CEFET/RJ
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

ANÁLISE DE PROPAGAÇÃO DE TRINCAS EM MODO MISTO DE JUNTAS COLADAS COMPÓSITO-AÇO

Bruno Cambraia Lemos

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais, do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais.

Orientador: Silvio Romero de Barros, D. Sc.

Rio de Janeiro
Abril de 2018

2

ANÁLISE DE FRATURA EM MODO MISTO DE JUNTAS COLADAS COMPÓSITO-AÇO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais, do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais.

Bruno Cambraia Lemos

Aprovada em 27 de Abril de 2018 :

Presidente, Professor Dr. Ricardo Alexandre Amar de Aguiar – CEFET/RJ

Professor Dr. Silvio Romero de Barros – CEFET/RJ (Orientador)

Professora Dra. Silvana de Abreu Martins - UEZO

Rio de Janeiro

Abril de 2018

ANÁLISE DE FRATURA EM MODO MISTO DE JUNTAS COLADAS COMPÓSITO-AÇO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais, do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais.

Bruno Cambraia Lemos

Rio de Janeiro
Abril de 2018

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

L557 Lemos, Bruno Cambraia
Análise de propagação de trincas em modo misto de juntas coladas compósito-aço / Bruno Cambraia Lemos.—2018.
52f. : il.color. grafs., tabs. ; enc.

Dissertação (Mestrado) Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca , 2018.
Bibliografia : f. 51-52
Orientador : Silvio Romero de Barros

1. Nanocompósitos (Materiais). 2. Aço. 3. Juntas adesivas. 4. Engenharia mecânica. 5. Tecnologia de materiais. I. Barros, Silvio Romero de (Orient.). II. Título.

CDD 688.9

DEDICATÓRIA

A Deus, Aos meus pais Ivan Pereira Lemos (In Memorium) e Silda Cambraia Lemos, pelo apoio, educação e incentivo, A minha esposa Fernanda Maria Correia Ferreira Lemos, pela compreensão, A minha filha Giselle Ferreira Lemos, A Petrobras (Universidade Petrobras) pelo incentivo, Aos colegas da companhia, pelo apoio e incentivo.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Silvio Romero de Barros, por todos os ensinamentos e confiança depositados durante esse trabalho.

Ao CEFET/RJ, em especial ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais (PPEMM), pela contribuição na minha formação.

RESUMO

Reparos com materiais compósitos estão sendo aplicados em equipamentos e tubos, que apresentam como vantagens não haver aporte térmico na região reparada e a possibilidade de execução do reparo no local (in-situ) da instalação.

1) Método e respectivo resultado - Uma abordagem numérico-experimental precisará ser utilizada para atingir os objetivos do trabalho, em que corpos de prova são fabricados com o aço em cima e o compósito embaixo (de dimensões de 100mm e 60mm), para ensaios por uma máquina eletromecânica, em que vários ensaios, do tipo flexão em 3 pontos (MMF), com uma pré-trinca e o spam (distância entre a cunha e a extremidade) variando entre valores selecionados, poderão ser delineadas rigidezes, de modo que seja definida a curva de energia crítica de propagação Gc (N/mm) constante, no regime elástico, ajustado à literatura. Poderá ser proposto o desenvolvimento de método numérico, para cálculo de Gc constante.

2) Método e respectivo resultado - Para a detecção da propagação de fissuras e a estimativa da energia crítica de propagação de fissura, no regime elasto-plástico, serão adotados módulos de elasticidade dos materiais A36 e 1045, com o compósito empregado, bem como corpos de prova diferenciados (100 e 60 mm), para fissuras diversas, delineando as respectivas curvas, em que verificaremos o módulo de elasticidade mais adequado (aço 1045, maior coincidência entre teste e simulação), compósito indicado (valor da literatura, em relação ao obtido no ensaio para corpo de 60mm), corpo de prova mais indicado (spam 100 mm, que prevê pequenas deformações e deslocamentos, adequados a mecânica da fratura).

