de carbetos (SiC - Térmico) e diferentes técnicas de deposição química na fase vapor (CVD, do inglês *Chemical Vapour Deposition*) (GARNICA, 2017). Na Tabela 2, Cooper et al. (2012) resumizam tais métodos, mostrando o número típico de camadas de grafeno produzidas, bem como as dimensões atualmente alcançáveis por método.

Tabela 2 – Comparação de métodos de síntese de grafeno. Mostra o número típico de camadas produzidas, tamanho das camadas de grafeno (maior dimensão) e mobilidade em Si/SiO₂

Método	Camadas	Tamanho	Mobilidade ($cm^2V^{-1}s^{-1}$)
Esfoliação	1 a 10+	1 mm	15000
SiC - Térmico	1 a 4	50 μm	2000
Ni-CVD	1 a 4	1 cm	3700
Cu-CVD	1	65 cm	16000

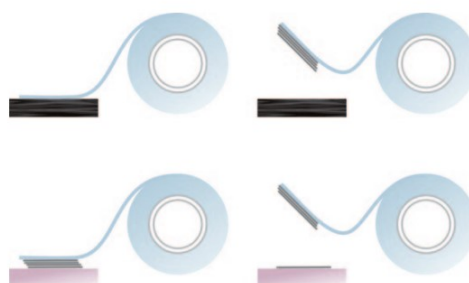
Fonte: adaptado de Cooper et al. (2012)

Alguns dos métodos citados na Tabela 2 são aprofundados nas subseções a seguir.

2.2.2.1 Método de Esfoliação Mecânica

O método de Esfoliação Mecânica, ilustrado na Figura 12, surgiu em 2004 quando Novoselov et al. (2004) utilizaram em seu trabalho um método que envolvia a preparação dos filmes de grafeno por esfoliação mecânica (descamação repetida) de pequenas mesas de Grafita Pirolítica Altamente Orientada (HOPG, do inglês *Highly Ordered Pyrolytic Graphite*). Neste processo, o grafite de alta pureza foi esfoliado com uma fita adesiva de forma repetida para descamar flocos de grafeno das mesas. Com essa técnica, eles foram capazes de gerar alguns flocos com camada única com dimensões de até 10 μm . Porém, a desvantagem desse processo é que ele é limitado a pequenos tamanhos, não podendo ser produzido em escala industrial (COOPER et al., 2012).

Figura 12 – Método de Esfoliação Mecânica (método da fita adesiva)



Fonte: Novoselov (2011)

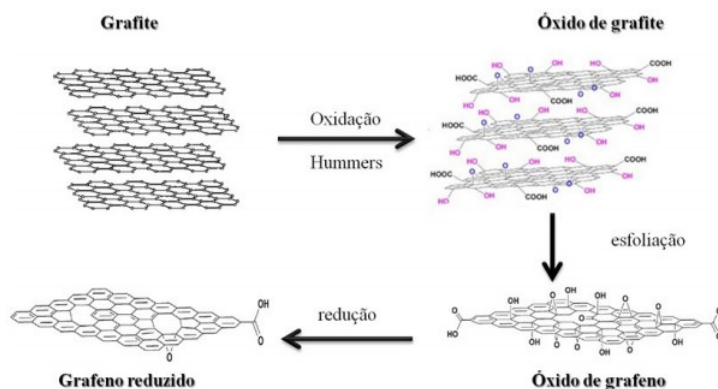
2.2.2.2 Método Esfoliação Química

Esse método é o que apresenta melhor resultado quando se trata da obtenção de grandes quantidades de amostra. Ele depende de rotas químicas, e consiste em três etapas: a oxidação do grafite por óxido de grafite, a esfoliação do óxido de grafite com óxido de grafeno e a redução química do óxido de grafeno a grafeno. O método de esfoliação química, com todas as suas etapas, é exemplificado na Figura 13. A grande desvantagem desse processo é a permanência de agrupamentos oxigenados, que provocam defeitos estruturais e, portanto, geram amostras com baixa qualidade estrutural (ZARBIN; OLIVEIRA, 2013).

2.2.2.3 Método da Sublimação dos Carbetos (SiC - Térmico)

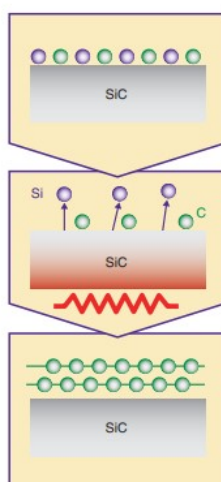
Este método consiste em desenvolver epitaxialmente grafeno de poucas camadas em um substrato de carbeto de silício através da decomposição térmica. Quando esses substrato são submetidos a altas temperaturas, os átomos de Si tendem a se separar da superfície, deixando apenas o átomo de carbono. Tal processo, ilustrado na Figura 14, forma o grafeno naturalmente (HIBINO; KAGESHIMA; NAGASE, 2010).

Figura 13 – Representação esquemática das rotas do processo de esfoliação química



Fonte: [Zarbin e Oliveira \(2013\)](#)

Figura 14 – Representação esquemática do método de decomposição térmica



Fonte: [Hibino, Kageshima e Nagase \(2010\)](#)

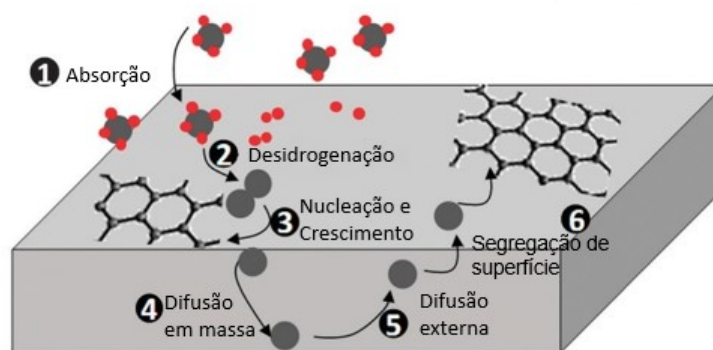
2.2.2.4 Método de Deposição Química na Fase Vapor (CVD)

Neste método, diferente de outros processos, o carbono não está presente no substrato. Desse modo, ele é inserido em forma de gás e utiliza um mesmo metal pesado exercendo as funções de catalisador e substrato para que possa crescer a camada de grafeno ([COOPER et al., 2012](#)).

Esse processo, representado na Figura 15, foi desenvolvido pela necessidade de um processo confiável que fabricasse grafeno de áreas maiores em metais de transição como Cobre (Cu) e Níquel (Ni). O Ni-CVD é um processo que contém duas etapas: a primeira, para que ocorra a incorporação de átomos de carbono no substrato de Ni, e a segunda, que consiste na difusão externa na superfície de Ni, onde acontece o resfriamento rápido do substrato, formando uma camada de grafeno ([LOSURDO et al., 2011](#)). Por sua vez, no Cu-CVD o grafeno é sintetizado em folhas de cobre policristalino ou por filme de cobre depositado por evaporação térmica ([BARCELOS, 2011](#)). Quando se trata de grafeno

monocamada, o método Cu-CVD, por se tratar de um processo em superfície controlada, é mais eficiente (LOSURDO et al., 2011).

Figura 15 – Esquema da formação do grafeno por quimioabsorção



Fonte: Losurdo et al. (2011)

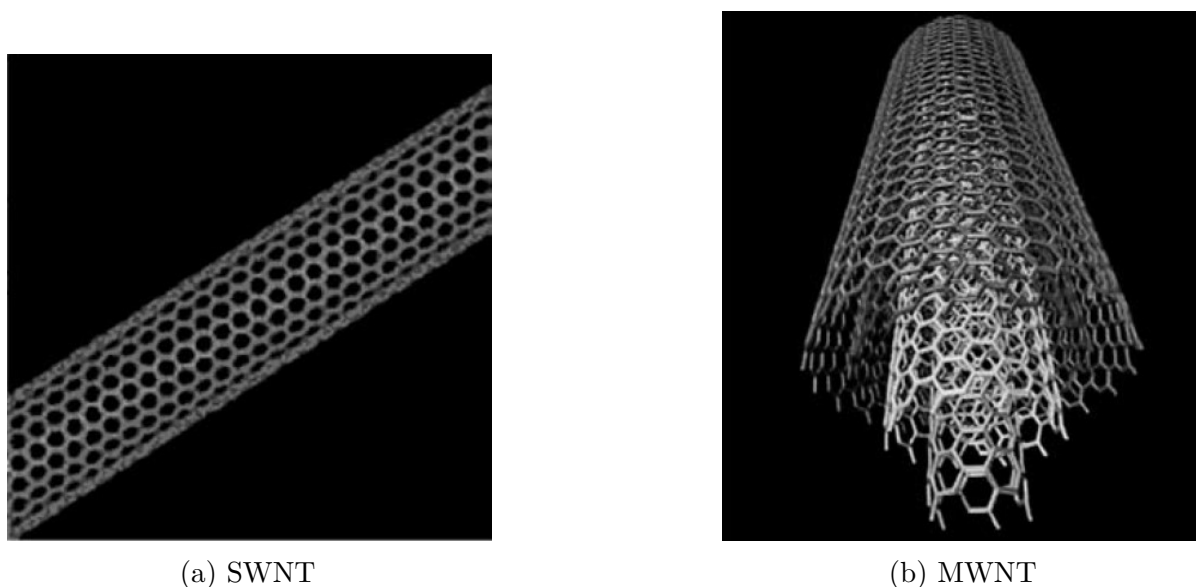
2.2.3 Nanotubos de carbono (CNT)

Os nanotubos de carbono foram descobertos em 1991 e, desde então, têm sido cobijados em muitas áreas. Isso ocorre porque eles têm uma estrutura singular, que proporciona excelentes propriedades mecânicas, térmicas, elétricas e óticas. Como exemplo dessas qualidades, é possível citar seu módulo de elasticidade, que chega a ser até 4 vezes maior que a da fibra de carbono, sua condutividade térmica, em torno de 2 vezes a do diamante, e sua condutividade elétrica, que chega a ser 1000 vezes maior que a do cobre (MALLICK, 2007).

Du e Winey (2006) explicam que os nanotubos são divididos em dois tipos: os de parede única (SWNT, do inglês *Single Walled Carbon Nanotube*), que são aqueles formados por uma única folha de grafite que se enrola em formato de tubo com perfeição, e os de múltiplas paredes (MWNT, do inglês *Multi-Walled Carbon Nanotube*), que são aqueles que englobam uma série de nanotubos alinhados concentricamente. Os dois tipos são mostrados na Figura 16.

Ainda de acordo com Du e Winey (2006), existem três desafios principais para aplicação dos nanotubos de carbono em matrizes poliméricas. O primeiro é obter uma dispersão uniforme na matriz polimérica, devido ao fato de nanotubos não terem nem estruturas, nem propriedades simétricas. O segundo, é a necessidade de se compreender os efeitos deles nas propriedades dos compósitos. Por fim, o terceiro desafio é criar ligações físicas e químicas fortes o suficiente entre os CNT e a matriz polimérica.

Figura 16 – Tipos de CNT



Fonte: [Du e Winey \(2006\)](#)

2.2.3.1 Métodos de Síntese

Assim como para o grafeno, o CVD também pode ser usado para a síntese do CNT. Além desse método, as técnicas de descarga por arco e ablação por laser são comumente utilizadas. A lista a seguir descreve os métodos e discute brevemente suas vantagens ([IBRAHIM, 2013](#)):

- **CVD:** tem como vantagens a obtenção a uma temperatura mais baixa e a deposição do catalisador diretamente sobre o substrato. Esses fatores fazem com que os CNT tenham uma estrutura bem mais organizada. Por conseguir controlar a direção do crescimento no substrato, é possível sintetizar uma grande quantidade de nanotubos usando esse método;
- **Descarga por Arco:** nesse método, acontece a evaporação de descargas de arco de corrente contínua em um eletrodo de carbono dentro de um ambiente de argônio. Com isso, agulhas de carbono são formadas na extremidade negativa do eletrodo. Essa técnica também permite gerar uma grande quantidade de CNT;
- **Ablação por Laser:** nesta técnica, o alvo de grafite é bombardeado com *laser*. A partir daí, o tubo cresce até que átomos de catalisador se juntem na ponta do nanotubo. Sua vantagem é a obtenção de uma estrutura mais bem grafitada e com maior pureza que a produzida em outros métodos.

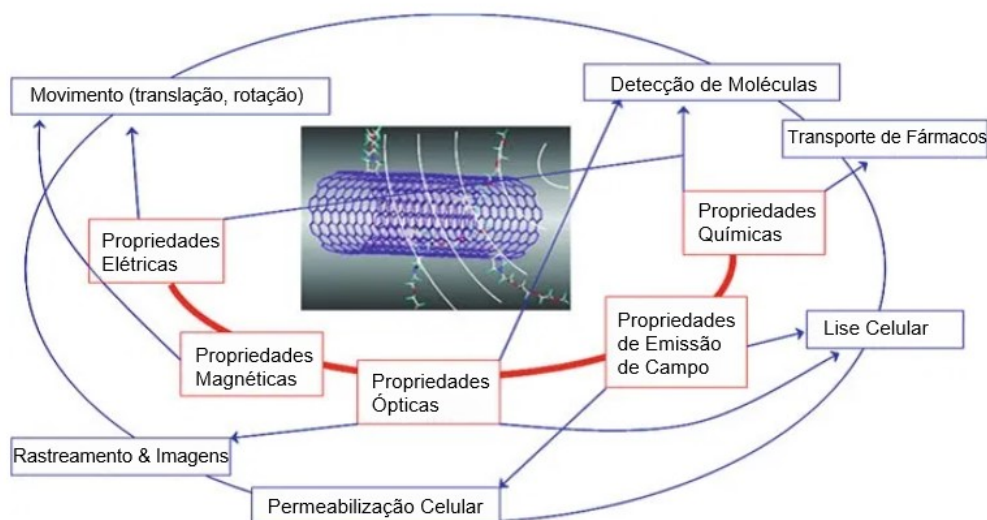
2.2.3.2 Propriedades e Aplicações

Segundo Fischer (2006), para um novo material ser viável, ele deve apresentar vantagens que justifiquem a substituição de um material já existente, como uma nova capacidade. Aplicações em larga escala dos nanotubos são bastante prováveis por serem multifuncionais, ou seja, que tem múltiplas propriedades atrativas, como partes estruturais leves e rígidas, com baixa expansão térmica e alta condutividade elétrica. Um resumo das principais propriedades dos CNTs é apresentado a seguir:

- **Propriedades Mecânicas:** o interesse nas propriedades mecânicas dos CNT começa na força da ligação carbono-carbono que, teoricamente, são mais fortes e rígidas que qualquer outra substância conhecida (FISCHER, 2006).
- **Propriedades Térmicas:** a sua estrutura única e tamanho reduzido estão diretamente relacionadas às propriedades térmicas. As maiores condutividades térmicas conhecidas são a do diamante e a do grafite. Espera-se dos nanotubos de carbono um desempenho do mesmo nível (HONE et al., 2002).
- **Propriedades Eletrônicas:** por causa de sua dimensão reduzida, alta condutividade e alta resistência a tensões e boa flexibilidade, o nanotubo de carbono pode atuar como uma nanosonda, que consegue obter ainda melhores informações que qualquer outra sonda (ARAUJO, 2016).

Com tais propriedades, as aplicações do CNT são muito variadas, desde sua aplicação principal, como reforço estrutural, a aplicações na indústria farmacêutica (MECH LECTURES, 2017). A Figura 17 estabelece a relação entre as propriedades e algumas aplicações.

Figura 17 – Propriedades e Aplicações do CNT



Fonte: Adaptado de Mech Lectures (2017)

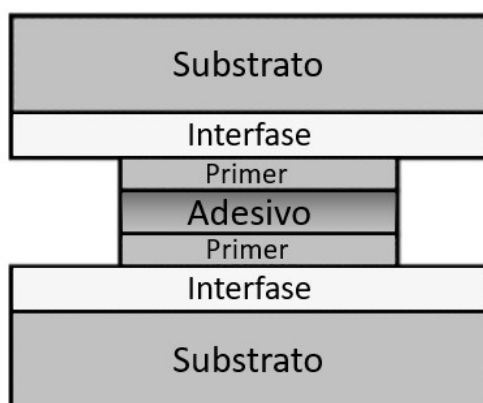
2.3 Juntas coladas

2.3.1 Definição

Em seu trabalho [Monteiro e Avila \(2017\)](#) explanam sobre como as juntas coladas surgiram como alternativa aos métodos tradicionais de fixação (parafusos e rebites), que não são os mais adequados para materiais compósitos com substrato de fibra. Segundo [Wahab, Ashcroft e Crocombe \(2004\)](#) as vantagens da colagem adesiva como técnica de união sobre a fixação mecânica envolve uma significativa redução de peso, custo, melhora no desempenho estrutural e a resistência à fadiga.

A definição de adesivo é dita por [Wahab \(2014\)](#) como uma substância capaz de juntar duas superfícies de modo forte e permanente. O objetivo do adesivo ao aderir aos substratos é transferir as forças entre eles de uma maneira que essa união só será rompida se o adesivo for destruído. Anteriormente, foi abordado o conceito de interface. No contexto atual, será tratado da interfase, que não se trata da mesma coisa. A interfase tem propriedades diferentes do adesivo e do substrato, sendo uma fina região que fica próxima à região de contato entre eles. A Figura 18 mostra um exemplo típico de uma estrutura de junta colada.

Figura 18 – Estrutura típica de uma junta colada



Fonte: adaptado de [Wahab \(2014\)](#)

[Ebnesajjad \(2008\)](#) explica que essa ligação adesiva, ou junta colada, é classificada de duas formas: estrutural e não-estrutural. As estruturais são aquelas que podem experimentar grandes tensões até seu ponto de escoamento e, portanto, são capazes de transmitir essas tensões sem alterar sua integridade. Por outro lado, as não-estruturais, ou adesivo de fixação, têm apenas a função de manter juntos materiais leves.