Conclusões - Através das simulações do comportamento dos corpos de prova com dois valores de fissura, obtiveram-se curvas e, implementando-se corpos de prova diferenciados e diferenciadas fissuras, entre 10 a 50 mm, deduziremos o valor da fissura definido (20mm), em que a simulação coincide com o teste, havendo uma concordância entre curvas de ensaio e teste. A energia crítica de propagação de fissura pode ser estimada, sendo o primeiro valor aquele identificado pela comparação com o resultado experimental e o segundo aquele que corresponde ao avanço de uma unidade de área da fissura. A energia Gc pode então ser calculada e o valor encontrado é coerente com a literatura sobre esse tipo de juntas. Propõe-se o desenvolvimento do método numérico no CAST3M para geração de curvas de propagação a Gc constante, para programar ensaios.

ABSTRACT

The composite materials are being developed for repairing piping and vessels. These repairs are being applied, without heating, and possibility to in-situ unit repair.

1) METHOD AND RESULTS – (Plastic Regime) A numerical experimental approach will be developed in this work. Applying mixed mean flow (MMF) specimens, a critical energy fissure propagation Gc will be developed with two selected fissures (the first one identified in a experimental result and the second one with fissure advance).

A Gc parameter will be calculated, in the elastic regime and this value must be in accordance to literature. A numerical development method will be developed for the Gc constant determination.

2) METHOD AND RESULTS -(Plastic-Elastic Regime) For the fissure propagation detection, in the plastic-elastic regime, A36 and SAE 1045 elastic modulus will be adopted, with composite employed, and different specimens (100 and 60 mm), for different fissures, defining their curves.

We will define the better elastic modulus, and composite value (applying literature value, in comparison between employed in essay spam 60 mm), and specimen indicated (100 mm spam, which indicate small deformations and displacements, in accordance to usual paramaters in fracture mechanisms).

CONCLUSIONS - In the simulation of two fissure values, curves will be obtained, and employing different specimens, and different fissures, between 10 and 50 mm, we will verify the fissure defined (20 mm), in which the simulation are in accordance with test, with a general similarity between simulation and test.

A critical energy of crack propagation may be estimated, with the energy variation of unit area, calculated by the area under the graphical for the fissure propagation.

PROPOSALS – We can develop CASTM numerical methods for Gc Critical Energy Curves, for programming essays.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

2.1 – Formatação de materiais compósitos,
2.2 – Classificação dos compósitos quanto ao reforço,
2.3 – Representação de compósitos reforçados com fibras contínuas e alinhadas, (b) descontínuas e alinhadas e (c) descontínuas e alinhadas aleatoriamente,
2.4 – Configuração de uma placa de material compósito laminado.
2.5 – Tipos de carregamento em juntas coladas,
2.6 – Tipos de falha em juntas coladas,
2.7 – Modos de fratura de juntas coladas,
3.1 – Dimensões do corpo de corpo de prova,
3.2 – Representação dos ensaios de propagação de fissura,
3.3 – Realização de ensaio MMF,
3.4 – Curvas obtidas nos ensaios MMF,
4.1 – Malha para simular MMF,
4.2 – Ensaio MMF,
4.3 – Relação de rigidez da estrutura com a fissura inicial,
4.4 – Esquema de curva de propagação a Gc constante,
4.5 – Exemplo de curvas de propagação a Gc constante,
4.6 – Simulação da plasticidade e fissuras iniciais de 2 a 5 mm,
4.7 – Simulação com fissuras iniciais de 2, 15 e 27 mm,
4.8 – Simulação com fissuras iniciais de 15 e 35 mm,
4.9 – Simulação com fissuras iniciais de 15 e 50 mm,
4.10 – Simulação com fissuras iniciais entre 15 e 50 mm,
4.11- Simulação com fissuras iniciais de 20 mm,
4.12 –Esquema representativo da Energia Gc (1).
4.13- Esquema representativo da Energia Gc. (2).

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 - Propriedade dos materiais – Módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, Limite de Escoamento.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AG1-Curva de propagação da fissura para um determinado valor de fissura,

AG2-Curva de Propagação da fissura para um determinado valor de fissura “L+0.04”,

CAST 3M- Programa desenvolvedor de Elementos Finitos,

CFRP – Carbon Fiber Reinforced Plastic (Fibra de Carbono de Plástico Reforçado),

DCB – Double Cantilever Beam,

ENF – End Notched Flexura,

FLE- Flecha,

FS- Força-Deslocamento,

Gc- Energia Crítica de Propagação da Fissura,

MMF- Mixed Mean Flow,

P- Valores de Força,

PEEK – poliimidas,

PPS – polisulfureto de fenileno,

Rg- Rigidez Global da Estrutura,

U-Valores de deslocamento.

SUMÁRIO

Capítulo 1 13

1.1 Introdução 13
1.2 Objetivo 14
1.3 Descritivo de cada Capítulo 14

Capítulo 2 15

2.1 Revisão Teórica 15
2.2 Materiais Compósitos 15
2.2.1 Matrizes 16
2.2.2 Reforços 18
2.2.3 Processamento 21
2.3 Adesão e Adesivos 22
2.3.1 Teoria da Adesão 23
2.3.2 Carregamento em Juntas Adesivas 25
2.3.3 Falhas em Juntas Adesivas 27

Capítulo 3 30

3.1 Procedimento Experimental 30
3.2 Materiais Utilizados 30
3.3 Métodos Experimentais 31
3.4 Resultados 33

Capitulo 4 34

4.1 Modelagem numérica 34
4.2 Propriedades elásticas dos materiais 35
4.3 Energia crítica de propagação de fissura (Gc) em regime elástico 36
4.4 Comportamento elasto-plástico do metal 39
4.5 Energia crítica de propagação de fissura (Gc) em regime elasto-plástico 45

Conclusões 49

Perspectivas 50

Referências Bibliográficas 51

Capítulo 1

1.1 Introdução

A tecnologia dos compósitos surgiu a partir da exigência de materiais com combinações de propriedades e facilidade de processamento que não podem ser atendidas pelos materiais pré-existentes, nomeadamente metais, cerâmicos e polímeros. Um material compósito, neste contexto, é um material multifásico, feito artificialmente, que exibe uma proporção significativa das propriedades das fases que o constituem. Essas fases devem ser quimicamente diferentes e estar separadas por uma interface distinta [1].

O uso de adesivos estruturais tem se intensificado na indústria dos compósitos uma vez que este se mostra a forma mais eficiente de fixação mecânica se comparado aos métodos de ligação tais como parafusos ou rebites. Entre as principais vantagens estão a distribuição mais uniforme das tensões ao longo da área total da união, permitindo além de uma distribuição mais uniforma de cargas estáticas e dinâmicas, a redução nos custos de produção e manutenção. Permite a ligação de materiais de composições diferentes e com coeficientes de expansão distintos devido a flexibilidade do adesivo, garante ainda maior amortecimento de vibrações e em muitos casos maior produtividade nos processos de montagem.

Os compósitos estão sendo empregados nas indústrias aeronáutica, naval, construção civil e artigos esportivos. Trabalhos têm sido desenvolvidos em reparos com materiais compósitos de matriz polimérica e fibra de carbono, que são desenvolvidos no reparo de dutos e em estruturas com defeitos [2,5,9,12]. As informações sobre o comportamento de fratura destes materiais são de grande interesse para o projeto dos mesmos.

Através das simulações do comportamento das com dois valores de fissura, obtiveram-se curvas e, implementando-se corpos de prova diferenciados e materiais diferenciados, verificaremos a concordância entre curvas de ensaio e teste, de modo a obtermos a desenvolvermos a energia crítica de propagação de fissura, conforme literatura.