2.3.2 Vantagem e Desvantagens

Em seu trabalho, [Wahab \(2014\)](#) aborda as principais vantagens e desvantagens das juntas coladas. As principais estão resumidas a seguir:

- **Vantagens**

1. Pode unir grandes superfícies, materiais diferentes e substratos bem finos;
2. Fora das bordas, tem uma boa distribuição de carga;
3. Possui excelente desempenho quanto à fadiga;
4. Alta relação peso/resistência.

- **Desvantagens**

1. Podem ser necessários longos períodos de cura;
2. Uma vez coladas, a inspeção das juntas é mais difícil;
3. Tem sensibilidade a altas temperaturas e umidade.

2.3.3 Classificação dos adesivos

Os diversos tipos de adesivos são classificados de diferentes formas e é de grande importância a escolha certa para cada tipo de aplicação. As classificações mais comuns são por função, composição química, método de reação, forma física, custo (por ter um importante papel na seleção do adesivo, acaba sendo um método de classificação, mesmo que indiretamente) e aplicação (WAHAB, 2014). A Tabela 3 sintetiza as principais definições de cada classificação.

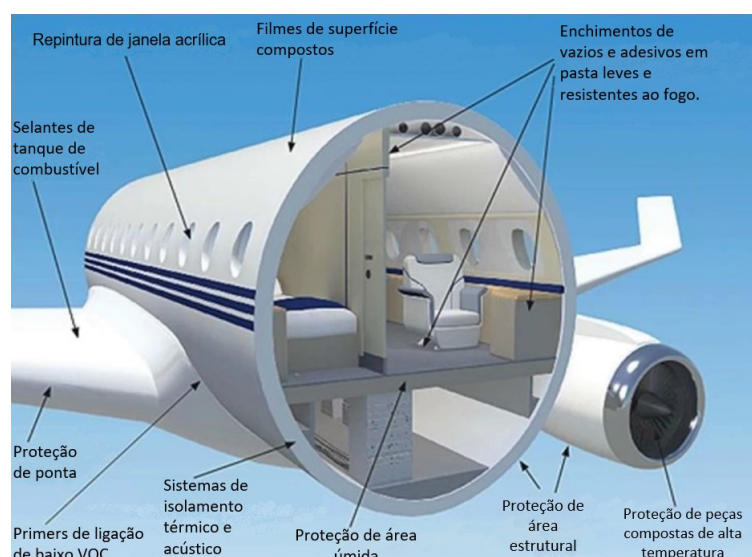
Tabela 3 – Classificação dos Adesivos. Adaptado de Wahab (2014).

Função	Estrutural Não-Estrutural
Composição química	Termocura Termoplástico Elastomérico Híbrido
Método de reação	Reação química Perda de solvente Perda de água Resfriado do derretimento
Forma física	Sólido 100% pasta sólida e líquida 100% pasta sólida e líquida com solvente para reduzir a viscosidade
Custo	Incluindo mão de obra, equipamentos, tempo de cura e perda devido a juntas defeituosas
Utilização Final	Tipo de substrato Ambientes

2.3.4 Aplicações

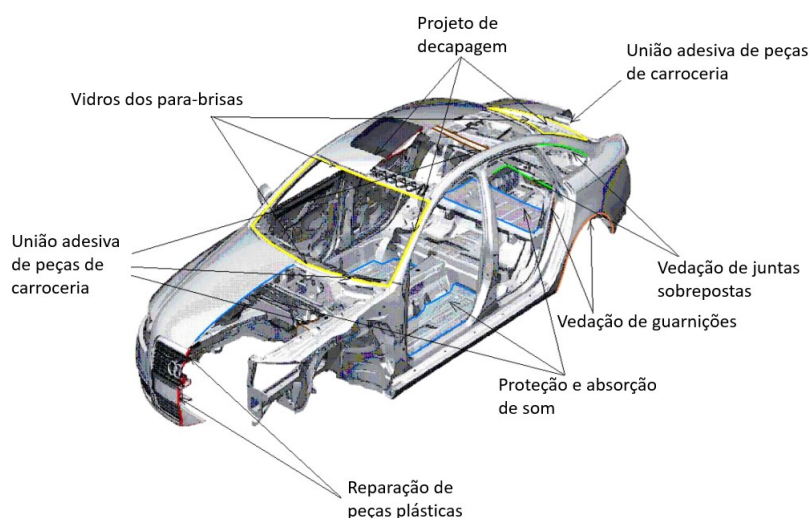
Como já abordado anteriormente, são várias as possibilidades de aplicações dos adesivos. Por exemplo, a indústria aeroespacial os utiliza tanto no interior quanto no exterior das aeronaves, como ilustrado na Figura 19. Do mesmo modo, a indústria automotiva também tem aplicações variadas, como nas estruturas da carroceria e até mesmo no acabamento, conforme mostrado na Figura 20. Por fim, cabe ressaltar que a definição correta do melhor sistema de adesivo para cada aplicação, depende de fatores como força, resistência, durabilidade e vida útil (WAHAB, 2014).

Figura 19 – Exemplos de aplicações de adesivo na indústria aeronáutica



Fonte: adaptado de Kapp (2017)

Figura 20 – Exemplos de aplicações de adesivo na indústria automobilística

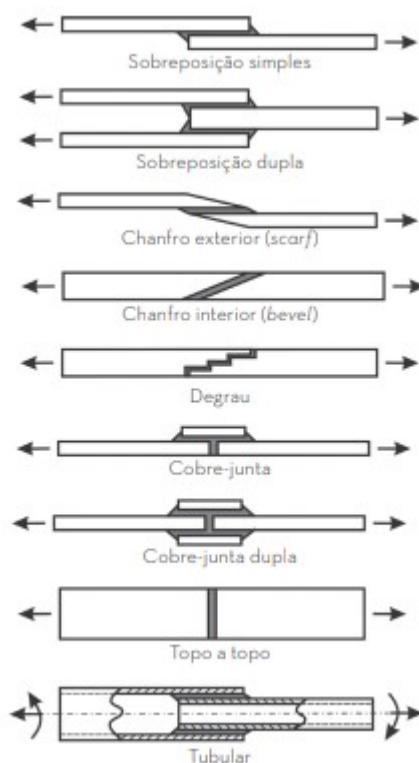


Fonte: adaptado de Kolnerová et al. (2010)

2.3.5 Tipos de Juntas

Um dos fatores mais importantes da junta é sua geometria, pois a mesma está diretamente relacionada a distribuição de tensões que proporciona, como dito por [Mota \(2013\)](#). Neste trabalho o foco principal é na *single lap joint*, porém é importante conhecer a classificação quanto a geometria das juntas, mostradas na Figura 21.

Figura 21 – Tipos de juntas de sobreposição e qualificação da distribuição de tensão



Fonte: [Mota \(2013\)](#)

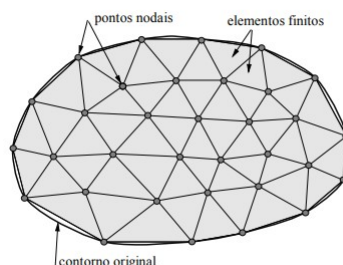
2.4 Elementos Finitos

Como já comentado, umas das desvantagens das juntas coladas é que, uma vez integrada, a sua inspeção para obter suas propriedades mecânicas é bem mais complexa, já que é influenciada não só pela sua geometria, condições de contorno e por seu comportamento não-linear. Sendo assim, um método que pudesse prever o comportamento mecânico das juntas era de suma importância. O método de elementos finitos se aplica perfeitamente a essa situação, já que consegue resolver problemas complexos, subdividindo-o em pequenos problemas mais simples.

[Mirlisenna \(2016\)](#) explica, de maneira simples, que o método transforma uma série de variáveis infinitas e desconhecidas em um número limitado de elementos e comportamento bem definido. É justamente por isso que o método se chama de elementos finitos. Esses elementos são conectados entre si por nós ou pontos nodais, como mostrado na Figura

22. Tais nós, junto com os elementos, formam a malha. A quantidade destes itens é de fundamental importância para a precisão dos resultados da análise.

Figura 22 – Malha de Elementos Finitos (para problema plano)



Fonte: Souza (2003)

Atualmente, as análises pelo método de elementos finitos são realizadas, em sua maioria, com o auxílio de *softwares*. No presente trabalho, as análises foram feitas utilizando a plataforma ANSYS, que é detalhada a seguir.

2.4.1 Ferramenta para Análise de Elementos Finitos - ANSYS

A ANSYS foi fundada em 1970 pelo *Swanson Analysis System Inc.*. Desde então, vem desenvolvendo e aprimorando diversas ferramentas em seu conjunto de *softwares*, introduzindo análises geométricas não lineares, termo-elétricas, de parâmetros, otimização estrutural, gráficos coloridos, elementos sólidos de compósitos em camadas e, como é de interesse no presente trabalho, análise de elementos finitos. Para isso, a empresa desenvolveu uma linguagem por *script* para esse tipo de análise, a *Ansys Parametric Design Language* (APDL) e uma plataforma de simulação que a utiliza, o *ANSYS Mechanical APDL* (WAHAB, 2014). Para fins de simplificação, o termo ANSYS nesse trabalho refere-se sempre a essa plataforma específica.

Em sua tese, Marinho (2002) explica os sete tipos de análises de estruturas que o ANSYS é capaz de fazer:

- Análise Estática
- Análise Modal
- Análise Harmônica
- Análise Dinâmica
- Análise Espectral
- Análise de Flambagem

- Análise Dinâmica Explícita

O presente trabalho tem como o foco a análise estática, onde é possível calcular, sob carga estática, os campos de deslocamento, deformação e tensão. As análises estáticas se dividem em lineares e não-lineares. Na segunda, é possível acrescentar condições como plasticidade, tensão, rigidez, grandes deformações e tensões, hiperelasticidade, superfície de contato e fissuras ([MARINHO, 2002](#)).

3 Metodologia

A metodologia utilizada no presente trabalho é uma análise por elementos finitos. Muito utilizado para resolver problemas de engenharia, trata-se de um método numérico, que reduz um campo infinito de pontos para um número finito (TSCHIPTSCHIN, 2011). Para realizar essa análise foram reproduzidos os resultados obtidos por Cruz (2013) em seu trabalho de dissertação e os modelos exemplificados no livro de Wahab (2014). A plataforma utilizada para realização dessas análises foi o *ANSYS Mechanical APDL*. Por sua vez, o *software* foi executado em um computador Lenovo Ideapad 310, que possui processador Intel Core i5-6200 (2 núcleos e 4 *threads* a 2,30 GHz) e 8 GB de memória RAM com 256 GB de armazenamento SSD.

3.1 Modelo dos resultados obtidos em análises experimentais

Para reprodução dos resultados de análises obtidas experimentalmente, foram utilizados os modelos desenvolvidos por Cruz (2013) em seu trabalho. São os corpos de prova mostrados na Figura 23. Os seus corpos de prova foram preparados de acordo com a norma ASTM 5868-10 (2008) e, portanto, possuem as seguintes dimensões:

```

1 tadv=0.76      ! Espessura do adesivo em mm
2 tadh=3.17      ! Espessura do substrato em mm
3 lo=25.4        ! Comprimento de sobreposicao em mm
4 Lt=228         ! Comprimento do substrato em mm
5 Wt=25.4        ! Largura da junta em mm

```

Figura 23 – Corpos de prova: Juntas *single-lap* A) Alumínio, B) Fibra de carbono

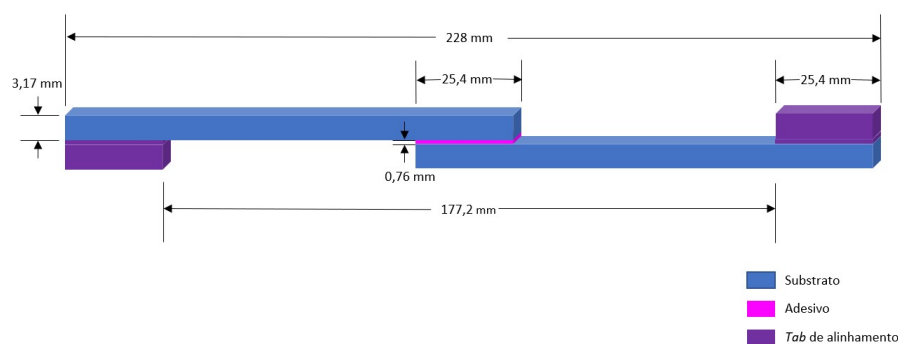


Fonte: Cruz (2013)

É também importante uma breve explicação sobre a preparação dos corpos de prova supracitados, pois de acordo com Monteiro (2020) e Goland e Reissner (1944), há a formação de um momento de flexão na região de sobreposição (região colada) durante

o ensaio de tração. Nos ensaios experimentais, como aqueles realizados por Cruz (2013) para juntas de alumínio e juntas de compósitos, é necessário o uso de *tabs* de alinhamento como mostrado na Figura 24.

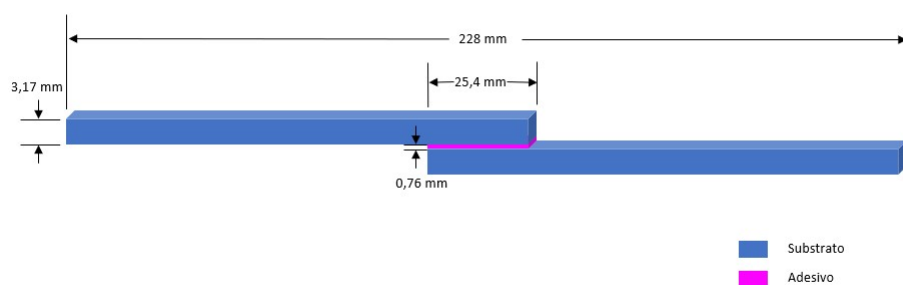
Figura 24 – *Tabs* de alinhamento



Fonte: autor

Muito embora estes *tabs* de alinhamento facilitem a aplicação da carga, a formação do momento fletor na região de sobreposição ainda existe, o que mostra que o uso dos dispositivos de colagem não interfere no comportamento mecânico da junta. No caso do modelo de elementos finitos, optou-se por seguir a geometria sugerida por Wahab (2014), onde os dispositivos de colagem não são representados, porém, mantendo o dimensionamento e condições utilizados por Cruz (2013), como mostrado na Figura 25. Note que, nesse caso, o modelo de elementos finitos se assemelha ao descrito por Goland e Reissner (1944) e que é detalhado no trabalho de Monteiro (2020).

Figura 25 – Geometria do problema



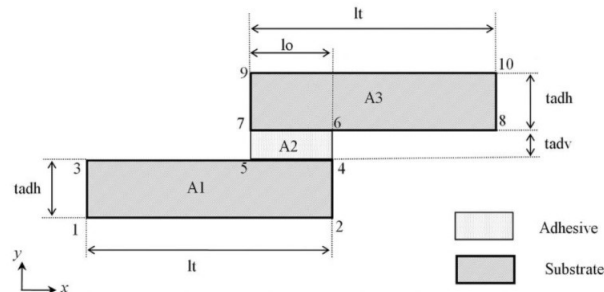
Fonte: autor

3.2 Modelos de Validação

Os modelos propostos nos capítulos 4 e 5 do livro de Wahab (2014) foram reproduzidos com o objetivo de alcançar os mesmos resultados, ou o mais próximo possível, de modo a comprovar a eficácia do método e, na sequência, poder replicá-los em outros

modelos. A Figura 26 mostra o modelo de junta colada com substrato de alumínio utilizado na sessão ensaio preliminar do capítulo de resultados.

Figura 26 – Configuração e parâmetros geométricos de SLJ sem fissuras



Fonte: Wahab (2014)

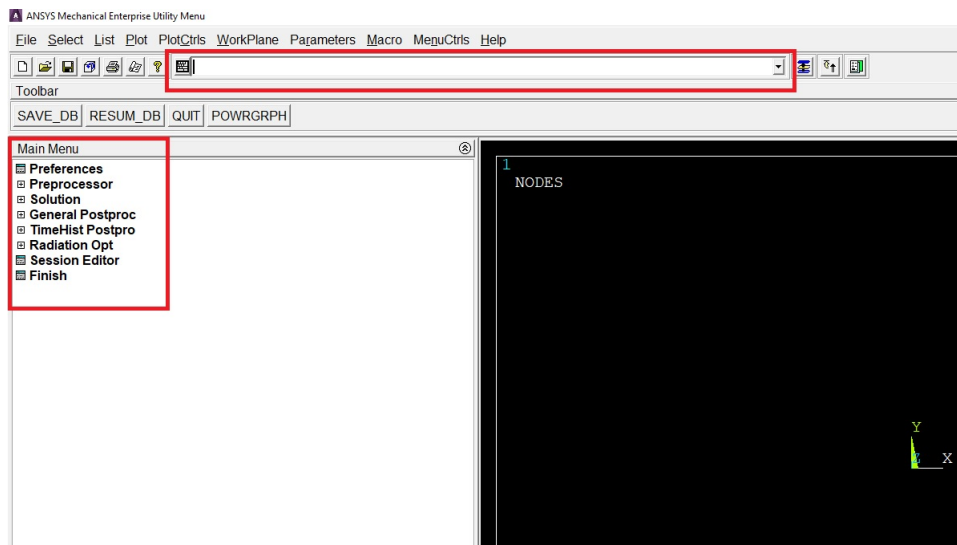
3.3 ANSYS APDL

Todas as análises realizadas neste trabalho foram executadas no ANSYS e portanto a seguir será mostrado de modo detalhado como foram realizadas as análises.

3.3.1 Roteiro para criação do modelo em elementos finitos

Nesta sessão, serão descritos os passos para modelar juntas coladas utilizando o ANSYS APDL. Como demonstrado na Figura 27 existem duas maneiras de utilização do ANSYS, a primeira é através do menu de interface gráfica e a segunda maneira é programação em APDL através da barra de comandos. As duas maneiras serão demonstradas ao longo deste capítulo.

Figura 27 – Modos de utilização do ANSYS

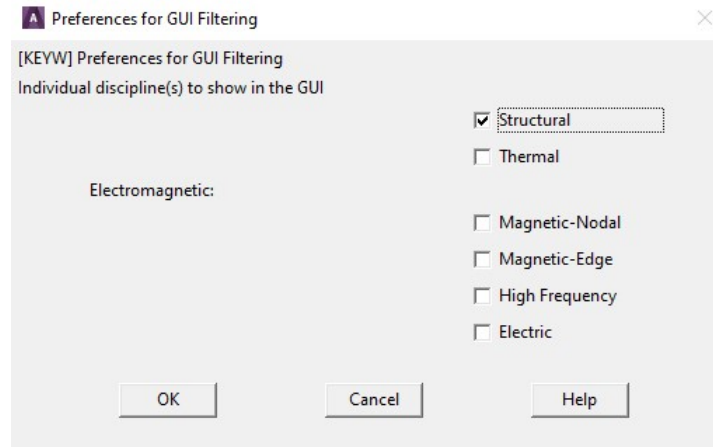


Fonte: autor

3.3.2 Definindo o tipo de Análise

Existem dois tipos de análises estáticas que podem ser realizadas: a estrutural e a térmica. O presente trabalho utiliza apenas a análise estrutural. Essa seleção pode ser observada acessando a opção ‘Preferences’ no menu, que irá abrir a caixa de diálogo com a opção, como mostrado na Figura 28.

Figura 28 – Selecionando o tipo de análise



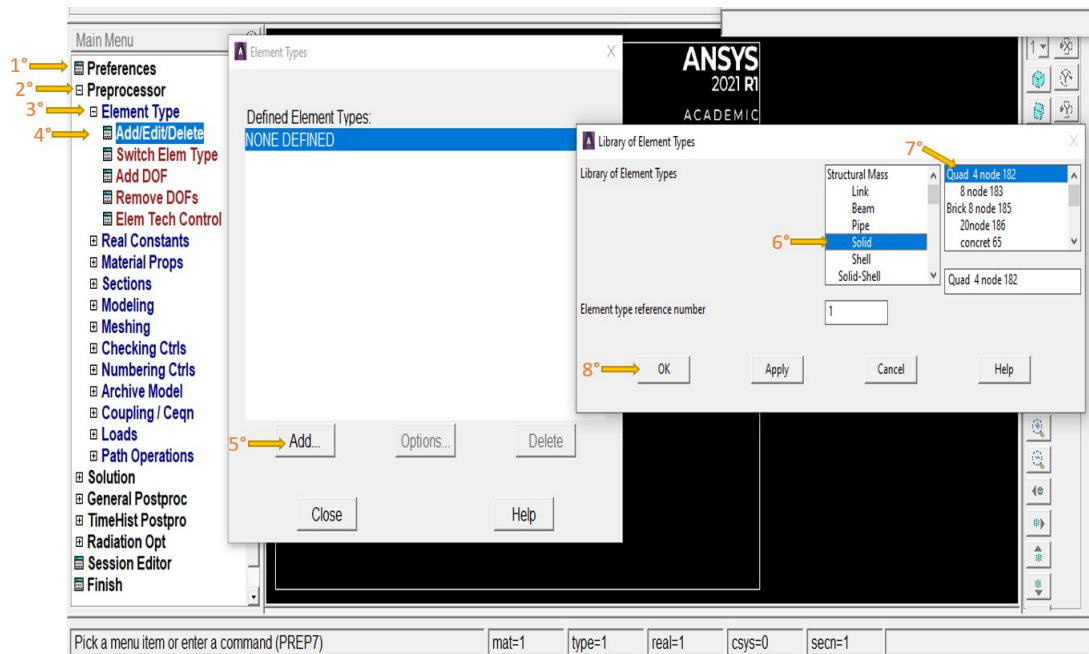
Fonte: autor

- 1º Passo: Tipo de Análise

Como descreve Wahab (2014), para análises de tensão, fratura ou fadiga é necessário um elemento sólido estrutural para modelar a camada adesiva e o substrato. No caso do ANSYS essa condição é dada pelo elemento *Quad 4 nodes 182*. Isso significa que são elementos de quatro nós e de primeira ordem. Ochoa e Reddy (1992) descreve os elementos de primeira ordem como elementos cuja função de forma de interpolação é uma função polinomial. É possível utilizar esse elemento nos estados plano de tensão e deformação, porém, devido a sua geometria, no caso de juntas coladas, deve-se utilizar o estado plano de deformações.

Pode-se selecionar essa opção através do menu de interface, Figura 29.

Figura 29 – Tipo de Elemento



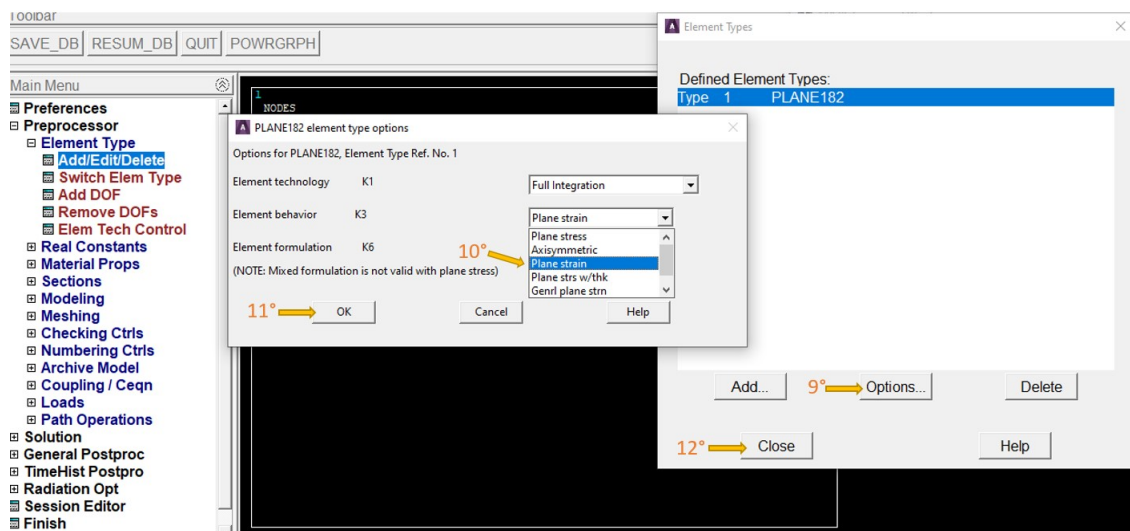
Fonte: autor

- 2º Passo: Tipo de Elemento

- 1 /PREP
- 2 ET , 1 , 82 , , , 2

Esse comando também ativa o *Plane Strain* que é a opção para trabalhar com análise 2D e, com isso, está definido o tipo de elemento, como mostrado na Figura 30.

Figura 30 – Tipo de Elemento



Fonte: autor

3.3.3 Propriedades Mecânicas

O próximo passo é a definição do tipo de material a ser utilizado na análise. Nesta etapa, é necessário definir o tipo de material para todos os elementos o que, no caso deste

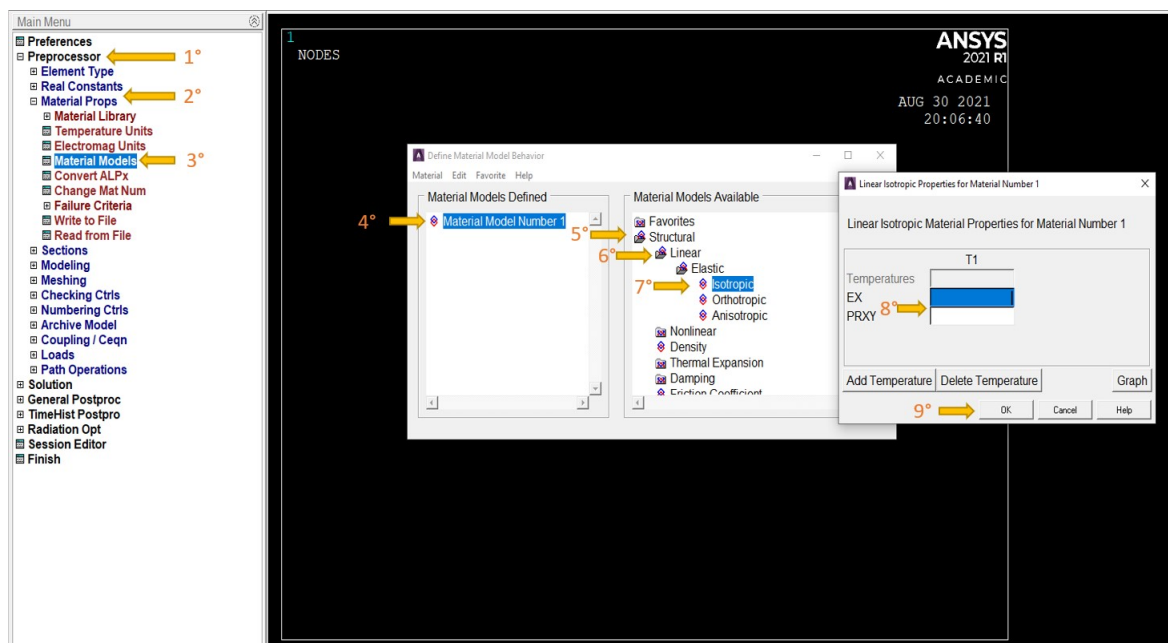
trabalho, representa o adesivo e o substrato. Para fins de exemplificação do modelo, serão descritos os comandos utilizados quando ambos os materiais são isotrópicos. Além disso, para a camada adesiva, os modelos linear e não-linear serão utilizados e demonstrados.

- **Modelo Linear**

Conforme Wahab (2014), assumindo o substrato (Mat1) e o adesivo (Mat2) como um material elástico linear, apenas duas constantes precisam ser definidas: o módulo de elasticidade e o coeficiente de *Poisson*, que podem ser definidas conforme o *script* a seguir ou conforme a Figura 31.

- 1º Passo: Definindo as constantes do Modelo Linear

Figura 31 – Definindo o primeiro material



Fonte: autor

```

1 e1=<valor> ! Modulo de Elasticidade do adesivo
2 nu1=<valor> ! Coeficiente de Poisson do adesivo
3 e2=<valor> ! Modulo de Elasticidade do substrato
4 nu2=<valor> ! Coeficiente de Poisson do substrato

```

Definidas as propriedades, o próximo passo é transferir essas informações para a área de pré-processamento.

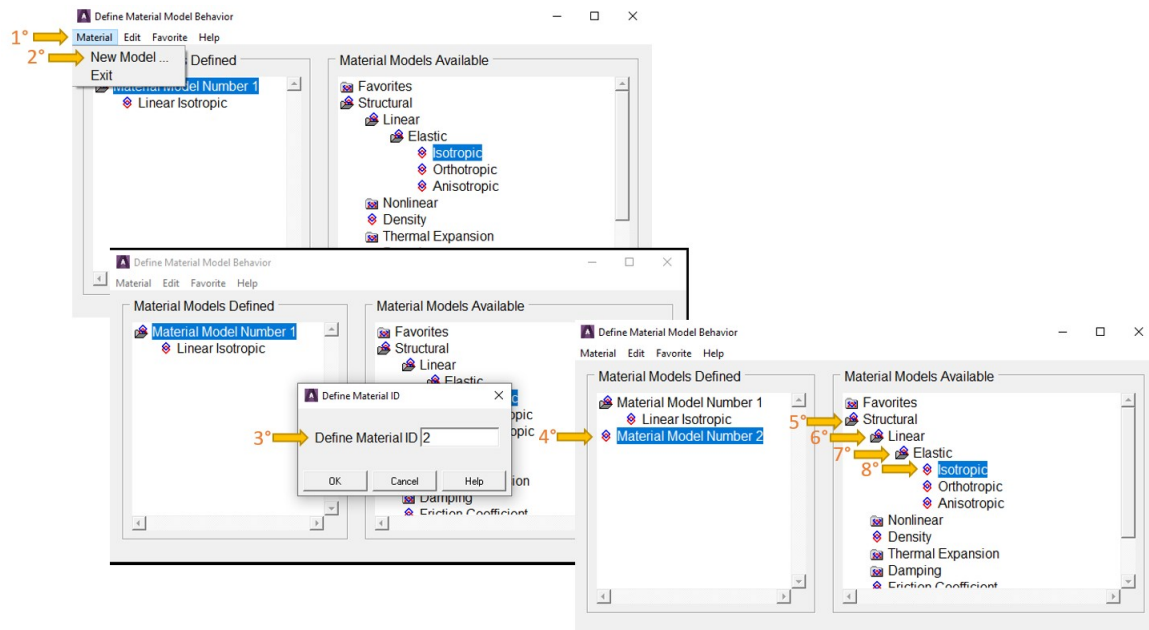
- 2º Passo: Entrando na área de Pré-Processamento

```

1 /PREP7 ! Entra na area de pre-processamento
2 MP ,ex ,1 ,e1 ! Define modulo de elasticidade do adesivo
3 MP ,nuxy ,1 ,nu1 ! Define o coeficiente de Poisson para o adesivo

```

Figura 32 – Definindo o segundo material



Fonte: autor

- **Modelo Não-Linear** Assumindo o substrato (Mat1) como linear e o adesivo (Mat2) como um material isotrópico elasto-plástico, além das duas constantes definidas acima, as constantes descritas no *script* abaixo devem ser definidas, a Figura 33 mostra como fazer através do menu de interface.

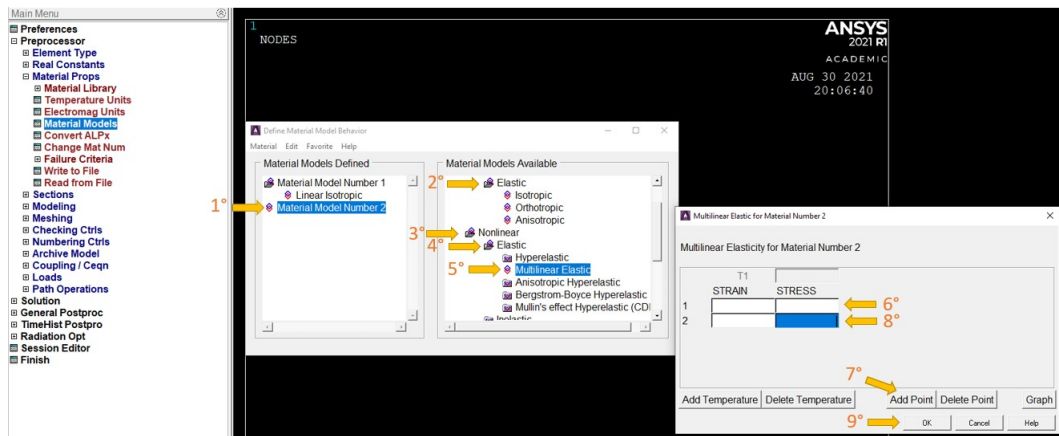
– 1º Passo: Definindo as constantes do Modelo Não Linear

```

1 e1=<valor>      ! Modulo de Elasticidade do adesivo
2 nu1=<valor>     ! Coeficiente de Poisson do adesivo
3 sy=<valor>      ! Tensao de Escoamento do adesivo
4 su=<valor>      ! Limite de Resistencia do adesivo
5 sf=<valor>      ! Limite de Ruptura do adesivo
6 stu=<valor>     ! Deformacao Plastica no limite da resistencia
7 stf=<valor>     ! Deformacao Plastica no limite de ruptura
8 e2=<valor>      ! Modulo de Elasticidade do substrato
9 nu2=<valor>     ! Coeficiente de Poisson do substrato

```

Figura 33 – Definindo o material



Fonte: autor

Do mesmo modo que no material linear, no *script* é necessário transferir essas informações para a área de pré-processamento.

– 2º Passo: Entrando na área de Pré-Processamento

```

1 /PREP7                ! Entra na area de pre-processamento
2 MP , ex , 1 , e1      ! Define modulo de elasticidade do adesivo
3 MP , nuxy , 1 , nu1   ! Define o coeficiente de Poisson do adesivo
4 TB , melas , 1 , , ,  ! Ativa a tabela de elasticidade multi-linear
5                       !para a propriedade nao-linear do adesivo
6 TBPT , defi , sy/e1 , sy      ! Define o ponto de escoamento
7                               ! (deformacao , tensao) em N/mm2
8 TBPT , defi , sy/e1+stu , su  ! Define o ponto de tensao
9                               ! ultima/limite de resistencia em N/mm2
10 TBPT , defi , sy/e1+stf , sf ! Define ponto de tensao de ruptura
11                               ! em N/mm2
12 MP , ex , 2 , e2      ! Define o modulo de elasticidade do substrato
13                       ! aluminio
14 MP , nuxy , 2 , nu2   ! Define o coeficiente de Poisson do
15                       ! substrato aluminio

```

3.3.4 Modelagem da junta de sobreposição simples

Quando se trata de análise de elementos finitos, um passo importante é a definição da geometria do problema a ser desenvolvido. Nessa sessão será demonstrado como definir os parâmetros geométricos da junta de sobreposição simples. A Figura 34 mostra como definir os pontos e a Figura 35 mostra como definir a área. Também é possível realizar essas ações através de *script*. Vale destacar que os chamados *keypoints* são entidades geométricas de ordem zero (pontos) que definem as “fronteiras geométricas” do modelo. As entidades citadas servem como referência para outras entidades geométricas, como as de primeira ordem (linhas), as de segunda ordem (áreas) e as de terceira ordem (volumes).