1.2 Objetivo

O objetivo nesse trabalho é analisar a fratura de juntas coladas entre o compósito e o aço. Serão apresentados ensaios de propagação de fissura em modo misto, que é o modo de falha mais comum em aplicações reais.

Os corpos de prova fabricados consistem na ligação adesiva entre o CFRP e aço carbono. Duas camadas de tecido de fibras de carbono em forma de tecido foram utilizadas para confecção do compósito.

São descritos os parâmetros do ensaio adequados para propagação da trinca, no regime linear elástico. Em seguida, os parâmetros definidos para energia crítica, serão usados para análise de fratura da junta.

1.3 Descritivo de cada Capítulo

A seguir, no Capítulo 2, é feito uma síntese a partir da teoria disponível na literatura sobre materiais compósitos. Na primeira seção do capítulo é abordada a composição física deste tipo de material, com ênfase nos laminados. Em seguida, são descritos os métodos de processamento do material.

Na seção seguinte, ainda no Capítulo 2, são apresentados os conceitos básicos sobre ligações adesivas. A Teoria da Adesão, base para compreensão dos fenômenos que envolvem o processo de colagem, é abordada. Em seguida, são descritas as tensões atuantes na junta e, por fim, os modos de falha presentes.

No Capítulo 3 são descritos os materiais utilizados no estudo e os procedimentos experimentais de análise. Primeiro, são especificados os corpos de prova usados e sua fabricação. Em seguida, é mostrado o processo experimental utilizado. Por fim, são apresentados os resultados dos ensaios.

O Capítulo 4 apresenta a modelagem numérica e as respectivas energias críticas de fissura nos regimes elástico e elasto-plástico do material.

Capítulo 2

2.1 Revisão Teórica

No presente capítulo, são apresentadas de forma sucinta conhecimentos teóricos relevantes a este trabalho sobre colagem estrutural e materiais compósitos. Primeiro, é apresentada uma revisão sobre materiais compósitos, com foco nos compósitos laminados, material utilizado em aplicações estruturais e objeto de estudo neste trabalho. Em seguida, são introduzidos conceitos sobre adesão e adesivos, e a ligação entre materiais mecânicos, nas aplicações com compósitos.

2.2 Materiais Compósitos

A combinação química e estrutural de diferentes materiais produziu uma nova classe de produtos de engenharia: os materiais compósitos. O sucesso de compósitos nas diversas aplicações depende da facilidade de acesso e aplicação das técnicas de fabricação exigidas por cada setor industrial. Cada vez mais, a fabricação de compósitos constitui um procedimento que pretende atingir valores ótimos de parâmetros como a forma, massa, força, durabilidade, rigidez, custos, etc. Assim, o crescente desenvolvimento de novas tecnologias de fabricação de compósitos é acompanhado pela alteração e melhoramento destes mesmos parâmetros.

Os materiais compósitos apresentam vantagens como elevada rigidez, elevada resistência à corrosão, condutividade térmica, boa fluidez, estabilidade estrutural, fácil moldagem, baixo peso e alta resistência. E desvantagem como limitações às altas temperaturas e alto custo.

As propriedades dos compósitos dependem da natureza dos materiais usados e seu grau de ligação. A classificação dos compósitos depende do material que forma a matriz que é a fase contínua, que envolve a outra fase, chamada reforço ou fase dispersa. As propriedades dos compósitos dependem de propriedades físicas e de fatores inerentes às fases constituintes, como as suas quantidades relativas e a geometria da fase dispersa.

2.2.1 Matrizes

A fase matriz pode ser um metal, um polímero ou um cerâmico (Figura 2.1), que confere estrutura ao material compósito preenchendo os espaços vazios que ficam no reforço e mantendo-o na sua posição.