- 1° Passo: Definição da geometria

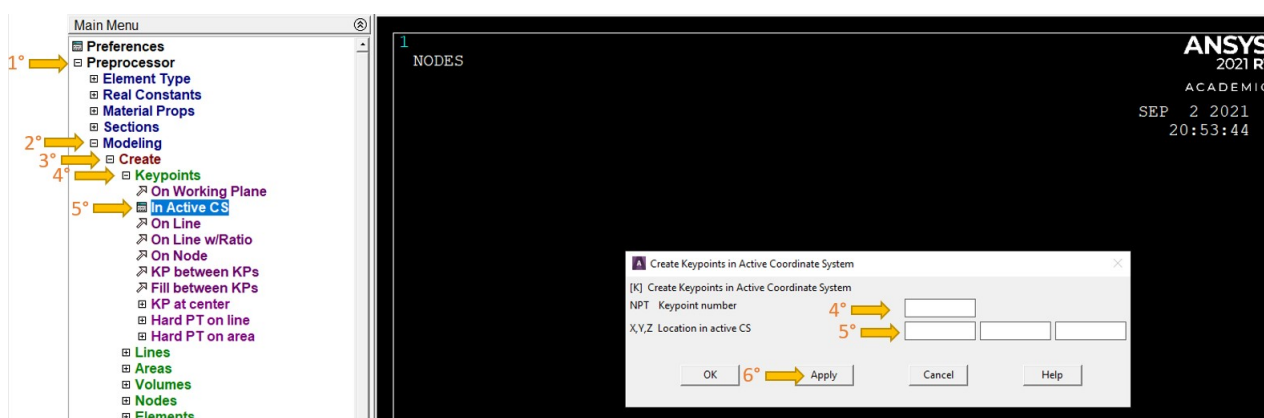
```

1 tadv=<valor> ! Espessura do adesivo em mm
2 tadh=<valor> ! Espessura do substrato em mm
3 lo=<valor>   ! Comprimento de sobreposicao em mm
4 Lt=<valor>   ! Comprimento do substrato em mm
5 Wt=<valor>   ! Largura da junta em mm

```

- 2° Passo: Criação dos pontos chaves (*keypoints*)

Figura 34 – Passo a Passo: Definindo os pontos



Fonte: autor

```

1 K,1,0,0,0      ! Definicao do keypoint 1
2 K,2,lt,0,0     ! Definicao do keypoint 2
3 KGEN,2,1,2,1,,tadh,,2 ! Cria os keypoints 3 e 4
4 K,5,lt-lo,tadh ! Define o keypoint 5
5 KGEN,2,4,5,1,,tadv,,2 ! Cria os keypoints 6 e 7
6 K,8,2*lt-lo,tadh+tadv ! Define o keypoint 8
7 KGEN,2,7,8,1,,tadh,,2 ! Cria os keypoints 9 e 10

```

- 3° Passo: Criação da área

```

1 A,1,2,4,5,3    ! Define a Area 1 - Substrato inferior
2 A,5,4,6,7      ! Define a Area 2 - Adesivo
3 A,7,6,8,10,9   ! Define a Area 3 - Substrato superior

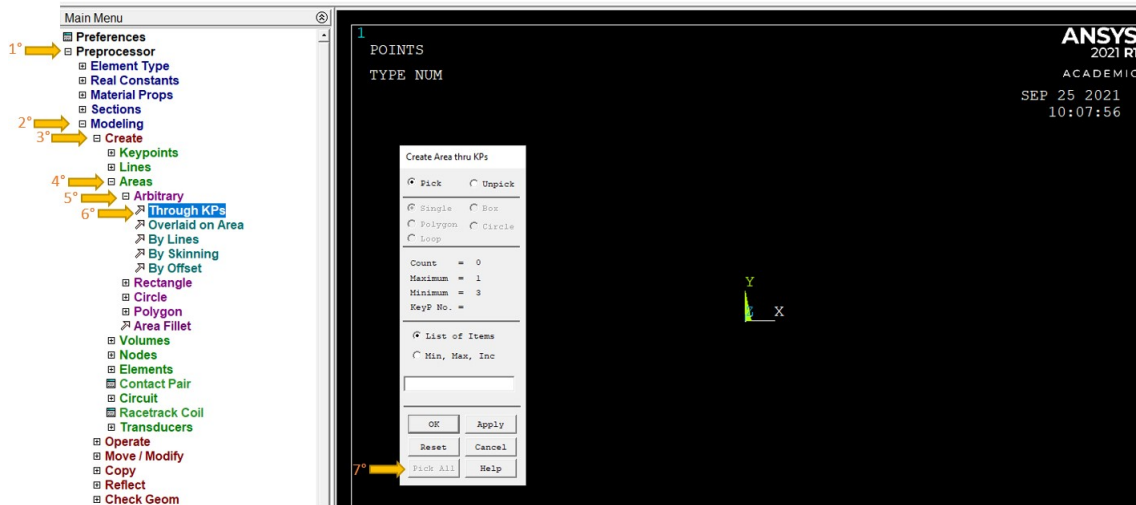
```

3.3.5 Geração da malha

Definida a geometria do modelo, o próximo passo é a definição da malha. Neste caso, a malha é diferente da geometria, pois é uma entidade matemática que deve ser utilizada para gerar o sistema de equações. É esse sistema de equações que define o modelo de elementos finitos.

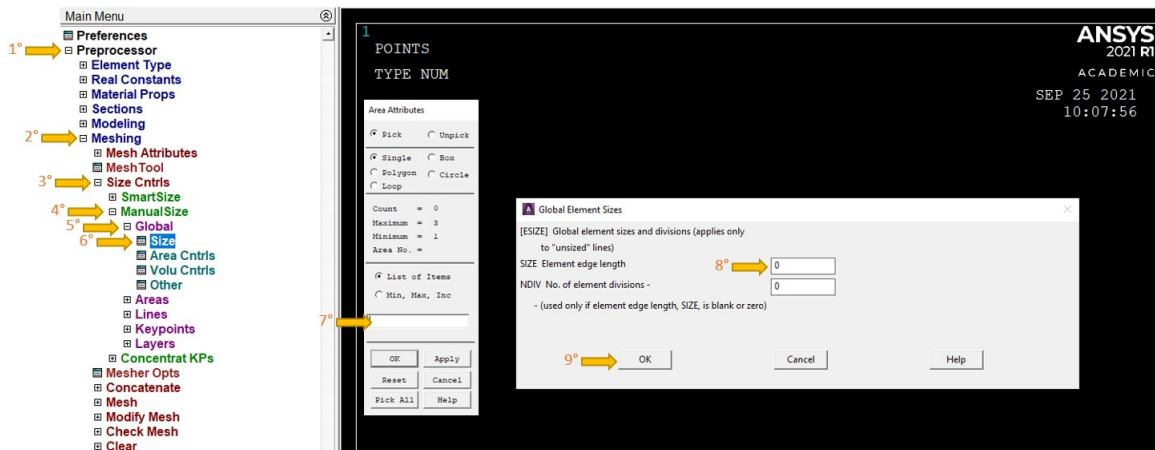
Segundo Wahab (2014) o tamanho global de malha, que é usado principalmente para substratos, é equivalente a três vezes a espessura da camada adesiva, como mostrado nas Figuras 36 e 37.

Figura 35 – Definindo a área



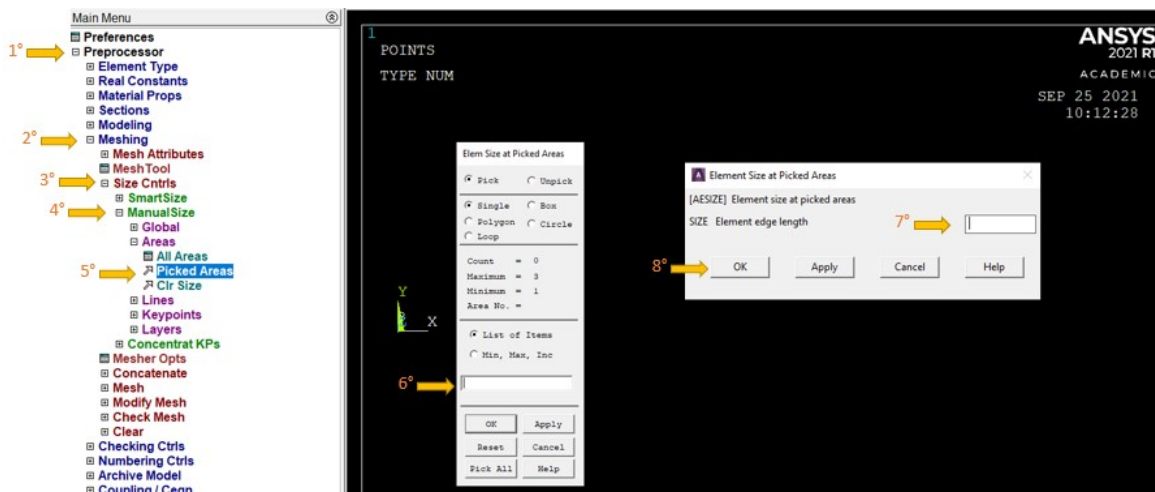
Fonte: autor

Figura 36 – Definindo tamanho do elemento para toda geometria



Fonte: autor

Figura 37 – Definindo tamanho do elemento para o adesivo



Fonte: autor

Fish e Belytschko (2007) afirmam que a qualidade do modelo de elementos finitos é diretamente relacionada ao tamanho do elemento. O ideal para se aproximar da solução real é que o tamanho do elemento seja pequeno, porém, fazendo isso, aumenta-se consideravelmente o tempo de solução. Quando se trata de juntas coladas, o problema mencionado no parágrafo anterior torna a solução sensível ao tamanho do elemento (WAHAB, 2014). Assim, ainda de acordo com Wahab (2014), o tamanho ideal para o adesivo de uma junta colada é de $1/3$ da espessura do adesivo.

• 1º Passo: Definição do tamanho do elemento

```

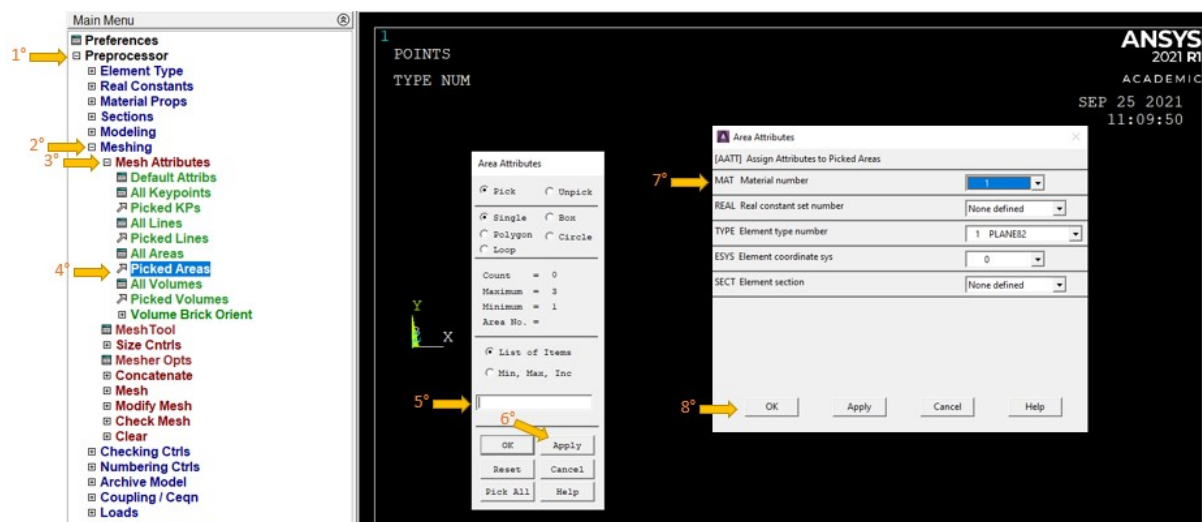
1 ESIZE,3*tadv      ! Define o tamanho do elemento como 3 vezes
2                  !a espessura do adesivo para toda a geometria
3 AESIZE,2,tadv/3  ! Define o tamanho do elemento para o adesivo,
4                  !area 2, como 1/3 da espessura do adesivo

```

• 2º Passo: Associação do material à área

Uma vez definido o tamanho da malha, é preciso definir qual material se aplica a cada área, como definido no *script* a seguir e na Figura 38. O segundo passo se mistura à própria geração da malha, que também pode ser vista na Figura 39.

Figura 38 – Atributos da Malha



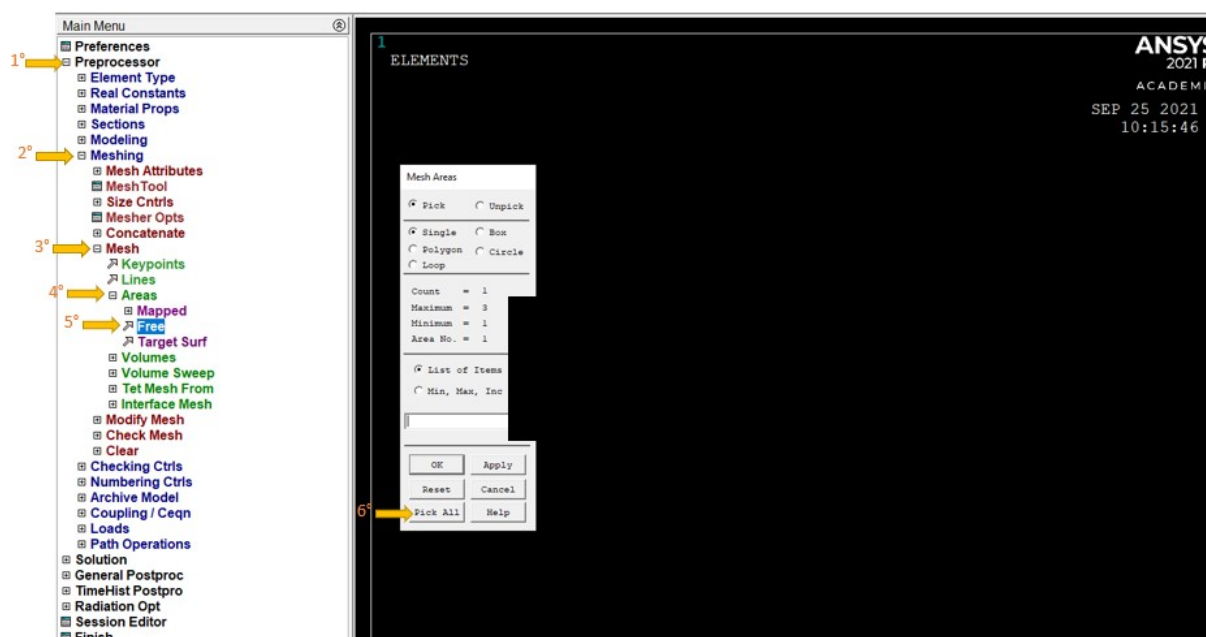
Fonte: autor

```

1 MAT,1            ! Atribui as propriedades do material 1 para
2                !a Area 2 (Adesivo)
3 AMESH,2         ! Gera a malha para a Area 2 (Adesivo)
4 MAT,2          ! Atribui as propriedades do material 2 para
5                !as Areas 1 e 3 (Substrato Inferior e Superior)
6 AMESH,1,3,2    ! Gera a malha para as Areas 1 e 3 (Substrato
7                !Inferior e Superior)

```

Figura 39 – Gerando a malha



Fonte: autor

• 3º Passo: Refinando a malha

Uma junta de sobreposição simples possui pontos de singularidade, por isso, após a geração da malha, é necessário refinar a mesma através do comando *KREFINE*. Feito isso, é encerrada a parte de pré-processamento. Para isso, deve-se utilizar o *script* a seguir ou usar a interface gráfica.

```

1 KREFINE ,5 ,6 ,1 ,2 ,1 ! Refina a malha proxima aos pontos 5 e 6
2 EPLLOT                 ! Plota os elementos gerados
3 FINISH                 ! Finaliza a etapa de pre-processamento

```

3.3.6 Análise de Tensões

Ochoa e Reddy (1992) explicam que é necessário impor as condições de contorno, ou seja, as restrições de deslocamentos e forças aplicadas, pois só assim o sistema de equações pode ser gerado para um problema definido. Uma vez que a malha foi gerada, é possível avançar para a parte de análise de tensões, vide Figura 40. Para isso, o primeiro passo é definir a Força total aplicada, como mostrado na Figura 41, e as condições de contorno, como mostrado na Figura 42 e nos *scripts* a seguir.

• 1º Passo: Seleção do tipo de Análise

```

1 /SOLU ! Entra no modo de solucao do ANSYS

```

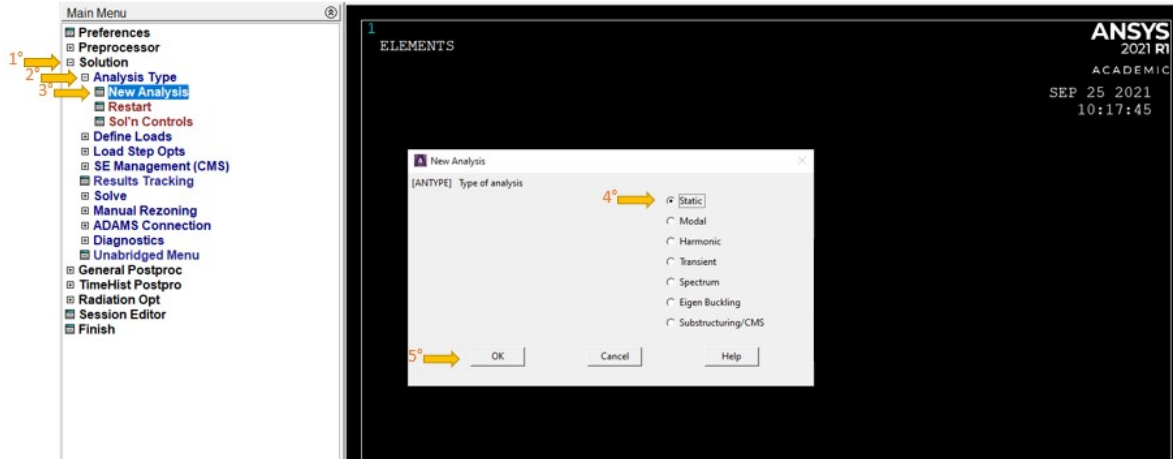
• 2º Aplicando a Força Total

```

1 ft=<valor> ! Define a carga total aplicada (em N)

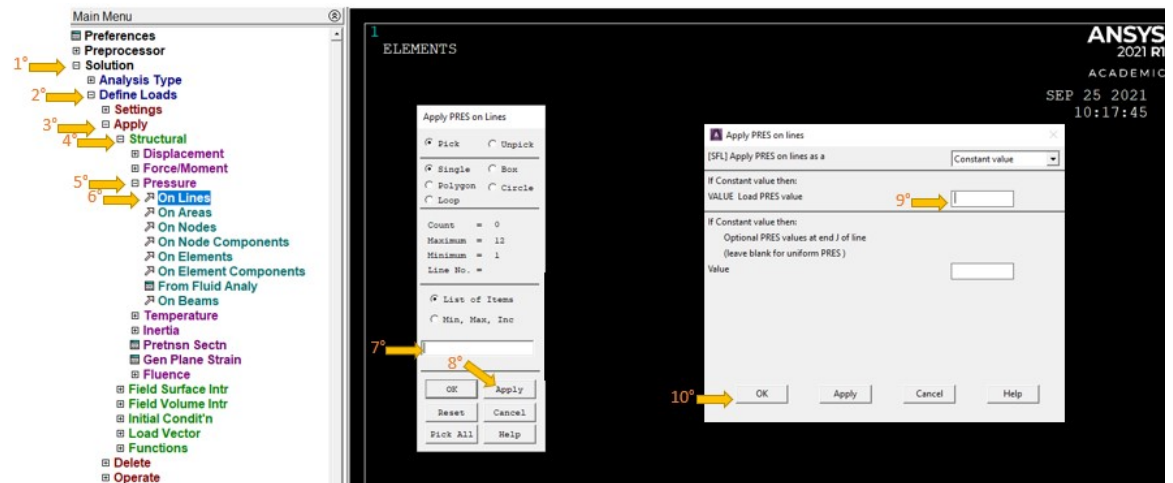
```


Figura 40 – Tipo de Análise



Fonte: autor

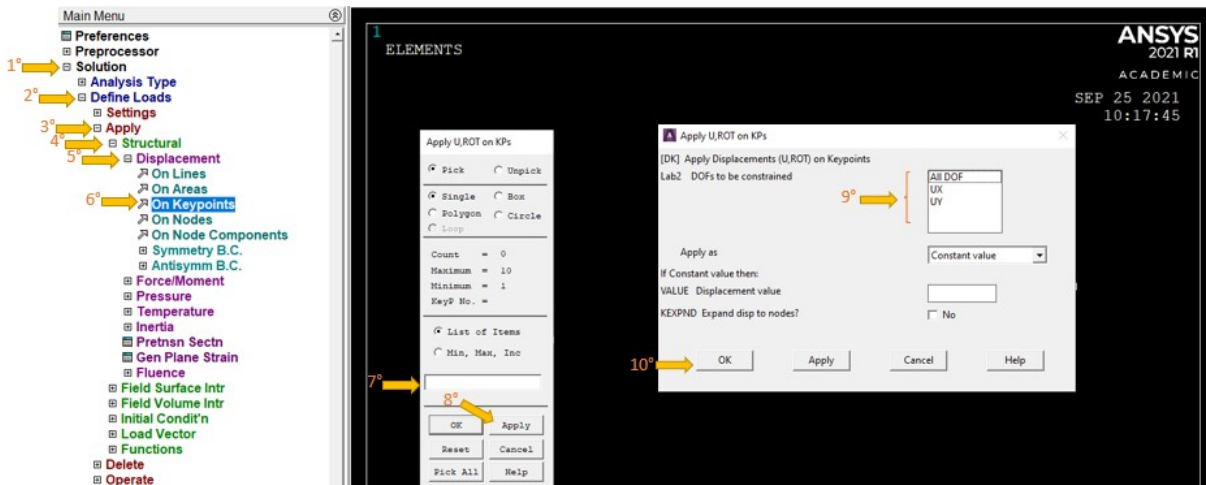
Figura 41 – Passo a Passo: Aplicando a carga



Fonte: autor

• 3º Passo: Condições de contorno

Figura 42 – Aplicando condições de contorno



Fonte: autor

1 KSEL ,s,loc,x,0 ! Seleciona os nos em x=0, lado esquerdo inferior


```

2           !do substrato)
3 KSEL ,r,loc,y,0 ! Seleciona os nos em y=0
4 DK,all,all      ! Restringe todos os graus de
5                 !liberdade/deslocamentos x e y dos nos selecionados
6 KSEL ,s,loc,x,2*lt-lo ! Seleciona os nos em x=2lt-lo, lado
7                 !direito do substrato superior
8 KSEL ,r,loc,y,tadh+tadv ! Seleciona os nos em y=tadh+tadv da
9                 !selecao anterior
10 DK,all,uy      ! Restringe os deslocamentos na direcao de y dos
11               !nos selecionados

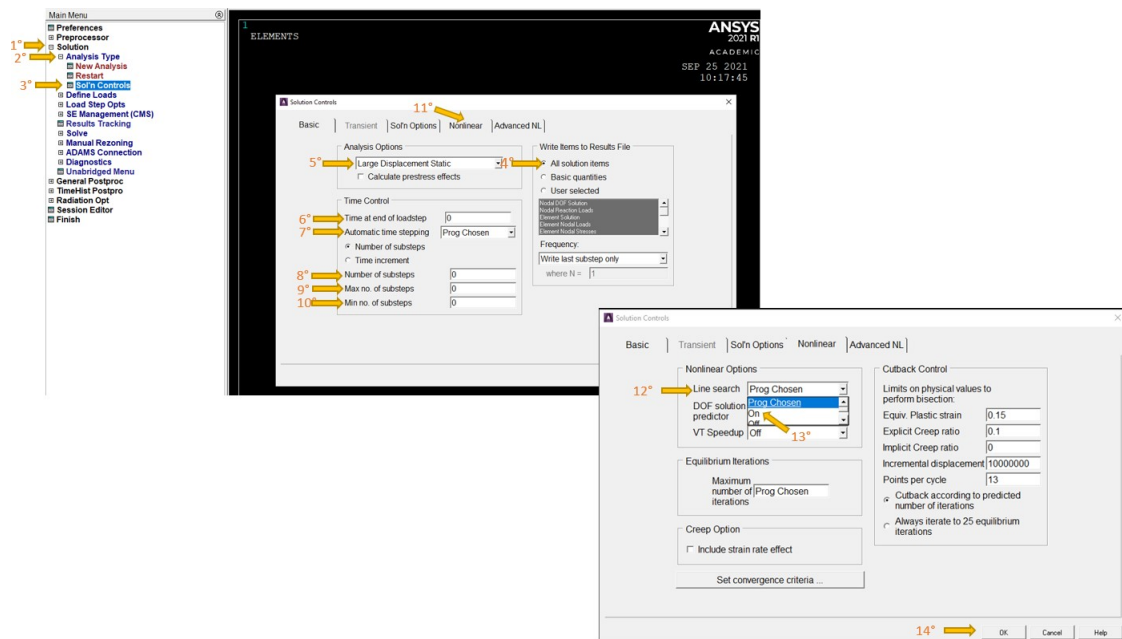
```

3.3.7 Grandes Deformações

Segundo Cruz (2013), juntas coladas sofrem grandes deformações quando submetidas a tração. Pelo método de elementos finitos, as grandes deformações são a solução de um sistema de equações através do método iterativo Newton-Raphson. Wahab (2014) ressalta a necessidade de incluir a não-linearidade geométrica, mudando para o efeito de grandes deformações, como mostrado na Figura 43 e no *script* a seguir.

- 1º Passo: Ativando a Não-Linearidade

Figura 43 – Ativando a não-linearidade



Fonte: autor

```

1 NLGEOM, on ! Ativa a opcao de grandes deformacoes na solucao
2 LNSRCH, on ! Ativa a opcao de Newton-Raphson para solucao nao-linear
3           !de grandes deformacoes
4 TIME, 1    ! Define o tempo para carga como 1
5 KBC, 0     ! Aplica a condicao de carga ate o tempo 1
6 KSEL ,s,loc,x,2*lt-lo ! Seleciona os nos em x=2*lt-lo

```

```

7 KSEL ,a,loc,x,0      ! Seleciona os nos em x=0
8 LSLK ,s,1  ! Seleciona as linhas que contem os nos
9 SFL ,all,pres,-ft/(tadh*wt) ! Aplica a pressao nas linhas
10                                !selecionadas (p=-ft/tadh*wt)
11 KSEL ,all  ! Seleciona todos os nos
12 LSEL ,all  ! Seleciona todas as linhas
13 AUTOTS ,on ! Ativa o sistema automatico time stepping
14 DELTIM ,0.2,0.02,0.2 ! Especifica o tamanho dos intervalos de
15                                !tempo
16 OUTRES ,all,all      ! Escreve todos os resultados
17 OUTPR ,all,all      ! Imprime a solucao para todos os resultados

```

• 2° Passo: Solução

A Figura 44 mostra como finalizar a etapa de solução, que também pode ser ativado pelo *script* a seguir.

Figura 44 – Passo a Passo: Solução



Fonte: autor

```

1 SOLVE  ! Soluciona o problema nao-linear
2 FINI   ! Sai do modo de solucao
3 SAVE   ! salva o banco de dados

```

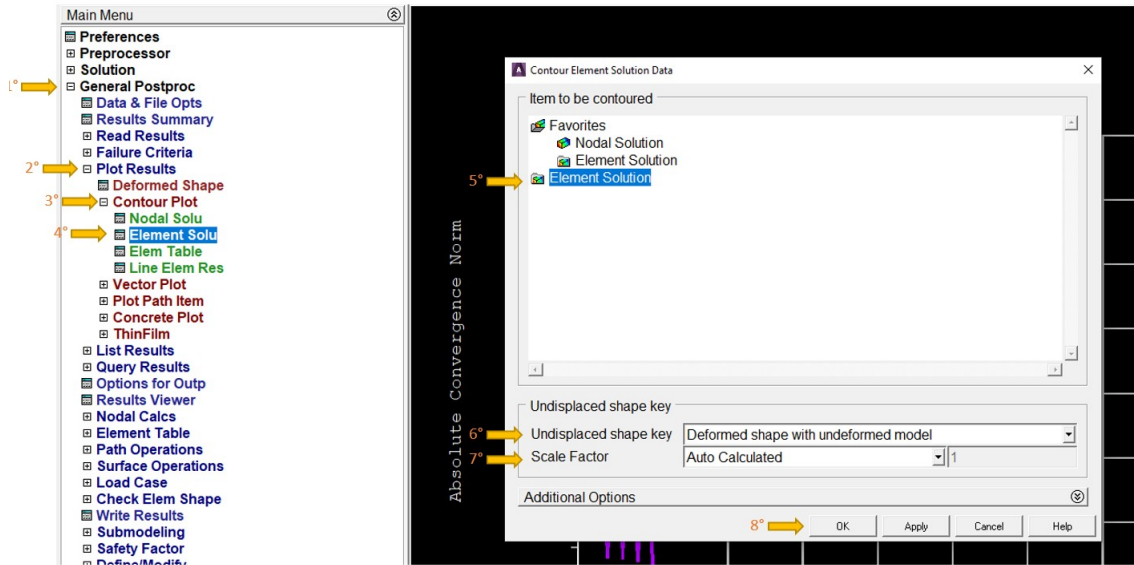
3.3.8 Pós-Processamento

Um último e importante passo na análise de elementos finitos é o pós-processamento dos resultados obtidos. No caso do ANSYS, esta etapa é realizada em um módulo à parte.

• 1° Passo: Plotando a estrutura deformada

A Figura 45 apresenta os passos para a plotagem da estrutura deformada. O *script* a seguir é equivalente a ela.

Figura 45 – Pós-Processamento



Fonte: autor

```

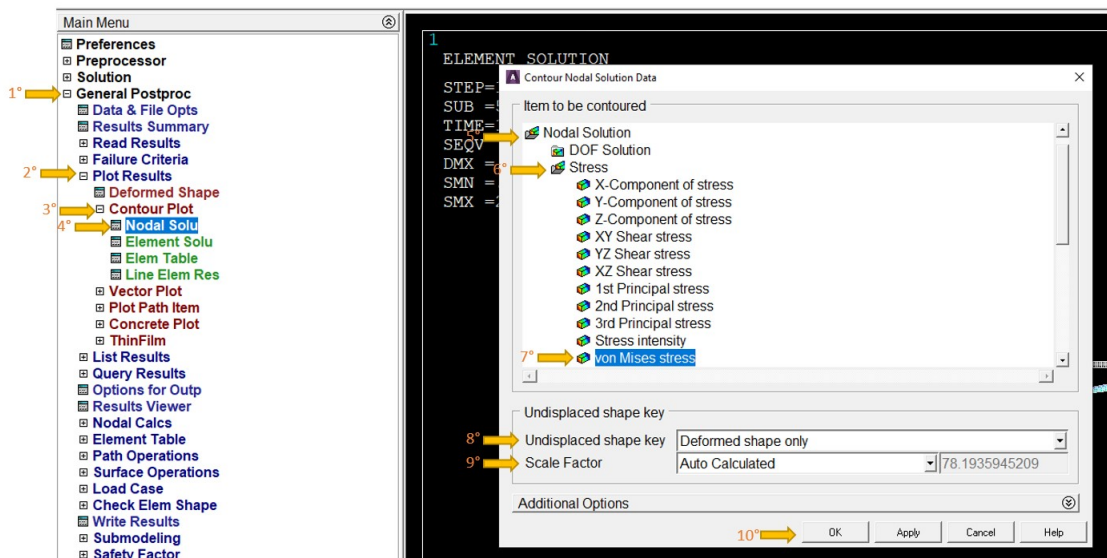
1 /POST1           ! Ativa o modo de Pos-Processamento
2 /DSCALE,1,AUTO  ! Ativa a escala automatica para deslocamentos
3 PLDISP,1        ! Exibe a estrutura deformada
4 SET, LAST

```

- 2º Passo: Plotando a distribuição de *Von-Mises*

Os campos de deslocamento, deformação e tensão são possíveis de serem visualizados através de várias funções. Para as tensões, por exemplo, um dos tipos mais utilizados é a tensão de *Von-Mises*, que, cabe destacar, é uma grandeza escalar. A Figura 48a e o *script* mostram como realizar essa análise.

Figura 46 – Plotando Tensões de Von-Mises



Fonte: autor

```
1 /EFACET , 1  
2 PLNSOL , S , EQV , 0 , 1 . 0
```

O passo-a-passo descrito neste capítulo procurou detalhar as etapas que devem ser desenvolvidas durante a análise de cada um dos casos estudados neste trabalho. Buscou-se tornar esse capítulo o mais didático possível para que qualquer pessoa com um pouco de conhecimento do ANSYS pudesse reproduzir o procedimento.

4 Resultados e Discussões

4.1 Modelagem de juntas coladas SLJ para predição de trincas

A questão central a ser discutida é se é realmente possível utilizar um modelo numérico para prever a vida útil de uma junta colada. Para isso, foi feito um estudo comparativo de resultados obtidos através do método de elementos finitos e resultados obtidos experimentalmente. Para ter certeza que os resultados obtidos através do método de FEA seriam exatos, o primeiro passo foi comparar os resultados obtidos através do *script* desenvolvido para este fim em um modelo já existente.

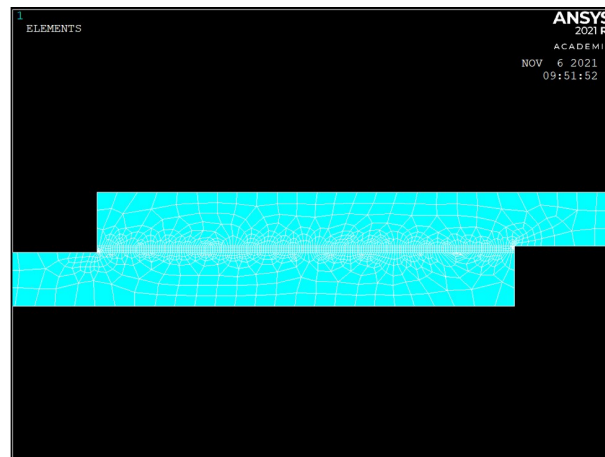
Primeiramente, foi testado o *script* já existente para o modelo disponibilizado por Wahab (2014) e, posteriormente, o mesmo foi adaptado e aplicado para uma junta colada testada experimentalmente. Os resultados foram divididos em duas partes: ensaio preliminar e problemas propostos.

4.2 Ensaio Preliminar

Wahab (2014) apresentou dados de entrada capazes de definir as propriedades do material, construir a geometria e criar a malha que foram usados para realizar análises de tensão, fraturas, fadiga, térmica, entre outras.

O modelo aqui utilizado é uma junta colada *single-lap* com substrato metálico, que foi modelado como um material isotrópico, com 10 (dez) nós e será realizado apenas a análise estrutural, conforme apresentado no capítulo de Metodologia. Portanto, para a solução do problema, foi utilizado o *script* já detalhado em tal capítulo. A configuração da junta colada, como espessura do adesivo e substrato e os devidos comprimentos, é detalhada a seguir e mostrada na Figura 47.

Figura 47 – Malha gerada e condições de contorno aplicadas para análise de tensões.



(a) Aproximação da malha gerada na região de sobreposição.



(b) Condições de contorno aplicadas.

Fonte: autor

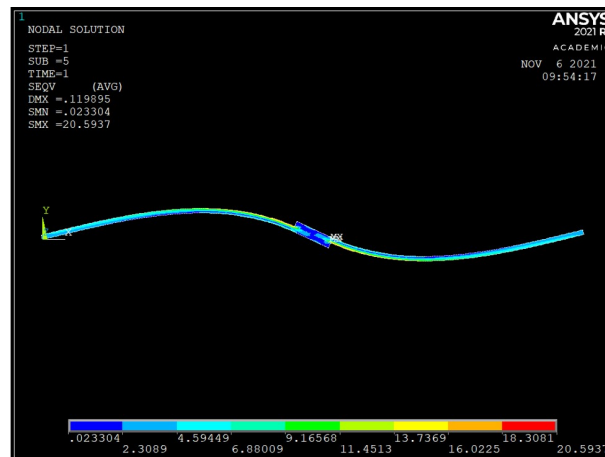
```

1 tadv=0.2      ! Espessura do adesivo em mm
2 tadh=1.6      ! Espessura do substrato em mm
3 lo=12.5       ! Comprimento de sobreposicao em mm
4 Lt=100        ! Comprimento do substrato em mm
5 Wt=25         ! Largura da junta em mm

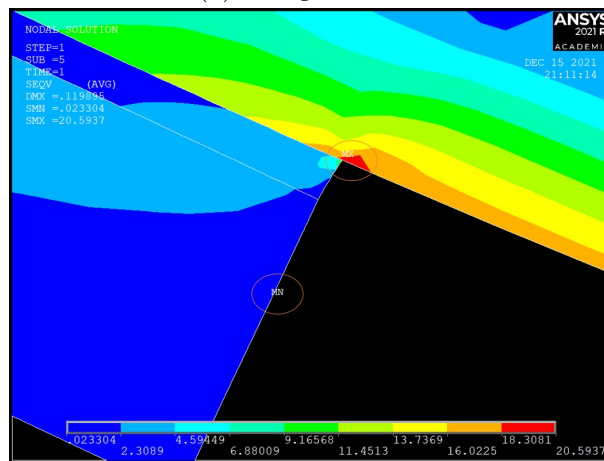
```

Definidas a geometria e a malha, foi possível realizar as análises de tensão. Para isso, as condições de contorno e forças foram aplicadas. As condições de contorno são de suma importância para obter uma solução única e são aplicadas em duas partes. Na primeira, restringe-se um *keypoint* no lado inferior esquerdo do substrato nas direções X e Y. Na segunda parte, restringe-se um *keypoint* no lado superior direito do substrato apenas na direção Y. Ainda nesta etapa, um outro parâmetro definido é a força total aplicada em Newton. Para o presente problema, [Wahab \(2014\)](#) utiliza uma força total de 200N, que foi aplicada como uma pressão nas linhas das extremidades. Ambas condições são mostradas na Figura 47b. O próximo passo foi gerar a solução, que mostrou que a tensão de Von Mises obtida na simulação era quase idêntica ao modelo proposto no livro, resultando numa variação de apenas 0,34% como mostrado na Tabela 4. Esse resultado é de suma importância para comprovação de que o *scrip* utilizado é realmente válido.

Figura 48 – Solução Nodal da junta colada proposta no ensaio preliminar.



(a) Solução Nodal.



(b) Máximo e Mínima - Tensão de Von Mises.

Fonte: autor

Tabela 4 – Comparação do Resultado

Máx Tensão de Von Mises - Wahab	Máx Tensão de Von Mises - Simulação	Variação
20,524	20,5937	0,34%

Fonte: autor

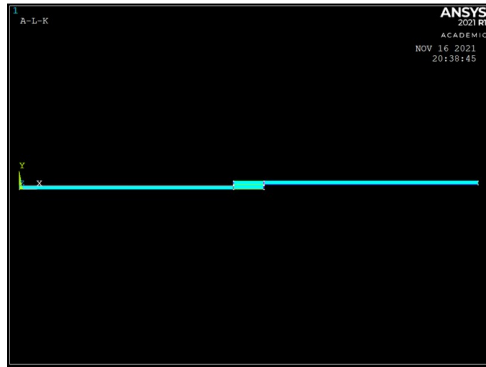
4.3 Problema Proposto 1

O problema de validação descrito no ensaio preliminar apresenta uma limitação, pois o mesmo não tem nenhum dano. Entretanto, é muito provável que a junta colada contenha algum tipo de dano causado, por exemplo, na fabricação. Portanto, foi realizada uma simulação de trinca no modelo utilizado no ensaio preliminar.

No *script* estão descritos os elementos utilizados, que são os mesmos da configuração inicial, acrescido dos elementos necessários para construção da trinca, como o comprimento da trinca (a) em mm e o tamanho do elemento na ponta da trinca (δ). A Figura 49a

mostra toda a estrutura da junta colada com dano. Na Figura 49b, é possível observar em detalhes a estrutura das trincas. As Figuras 49c e 49d mostram que, apesar do dano, o adesivo e substratos ainda se encontram unidos.

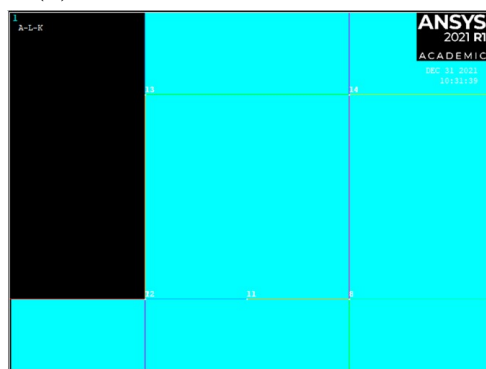
Figura 49 – Estrutura da junta colada do problema proposto 1.



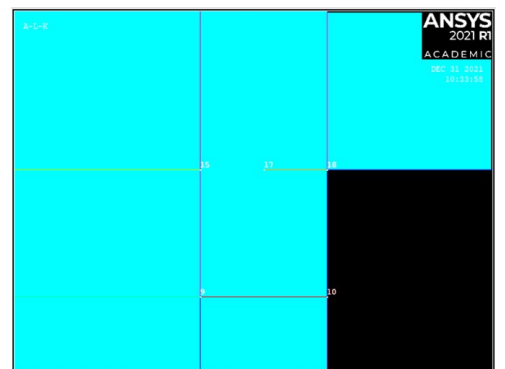
(a) Estrutura da junta com dano.



(b) Aproximação do dano na região da sobreposição.



(c) Aproximação do dano na região da sobreposição no lado esquerdo.



(d) Aproximação do dano na região da sobreposição no lado direito.

Fonte: autor

```

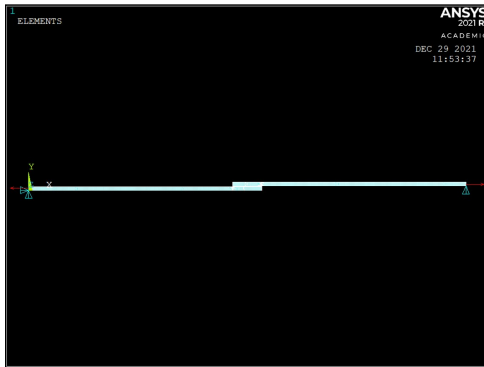
1 tadv=0.2      ! Espessura do adesivo em mm
2 tadh=1.6     ! Espessura do substrato em mm
3 lo=12.5     ! Comprimento de sobreposicao em mm
4 Lt=100      ! Comprimento do substrato em mm
5 Wt=25       ! Largura da junta em mm
6 l1=lt-lo    ! Comprimento livre do substrato
7 a=0.1       ! Comprimento da trinca em mm
8 delta=tadv/8 ! Tamanho do elemento na ponta da trinca

```

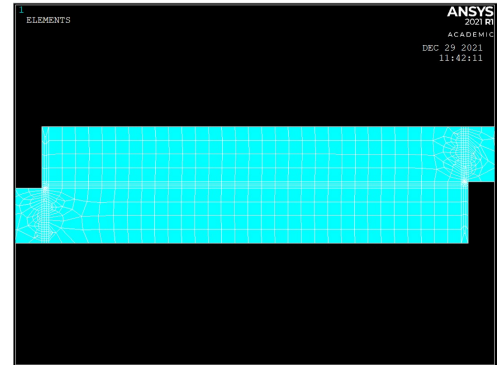
A Figura 50a mostra a junta colada com a malha gerada e as condições de contorno aplicadas de maneira idêntica ao modelo do ensaio preliminar. Ou seja, restringe-se um *keypoint* no lado inferior esquerdo do substrato nas direções X e Y, e um *keypoint* no lado superior direito do substrato apenas na direção Y e aplica-se uma força total de 200N como uma pressão nas linhas de cada extremidade. A Figura 50b mostra, em maiores detalhes, a malha refinada na região da sobreposição e as Figuras 50c e 50d mostram

uma aproximação da malha refinada na região da sobreposição do lado esquerdo e direito, respectivamente.

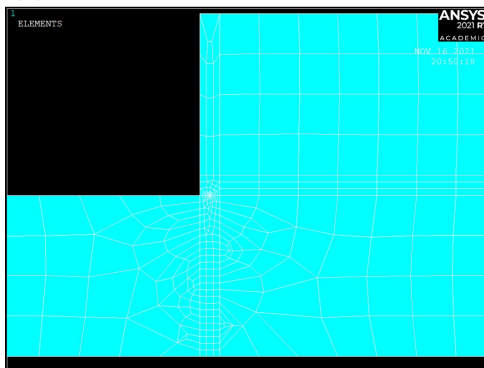
Figura 50 – Malha gerada e condições de contorno aplicadas para análise de tensões.



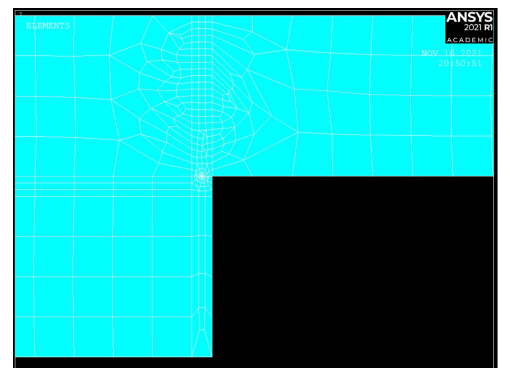
(a) Condições de contorno aplicadas.



(b) Aproximação da malha refinada na região da sobreposição.



(c) Aproximação da malha refinada na região da sobreposição no lado esquerdo.



(d) Aproximação da malha refinada na região da sobreposição no lado direito.

Fonte: autor

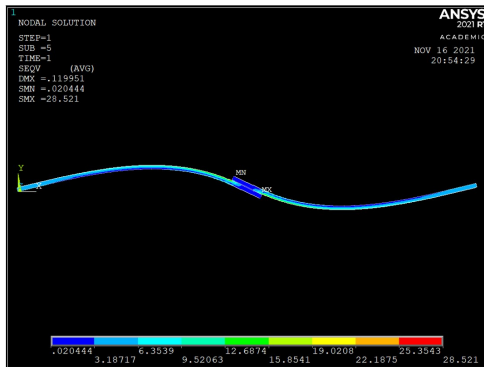
Com todos os parâmetros e condições aplicadas, foi possível realizar o ensaio e obter a solução nodal do problema, mostrado de maneira geral na Figura 51a e de maneira detalhada na Figura 51b. Após analisar e comparar os resultados com os resultados do ensaio preliminar, mostrados na Tabela 5, é possível concluir que houve um aumento da máxima tensão de Von Mises na região da trinca que passou de 20,59 MPa na junta colada sem trinca, para 28,521 MPa na junta com a trinca, um aumento de 38%. Como resultado disso, pode-se observar nas Figuras 51c e 51d que as superfícies dos substratos não estão mais unidas. A partir desse segundo resultado, é possível concluir que o modelo utilizado segue um padrão lógico, validando que o *scrip* utilizado é capaz de reproduzir corretamente o comportamento de uma junta colada.

Tabela 5 – Variação de Resultados entre o modelo do ensaio preliminar e o problema proposto 1

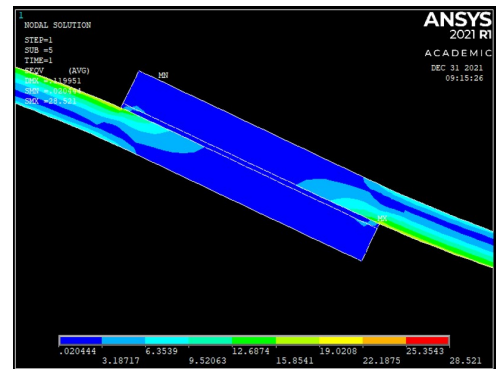
Tensão Máxima (MPa) Ensaio preliminar	Tensão Máxima (MPa) Problema proposto 1	Variação
20,59	28,52	38%

Fonte: autor

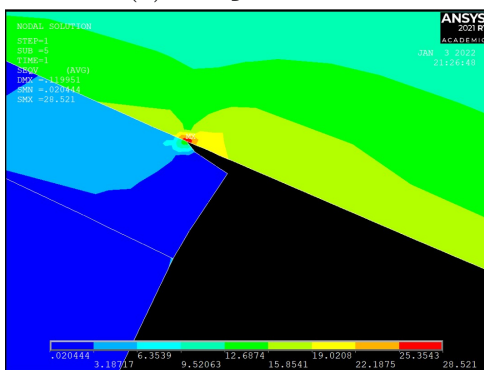
Figura 51 – Malha gerada e condições de contorno aplicadas para análise de tensões



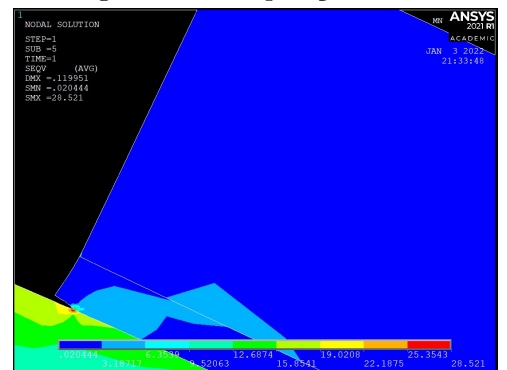
(a) Solução Nodal.



(b) Aproximação da malha refinada na região da sobreposição.



(c) Aproximação da malha refinada na região da sobreposição no lado esquerdo.



(d) Aproximação da malha refinada na região da sobreposição no lado direito.

Fonte: autor

4.4 Problema Proposto 2

O segundo problema proposto tem como objetivo validar o *scrip* mostrado na sessão anterior, agora a partir de um modelo obtido experimentalmente. Para isso, foram simulados os resultados obtidos por Cruz (2013) em trabalho e detalhado na sessão metodologia.

Em seu estudo, Cruz (2013) utilizou diferentes condições para investigar as alterações nas propriedades mecânicas causadas pela dispersão de grafeno em adesivos epóxi. Para isso, além dos dois tipos de substratos, o autor utilizou três tipos de adesivos, sendo

um sem grafeno e dois outros variando as quantidades de grafeno. Para a preparação do adesivo nanomodificado e para a realização do processo de envelhecimento, ele colocou as amostras dentro de uma câmara fechada sob a incidência de luz ultravioleta (UV) por períodos determinados e mostrados na Tabela 6.

Tabela 6 – Quantidade de nanopartícula utilizada e tempo de exposição à radiação UV

Quantidade de nanopartícula (%)	Tempo de Exposição/Envelhecimento (h)
0	0
1	100, 200, 300, 400, 500
2	100, 200, 300, 400, 500

Fonte: adaptado de Cruz (2013)

Para essa análise, foram utilizados dois modelos de *scripts* diferentes, o primeiro para o substrato de alumínio, que é um material isotrópico, e o segundo para o substrato de fibra de carbono multidirecional, que é um material ortotrópico. Ambos serão apresentados a seguir.

- 1^o Modelo: Adesivo linear e Substrato isotrópico linear

```

1 e1=1945      ! Modulo de elasticidade do adesivo N/$mm^2
2 nu1=0.38    ! Coeficiente de Poisson do adesivo
3 e2=70e3     ! Modulo de elasticidade do substrato N/$mm^2
4 nu2=0.33    ! Coeficiente de Poisson do substrato

```

- 2^o Modelo: Adesivo linear e Substrato ortotrópico linear

```

1 e1=1945      ! Modulo de elasticidade do adesivo N/mm^2
2 nu1=0.38    ! Coeficiente de Poisson do adesivo
3 ec1=99.8e3  ! Modulo aparente do substrato de composito na
4             ! direcao 1 em N/mm^2
5 ec2=28.1e3  ! Modulo aparente do substrato de composito na
6             ! direcao 2 em N/mm^2
7 ec3=9.64e3  ! Modulo aparente do substrato de composito na
8             ! direcao 3 em N/mm^2
9 nu12=0.69   ! Coeficiente de Poisson aparente do substrato de
10            ! composito no plano 1-2
11 nu23=0.5   ! Coeficiente de Poisson aparente do substrato de
12            ! composito no plano 2-3)
13 g12=25.1e3 ! Modulo de cisalhamento do substrato de composito
14            ! no plano 1-2
15 g23=3.21e3 ! Modulo de cisalhamento do substrato de composito
16            ! no plano 2-3

```

Uma vez definidos os parâmetros necessários para ambos os substratos, foi utilizado o mesmo *script* citado no ensaio preliminar e no problema proposto 1, mantendo as mesmas condições de contorno e alterando as forças aplicadas, conforme explicação a seguir.

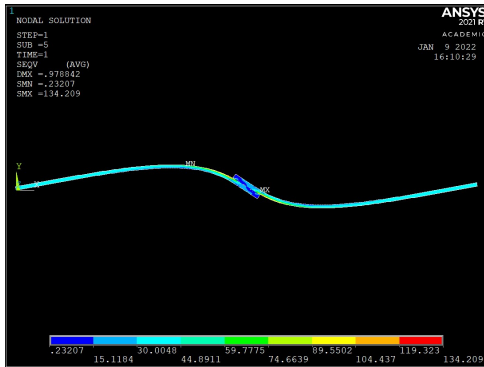
Como já citado, os dados utilizados para simulação foram reproduzidos do trabalho de Cruz (2013), porém, o autor não menciona o limite de escoamento dos adesivos que utilizou, por isso, para determinar as forças exercidas sobre o modelo, foi assumido que tal limite seria de 50% do limite de resistência encontrado experimentalmente. Com essas informações, foram encontrados os resultados apresentados na Tabela 7. Analisando os resultados, a partir da tensão de *Von Mises*, é possível dizer que a junta colada que utiliza o substrato de fibra de carbono consegue suportar uma carga de aproximadamente 9% a mais do que a junta colada com substrato de alumínio. Isso se deve à característica do material compósito ser ortotrópico, que influenciou o resultado da distribuição de tensão dentro do adesivo, como é possível visualizar nas Figuras 52, 53 e 54.

Tabela 7 – Máxima Tensão de *Von Mises* para substratos de Alumínio e Fibra de Carbono

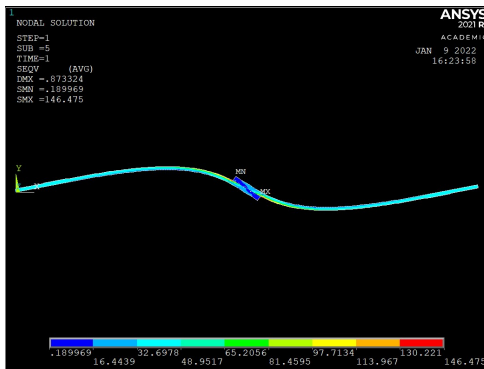
Identificação	F (N)	AL - Máx Tensão Von Mises (MPa)	FC - Máx Tensão Von Mises (MPa)	Variação (%) entre os substratos
0% Grafeno, sem envelhecimento	3054	134,21	146,47	9,14%
1% Grafeno, 100h envelhecimento	1904,5	87,08	94,63	8,68%
1% Grafeno, 200h envelhecimento	2581	115,16	125,47	8,95%
1% Grafeno, 300h envelhecimento	1826,5	83,78	91,01	8,63%
1% Grafeno, 400h envelhecimento	1024	48,82	52,74	8,05%
2% Grafeno, 100h envelhecimento	1858	85,11	92,48	8,65%
2% Grafeno, 200h envelhecimento	2917	128,73	140,43	9,09%
2% Grafeno, 300h envelhecimento	2852,5	126,15	137,58	9,06%
2% Grafeno, 400h envelhecimento	2132	96,67	105,11	8,74%

Fonte: autor

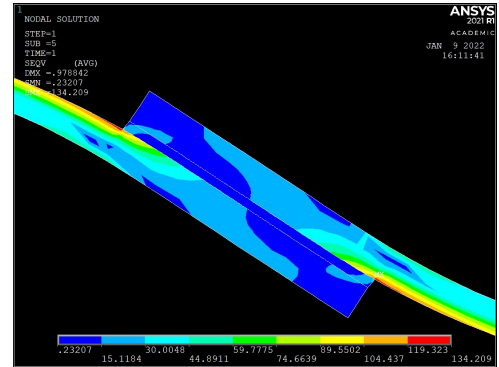
Figura 52 – Solução Nodal para a junta colada com 0% de adição de grafeno e sem envelhecimento



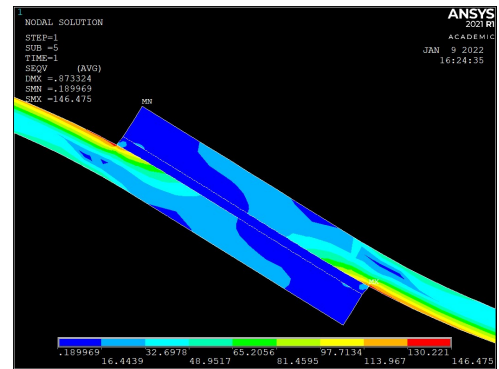
(a) Junta colada com substrato de alumínio.



(c) Junta colada com substrato de fibra de carbono.



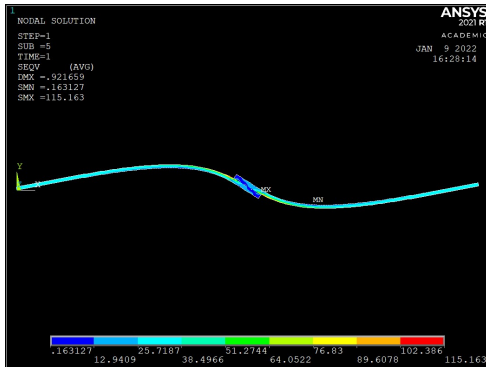
(b) Aproximação na região de sobreposição da junta colada com substrato de alumínio.



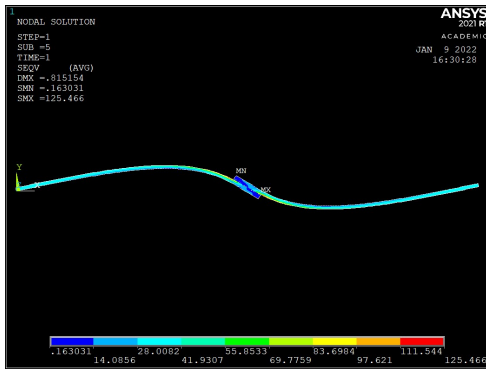
(d) Aproximação na região de sobreposição da junta colada com substrato de fibra de carbono.

Fonte: autor

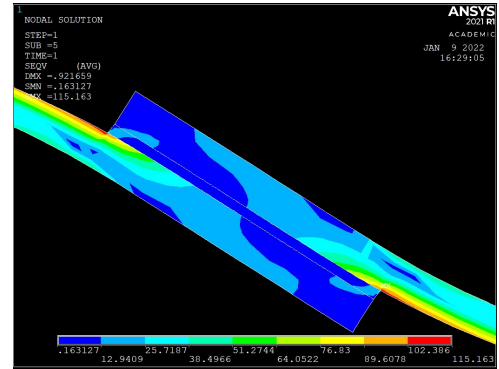
Figura 53 – Solução Nodal para a junta colada com 1% de adição de grafeno e 200h de envelhecimento.



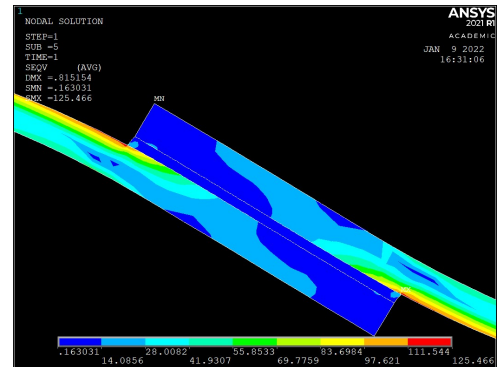
(a) Junta colada com substrato de alumínio.



(c) Junta colada com substrato de fibra de carbono.



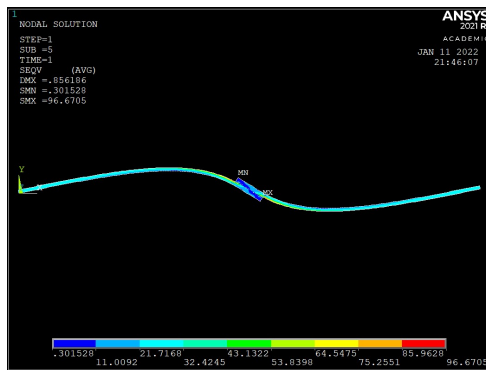
(b) Aproximação na região de sobreposição da junta colada com substrato de alumínio.



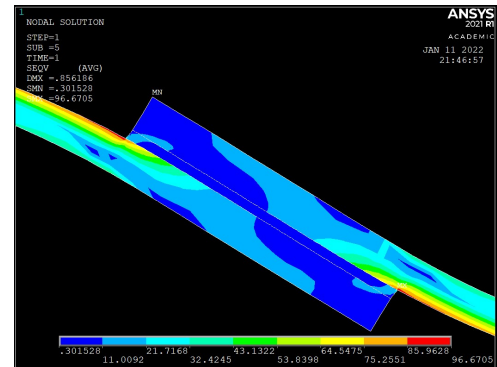
(d) Aproximação na região de sobreposição da junta colada com substrato de fibra de carbono.

Fonte: autor

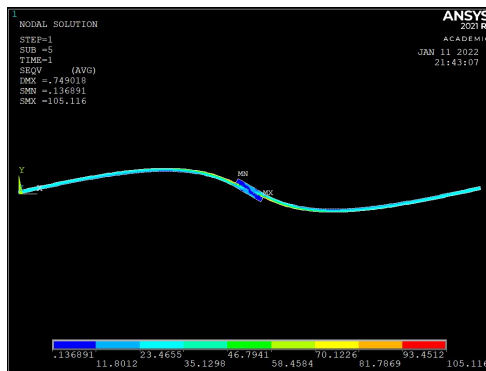
Figura 54 – Solução Nodal para a junta colada com 2% de adição de grafeno e 400h de envelhecimento.



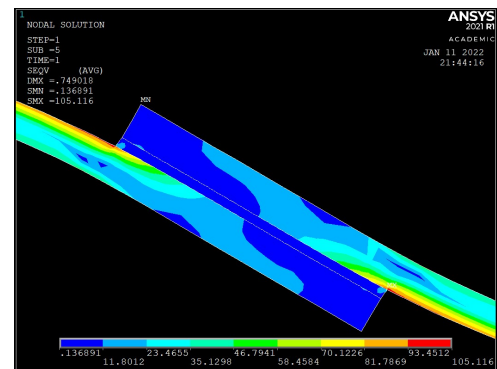
(a) Junta colada com substrato de alumínio.



(b) Aproximação na região de sobreposição da junta colada com substrato de alumínio.



(c) Junta colada com substrato de fibra de carbono.



(d) Aproximação na região de sobreposição da junta colada com substrato de fibra de carbono.

Fonte: autor

A partir desses resultados, foi possível realizar uma segunda análise, uma avaliação dos comportamentos das amostras que possuíam grafeno e que foram submetidas a uma exposição de luz ultravioleta em comparação com a amostra, aqui chamada de padrão, sem grafeno e sem envelhecimento. A Tabela 8 mostra a variação das tensões dessas amostras comparadas à amostra padrão. Do mesmo modo que Cruz (2013), aqui também foi observado que em todas as amostras que foram submetidas a envelhecimento, nas primeiras 100 horas houve um decaimento substancial ($\approx 35\%$) da tensão de *Von Mises*, que foi causada por uma provável cura incompleta do adesivo. Após as 200 horas essa tensão voltou a subir, e decair novamente em 300 horas, como era esperado para uma amostra envelhecida. Esses resultados mostram a compatibilidade com os resultados obtidos experimentalmente por Cruz (2013).

Tabela 8 – Variação das tensões em comparação à amostra padrão

Identificação	F (N)	AL - Máx Tensão Von Mises (MPa)	Variação AL em relação a amostra padrão	FC - Máx Tensão Von Mises (MPa)	Variação FC em relação a amostra padrão
0% Grafeno, sem envelhecimento	3054	134,21		146,47	
1% Grafeno, 100h envelhecimento	1904,5	87,08	-35,12%	94,63	-35,39%
1% Grafeno, 200h envelhecimento	2581	115,16	-14,19%	125,47	-14,34%
1% Grafeno, 300h envelhecimento	1826,5	83,78	-37,58%	91,01	-37,87%
1% Grafeno, 400h envelhecimento	1024	48,82	-63,63%	52,74	-63,99%
2% Grafeno, 100h envelhecimento	1858	85,11	-36,58%	92,48	-36,87%
2% Grafeno, 200h envelhecimento	2917	128,73	-4,08%	140,43	-4,13%
2% Grafeno, 300h envelhecimento	2852,5	126,15	-6,01%	137,58	-6,08%
2% Grafeno, 400h envelhecimento	2132	96,67	-27,97%	105,12	-28,24%

Fonte: autor

Um estudo comparativo mostrou que os resultados obtidos experimentalmente e as distribuições de tensões dentro da junta colada, obtidas através do método de elementos finitos, estavam compatíveis, ou seja, a região crítica da falha estava acontecendo na região de singularidade. Com o objetivo de exemplificar essa compatibilidade, foram separadas imagens das amostras com maior valor de tensão de *Von Mises*, sendo que a Figura 52 mostra os resultados das amostras com 0% de grafeno e sem envelhecimento, a Figura 53 mostra os resultados das amostras com 1% de grafeno e 200 horas de envelhecimento e, por último, a Figura 54 a mostra os resultados das amostras com 2% de grafeno e 400h de envelhecimento.

Por fim, pode-se observar que existe um aumento da área de concentração de tensão na região de singularidade à medida que o adesivo vai “envelhecendo” com a exposição por luz ultravioleta. Esse fenômeno já era esperado, no entanto, observou-se que esse aumento de área parece não ser linearmente dependente da redução de rigidez (módulo de elasticidade). Esse fenômeno não-linear pode estar associado a grande deformação sofrida pela junta colada. Como mencionado por Avila e Bueno (2004), as juntas de sobreposição simples (o modelo de junta simulado) quando submetido ao ensaio de tração tem um comportamento não-linear. Tal comportamento foi observado nos dois casos analisados (aderente de alumínio e de fibra de carbono). Note que a distribuição de tensões dentro do adesivo é bastante semelhante, mesmo se tratando de aderentes diferentes, o primeiro, alumínio (isotrópico) e o segundo compósito (ortotrópico), nesse estudo parece estar de acordo com Fevery et al. (2021) na sua forma macroscópica segundo compósito (ortotrópico).

Esse fato se deve à suposição do adesivo nanomodificado por grafeno ser considerado isotrópico. Notou-se, no entanto, que, para uma mesma carga, o aderente de fibra de

carbono “transmite” menos carga ao adesivo. Isso quer dizer que uma grande parte da carga é suportada pelo adesivo. Esse fenômeno já havia sido reportado por [Neto \(2011\)](#). Os resultados de envelhecimento simulados nesse estudo estão de acordo com os resultados reportados por [Feverly et al. \(2021\)](#) de forma macroscópica. A análise dos campos de tensões e deformações mostram padrões muito semelhantes àqueles descritos em [Karachalios, Adams e Silva \(2013\)](#). Um estudo mais detalhado da distribuição dos campos de tensão e deformação deve ser realizado com a opção de ortotropia do adesivo.

5 Conclusões

Foi adaptado um *script* afim de estudar a eficiência de um modelo numérico comum para ser utilizado para análise de juntas coladas obtidas experimentalmente. O ensaio preliminar mostrou que o modelo de uma junta colada com substrato de alumínio é válido, pois apresentou resultados com uma variação mínima de apenas 0,34% comparado aos resultados obtidos por [Wahab \(2014\)](#) em seu ensaio original.

Os resultados do primeiro problema proposto foram compatíveis mesmo em uma junta colada com um dano inserido, pois foi observado na região da trinca um aumento de 38% da máxima tensão de *Von Mises*, passando de 20,59 MPa na junta sem dano para 28,52 MPa na junta com dano, um comportamento esperado para a condição.

O segundo problema proposto fez uma comparação de amostras em condições diferentes, com substrato de alumínio e fibra de carbono, com e sem grafeno, expostas ou não a luz ultravioleta, onde o *script* utilizado anteriormente foi adaptado para as mesmas condições destas amostras. Para esse problema, foi possível concluir três resultados diferentes.

O primeiro é que as amostras da junta colada que utilizaram substrato de fibra de carbono conseguem suportar uma carga aproximadamente 9% superior do que as amostras que utilizaram substrato de alumínio. Isso se deve ao fato da fibra de carbono ser um material ortotrópico.

O segundo é que, através da análise do comportamento das amostras com grafeno e submetidas a UV comparadas com a amostra padrão, foram obtidos os mesmos resultados que [Cruz \(2013\)](#). Do mesmo modo que [Cruz \(2013\)](#), não houve um padrão de decaimento nos resultados obtidos. Com decaimento crítico de aproximadamente 35% em todas as amostras submetidas a 100 horas de envelhecimento, voltando a subir com 200 horas e decaindo novamente em 300 horas. Esse novo decaimento é um comportamento esperado para amostras submetidas ao envelhecimento.

Por último, foi possível reafirmar a compatibilidade dos resultados através das distribuições de tensão dentro da junta colada, que apresentou o comportamento esperado mostrando que a região crítica de falha está compatível com a solução analítica, ou seja, ocorrendo na região de singularidade.

6 Sugestões para Trabalhos Futuros

Como sugestões de trabalhos futuros, destacam-se:

- Analisar região crítica de falha de modo a identificar padrão para predição de falha;
- Analisar amostras que utilizaram grafeno sem envelhecimento para entender se diferença de resultado se deu devido ao grafeno ou ao envelhecimento;
- Desenvolver, a partir da análise híbrida (experimental e computacional), um modelo capaz de prever a vida útil de uma junta colada que possui algum tipo de dano.

Referências

- AJAYAN, P. M.; SCHADLER, L. S.; BRAUN, P. V. **Nanocomposite Science and Technology**. New Jersey: Wiley, 2003. 230 p.
- ARAÚJO, K. A. de S. **Estudo de propriedades elétricas de nanotubos de carbono e monocamadas de Ácido Retinóico por microscopia de varredura por sonda**. 133 p. Tese (Doutorado em Física) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.
- AULETE, F. J. C. **Aulete Digital**. 2020. Disponível em: <<http://www.aulete.com.br/composito>>. Acesso em: 08 nov. 2020.
- AVILA, A. F.; BUENO, P. d. O. An Experimental And Numerical Study On Adhesive Joints for Composites. **Composite Structures**, v. 64, p. 531–537, 2004.
- AVILA, A. F. et al. An investigation on post-fire behavior of hybrid nanocomposites under bending loads. **Composites Part B: Engineering**, v. 41, n. 5, p. 380–387, 2010.
- AZEVEDO, J. **O que é grafeno?** 2007. Disponível em: <<https://www.ecycle.com.br/2007-grafeno.html>>. Acesso em: 19 jan. 2021.
- BARBOSA, G. M. P. **Nanocompósitos - Materiais Avançados**. 2020. Disponível em: <<https://betaeq.com.br/index.php/2020/04/06/nanocompositos-materiais-avancados/>>. Acesso em: 08 nov. 2020.
- BARCELOS, I. D. **Crescimento de Grafeno por CVD em folhas de Cobre**. 81 p. Dissertação (Mestrado em Física) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.
- CAETANO, M. J. L. **Propriedade dos Materiais**. 2015. Disponível em: <<https://www.ctborracha.com/materiais-de-engenharia/propriedades/>>. Acesso em: 06 dez. 2020.
- CALLISTER, W. D. **Materials Science and Engineering: An introduction**. 7. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2006. 832 p.
- CHEKER, D. C. **Compósitos de Matriz Polimérica para Sistemas de Água para Combate a Incêndio**. 65 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.
- COOPER, D. R. et al. Experimental Review of Graphene. **ISRN Condensed Matter Physics**, v. 2012, p. 1–56, 2012.
- CRUZ, D. T. L. **Efeito Da Exposição a Luz Ultravioleta Em Adesivo Nanomodificado Por Grafeno**. 91 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.
- DANIEL, I. M.; ISHAI, O. **Engineering Mechanics of Composite Materials**. 2. ed. New York: Oxford University Press, 2006. 396 p.

- DU, F.; WINEY, K. I. Nanotubes in Multifunctional Polymer Nanocomposites. In: GOGOTSI, Y. (Ed.). **Nanomaterials Handbook**. 1. ed. Pennsylvania: Taylor & Francis, 2006. cap. 20, p. 574–592.
- EBNESAJJAD, S. (Ed.). **Adhesives technology handbook**. 2. ed. Norwich: William Andrew, 2008. 475 p.
- FERREIRA, V. R. **Carbono**. 2020. Disponível em: <<https://brasilecola.uol.com.br/quimica/carbono.htm>>. Acesso em: 01 jul. 2020.
- FEVERY, S. et al. Combination and interaction of ageing parameters on single lap shear adhesive joints. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 111, p. 10, 2021.
- FISCHER, J. E. Carbon Nanotubes: Structure and Properties. In: GOGOTSI, Y. (Ed.). **Nanomaterials Handbook**. 1. ed. Pennsylvania: Taylor & Francis, 2006. cap. 4, p. 80–114.
- FISH, J.; BELYTSCHKO, T. **A First Course in Finite Elements**. 1. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2007. 319 p.
- GARNICA, D. J. F. **Síntese e caracterização de grafeno por CVD catalítico em filmes finos de Ni e Cu**. 109 p. Dissertação (Mestrado em Microeletrônica) — Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.
- GOLAND, M.; REISSNER, E. Stresses in cemented joint. **SME Journal Applied Mechanical**, v. 11, p. 17–27, 1944.
- HIBINO, H.; KAGESHIMA, H.; NAGASE, M. Graphene Growth on Silicon Carbide. **NTT Technical Review**, v. 8, n. 8, p. 6, 2010.
- HOLGADO, D. P. A. **Estudo Das Propriedades Tribomecânicas De Filmes De Carbono Amorfo Fluorado**. 113 p. Tese (Doutorado em Física) — PUC Rio, Rio de Janeiro, 2012.
- HONE, J. et al. Thermal properties of carbon nanotubes and nanotube-based materials. **Applied Physics A: Materials Science Processing**, v. 74, n. 3, p. 339–343, 2002.
- HUSSAIN, F. et al. Review article: Polymer-matrix Nanocomposites, Processing, Manufacturing, and Application: An Overview. **Journal of Composite Materials**, v. 40, n. 17, p. 1511–1575, 2006.
- IBRAHIM, K. S. Carbon nanotubes-properties and applications: a review Review Articles. **Carbon Letters**, v. 3, n. 3, p. 131–144, 2013.
- JONES, R. M. **Mechanics of Composite Materials**. 2. ed. Blacksburg: Taylor and Francis, 1998. 519 p.
- KAPP, J. **Exploring Adhesive bonding processes in the Automotive and Aerospace markets (Youtube)**. 2017. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=-QFec7tM8Z8>>. Acesso em: 27 fev. 2021.
- KARACHALIOS, E.; ADAMS, R.; SILVA, L. F. da. Single lap joints loaded in tension with ductile steel adherends. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 43, p. 96–108, 2013.

KOLNEROVÁ, M. et al. Strength of Adhesive Bonding Joints for Classical and Progressive Materials Used for Car-Body Design. In: **19th International Conference on Metallurgy and Materials**. Roznov pod Radhostem: [s.n.], 2010. p. 5.

KUILLA, T. et al. Recent advances in graphene based polymer composites. **Progress in Polymer Science**, v. 35, n. 11, p. 1350–1375, 2010.

LOSURDO, M. et al. Graphene CVD growth on copper and nickel: role of hydrogen in kinetics and structure. **Physical Chemistry Chemical Physics**, v. 13, n. 46, p. 20836–20843, 2011.

MALLICK, P. **Fiber-Reinforced Composites: Materials, manufacturing, and design**. 3. ed. Boca Raton: CRC Press, 2007. 638 p.

MARINHO, I. J. P. **Projeto Ótimo De Estruturas Metálicas De Arquibancadas Reutilizáveis Via Ansys**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2002.

MATERIAIS JUNIOR. **Materiais Compósitos: origem e funcionalidades**. 2020. Disponível em: <<https://materiaisjr.com.br/materiais-compositos-origem-e-funcionalidades/>>. Acesso em: 20 dez. 2020.

MECH LECTURES. **Carbon Nanotube Technology: An introduction**. 2017. Disponível em: <<https://www.mechlectures.com/carbon-nanotube-technology-introduction/>>. Acesso em: 28 jan. 2021.

MIRLISENNA, G. **Método dos Elementos Finitos: o que é?** 2016. Disponível em: <<https://www.esss.co/blog/metodo-dos-elementos-finitos-o-que-e/>>. Acesso em: 19 nov. 2020.

MONTEIRO, E. C. **Desenvolvimento e Análise de Adesivos Nanomodificados por Nanotubos de Carbono**. 115 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.

MONTEIRO, E. C. **Biomimética Aplicada Ao Projeto e à Análise De Juntas Coladas Nanomodificadas Por Nanotubo De Carbono**. 173 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2020.

MONTEIRO, E. C.; Avila, A. The Carbon Nanotubes Effect into Single-lap Joint Failure Modes and Load Capacity: a Macromechanical Analysis. **Materials Research**, v. 20, p. 143–152, 2017.

MOTA, A. I. M. **Juntas de sobreposição simples com camada adesiva compósita**. 97 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) — Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2013.

NETO, A. S. **Desenvolvimento de um Adesivo Nanomodificado por Grafeno**. 80 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

NETO, F. L.; PARDINI, L. C. **Compósitos Estruturais**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2016. 416 p.

NOVOSELOV, K. S. Nobel lecture: Graphene: Materials in the flatland. **Reviews of Modern Physics**, v. 83, n. 3, p. 837–849, 2011.

NOVOSELOV, K. S. et al. Electric field effect in atomically thin carbon films. **Science**, v. 306, n. 5696, p. 666–669, 2004.

OCHOA, O. O.; REDDY, J. N. **Finite Element Analysis of Composite Laminates**. 1. ed. Dordrecht: Springer, 1992. v. 7. 224 p. (Solid Mechanics and Its Applications, v. 7).

PARDINI, L. C.; GONÇALVES, A. Processamento de compósitos termoestruturais de carbono reforçado com fibras de carbono. **Journal of Aerospace Technology and Management**, n. 2, p. 231–241, 2009.

PIXABAY. **Grafeno Grafite Estrutura Química**. 2013. Disponível em: <<https://pixabay.com/pt/vectors/grafeno-grafite-estrutura-quimica-147571/>>. Acesso em: 19 jan. 2021.

POLSHIKOV, S. V. et al. Composite materials of graphene nanoplatelets and polypropylene, prepared by in situ polymerization. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 127, n. 2, p. 904–911, 2013.

SANTOS, C. G. dos. **Materiais Compósitos - 1ª Parte**. 2019. Disponível em: <http://professor.ufop.br/sites/default/files/claudio/files/compositos_2019_alunos_parte_1.pdf>. Acesso em: 12 nov. 2020.

SEGUNDO, J. E. D.; VILAR, E. O. Grafeno: Uma revisão sobre propriedades, mecanismos de produção e potenciais aplicações em sistemas energéticos. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v. 11, n. 2, p. 54–57, 2016.

SOARES, M. R. F. **Materiais Compósitos: Aspectos Gerais e Aplicações**. 2018. Disponível em: <<https://www.ucsminhaescolha.com.br/site/midia/arquivos/05-12-17-materiais-compositos-e-aplicacoes1.pdf>>. Acesso em: 13 nov. 2020.

SOUZA, N. S. **Síntese e Estudo das Propriedades Físicas de Grafite Ferromagnético Fluido Nanoestruturado**. 71 p. Tese (Doutorado em Física) — Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2014.

SOUZA, R. Magalhães de. **O Método dos Elementos Finitos Aplicado ao Problema de Condução de Calor**. 1. ed. Belém: UFPA, 2003. 40 p.

SUVOROVA, Y. V. et al. Investigations of physical and mechanical properties of polymeric nanocomposites (review). **Inorganic Materials**, v. 49, n. 15, p. 1357–1368, 2013.

TAVAKOLI, M. M. et al. Synergistic Roll-to-Roll Transfer and Doping of CVD-Graphene Using Parylene for Ambient-Stable and Ultra-Lightweight Photovoltaics. **Advanced Functional Materials**, v. 30, n. 31, p. 201–224, 2020.

TSCHIPTSCHIN, A. P. **Seleção de Materiais e Análise de Falhas**. 2011. Disponível em: <<http://www.pmt.usp.br/pmt2501/Elementosfinitos.pdf>>. Acesso em: 19 nov. 2020.

VENTURA, A. M. F. M. **Compósitos de Matriz Metálica**. 2012. Disponível em: <<https://compositosmetalicos.wordpress.com/2012/06/22/bkagrtwtwer/>>. Acesso em: 12 nov. 2020.

WAHAB, M. A. **The Mechanics of Adhesives in Composite and Metal Joints: Finite element analysis with ansys**. 1. ed. Lancaster: DEStech Publications, 2014. 216 p.

WAHAB, M. M. A.; ASHCROFT, I. A.; CROCOMBE, A. D. A comparison of failure prediction methods for an adhesively bonded composite beam. **The Journal of Strain Analysis for Engineering Design**, v. 39, p. 173–185, 2004.

WONG, H.-S. P.; AKINWANDE, D. **Carbon Nanotube and Graphene Device Physics**. 1. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2011. 251 p.

ZARBIN, A. J. G.; OLIVEIRA, M. M. Nanoestruturas De Carbono (Nanotubos, Grafeno): Quo Vadis? **Química Nova**, v. 36, n. 10, p. 1533–1539, 2013.

Apêndices

APÊNDICE A – *Scripts*

1. Modelo utilizado no ensaio preliminar

```

1 /clear
2 /PREP7
3 ET,1,82,,,2
4 e1=2522
5 nu1=0.4
6 sy=29
7 su=59.23
8 sf=59.9
9 stu =0.0295
10 stf =0.0716
11 e2=70e3
12 nu2=0.33
13 /PREP7
14 MP,ex,1,e1
15 MP,nuxy,1,nu1
16 TB,melas,1,,,
17 TBPT,defi,sy/e1,sy
18 TBPT,defi,sy/e1+stu,su
19 TBPT,defi,sy/e1+stf,sf
20 MP,ex,2,e2
21 MP,nuxy,2,nu2
22
23 tadv=0.2
24 tadh=1.6
25 lo=12.5
26 Lt=100
27 Wt=25
28
29 K,1,0,0,0
30 K,2,Lt,0,0
31 KGEN,2,1,2,1,,,tadh,,2
32 K,5,Lt-lo,tadh
33 KGEN,2,4,5,1,,,tadv,,2
34 K,8,2*Lt-lo,tadh+tadv
35 KGEN,2,7,8,1,,,tadh,,2
36
37 A,1,2,4,5,3
38 A,5,4,6,7
39 A,7,6,8,10,9
40
41 ESIZE,3*tadv

```

```
42 AESIZE ,2 ,tadv/3
43 MAT ,1
44 AMESH ,2
45 MAT ,2
46 AMESH ,1 ,3 ,2
47
48 KREFINE ,5 ,6 ,1 ,2 ,1
49 EPLLOT
50 FINISH
51 /SOLU
52 ft=200
53 KSEL ,s ,loc ,x ,0
54 KSEL ,r ,loc ,y ,0
55 DK ,all ,all
56 KSEL ,s ,loc ,x ,2*lt-lo
57 KSEL ,r ,loc ,y ,tadh+tadv
58 DK ,all ,uy
59 NLGEOM ,on
60 LNSRCH ,on
61 TIME ,1
62 KBC ,0
63 KSEL ,s ,loc ,x ,2*lt-lo
64 KSEL ,a ,loc ,x ,0
65 LSLK ,s ,1
66 SFL ,all ,pres , -ft/(tadh*wt)
67 KSEL ,all
68 LSEL ,all
69 AUTOTS ,on
70 DELTIM ,0.2 ,0.02 ,0.2
71 OUTRES ,all ,all
72 OUTPR ,all ,all
73 SOLVE
74 FINI
75 SAVE
76 /POST1
77 /DSCALE ,1 ,AUTO
78 PLDISP ,1
79 SET , LAST
80
81 /EFACET ,1
82 PLNSOL , S,EQV , 0,1.0
```

2. Modelo utilizado no problema proposto 1

```
1 /clear
2 /PREP7
3 ET ,1 ,82 , , ,2
4 e1=2522
```

```
5 nu1=0.4
6 sy=29
7 su=59.23
8 sf=59.9
9 stu =0.0295
10 stf =0.0716
11 e2=70e3
12 nu2=0.33
13 /PREP7
14 MP,ex,1,e1
15 MP,nuxy,1,nu1
16 TB,melas,1,,
17 TBPT,defi,sy/e1,sy
18 TBPT,defi,sy/e1+stu,su
19 TBPT,defi,sy/e1+stf,sf
20 MP,ex,2,e2
21 MP,nuxy,2,nu2
22
23 tadv=0.2
24 tadh=1.6
25 lo=12.5
26 lt=100
27 l1=lt-lo
28 a=0.1
29 delta=tadv/8
30 wt=25
31
32 K,1,0,0,0
33 K,2,l1,0
34 K,3,l1+2*a,0
35 K,4,l1+lo-2*a,0
36 K,5,l1+lo,0
37 KGEN,2,1,5,1,,tadh,,5
38 K,11,l1+a,tadh
39 K,12,l1,tadh
40 KGEN,2,7,10,1,,tadv,,6
41 K,17,l1+lo-a,tadh+tadv
42 K,18,l1+lo,tadh+tadv
43 K,19,2*l1+lo,tadh+tadv
44 KGEN,2,13,16,1,,tadh,,7
45 K,24,2*l1+lo,2*tadh+tadv
46
47 A,1,2,7,6
48 A,2,3,8,11,7
49 A,3,4,9,8
50 A,4,5,10,9
51 A,12,11,8,14,13
```

```
52 A,8,9,15,14
53 A,9,10,16,17,15
54 A,13,14,21,20
55 A,14,15,22,21
56 A,15,17,18,23,22
57 A,18,19,24,23
58
59 KSCON,11,delta,1
60 KSCON,17,delta,1
61
62 AESIZE,5,tadv/3
63 AESIZE,7,tadv/3
64 AESIZE,2,tadv/3
65 AESIZE,10,tadv/3
66 ESIZE,2*tadv
67
68 MAT,1
69 AMESH,5,7,1
70 MAT,2
71 AMESH,1,4,1
72 AMESH,8,11,1
73 EPLLOT
74 FINISH
75
76 /SOLU
77 ft=200
78 KSEL,s,loc,x,0
79 KSEL,r,loc,y,0
80 DK,all,all
81 KSEL,s,loc,x,2*lt-lo
82 KSEL,r,loc,y,tadh+tadv
83 DK,all,uy
84 NLGEOM,on
85 LNSRCH,on
86 TIME,1
87 KBC,0
88 KSEL,s,loc,x,2*lt-lo
89 KSEL,a,loc,x,0
90 LSLK,s,1
91 SFL,all,pres,-ft/(tadh*wt)
92 KSEL,all
93 LSEL,all
94 AUTOTS,on
95 DELTIM,0.2,0.02,0.2
96 OUTRES,all,all
97 OUTPR,all,all
98 SOLVE
```

```

99 FINI
100 SAVE
101 /POST1
102 /DSCALE,1,AUTO
103 PLDISP,1
104 SET, LAST
105
106 /EFACET,1
107 PLNSOL, S,EQV, 0,1.0

```

3. Modelo utilizado nas juntas do problema proposto 2

```

1 /clear
2 /PREP7
3 ET,1,82,,,2
4 e1=1945
5 nu1=0.38
6 /PREP7
7 MP,ex,1,e1
8 MP,nuxy,1,nu1
9 e2=70e3
10 nu2=0.33
11 /PREP7
12 MP,ex,2,e2
13 MP,nuxy,2,nu2
14
15 tadv=0.76
16 tadh=3.17
17 lo=25.4
18 Lt=228
19 Wt=25.4
20
21 K,1,0,0,0
22 K,2,Lt,0,0
23 KGEN,2,1,2,1,,tadh,,2
24 K,5,Lt-lo,tadh
25 KGEN,2,4,5,1,,tadv,,2
26 K,8,2*Lt-lo,tadh+tadv
27 KGEN,2,7,8,1,,tadh,,2
28
29 A,1,2,4,5,3
30 A,5,4,6,7
31 A,7,6,8,10,9
32
33 ESIZE,3*tadv
34 AESIZE,2,tadv/3
35 MAT,1
36 AMESH,2

```

```
37 MAT,2
38 AMESH,1,3,2
39
40 KREFINE,5,6,1,2,1
41 EPLLOT
42 FINISH
43 /SOLU
44 ft= <valor> !ver valores na Tabela 7
45 KSEL,s,loc,x,0
46 KSEL,r,loc,y,0
47 DK,all,all
48 KSEL,s,loc,x,2*lt-lo
49 KSEL,r,loc,y,tadh+tadv
50 DK,all,uy
51 NLGEOM,on
52 LNSRCH,on
53 TIME,1
54 KBC,0
55 KSEL,s,loc,x,2*lt-lo
56 KSEL,a,loc,x,0
57 LSLK,s,1
58 SFL,all,pres,-ft/(tadh*wt)
59 KSEL,all
60 LSEL,all
61 AUTOTS,on
62 DELTIM,0.2,0.02,0.2
63 OUTRES,all,all
64 OUTPR,all,all
65 SOLVE
66 FINI
67 SAVE
68 /POST1
69 /DSCALE,1,AUTO
70 PLDISP,1
71 SET, LAST
72
73 /EFACET,1
74 PLNSOL, S,EQV, 0,1.0
```