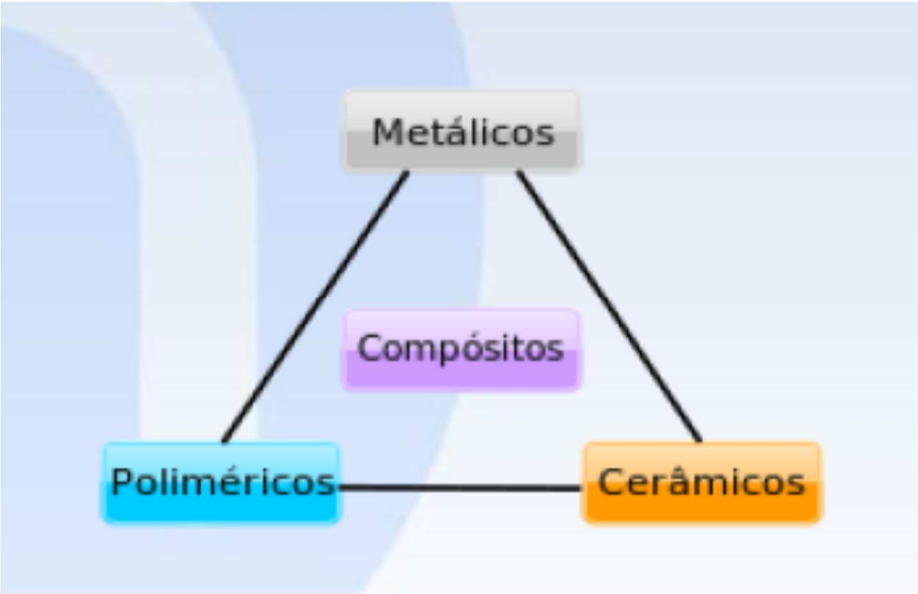


Figura 2.1: Formação de materiais compósitos [11].

As matrizes de natureza polimérica dividem-se em duas categorias principais, as termoplásticas e as termoendurecíveis. As matrizes termoplásticas são constituídas maioritariamente pelos designados plásticos técnicos. Estes plásticos são formados a partir de macromoléculas individuais lineares sem qualquer reticulação entre si. Estas moléculas de grandes dimensões são mantidas nas suas posições à custa de ligações secundárias (forças intermoleculares), tais como forças de van Der Waals e ligações de hidrogênio. Quando aquecidos os polímeros termoplásticos, estas ligações são temporariamente quebradas e passa a existir mobilidade molecular que permite a reconformação, e com o resfriamento, reestabelecem as ligações atômicas. Para matrizes termoplásticas, em aplicações não estruturais e semiestruturais, os polímeros que podemos encontrar mais frequentemente como matriz são polipropilenos, poliamidas e policarbonatos. Nos compósitos avançados de alta resistência, usam-se o PEEK, poliimidas e o PPS (polisulfureto de fenileno).

As matrizes termoendurecíveis são constituídas por moléculas que formam estruturas tridimensionais bastante rígidas. Ao contrário dos termoplásticos, assumem uma forma permanente após o aquecimento. Ao contrário dos termoplásticos, assumem uma forma permanente após o aquecimento e são processados a partir da mistura adequada de resina, acelerador e catalisador, ocorrendo a polimerização e a constituição de estrutura tridimensional num processo chamado cura. As resinas mais utilizadas, em aplicações estruturais são os epóxidos, as bismaleimidas e as poliimidas.

No aquecimento ou arrefecimento de um polímero, são observáveis várias fases a que estão associadas temperaturas de transição, que marca a mudança de um comportamento rígido para um comportamento caracterizado pelo amolecimento. Acima desta temperatura de transição vítrea, o módulo reduz-se, consideravelmente, e os polímeros são dúcteis e facilmente deformáveis. Continuando a aumentar a temperatura, atinge-se o estado viscoso, atinge-se o estado de líquido viscoso. Quando se aproxima da temperatura de fusão, a sua estrutura sofre um colapso catastrófico, passando-se a um estado de líquido viscoso, com o consequente aumento brusco do seu volume específico.[6, 8]

Nos polímeros termoendurecíveis não apresentam fusão. A temperaturas elevadas, degradam-se deforma irreversível. A sua temperatura de transição vítrea é controlada pelo grau de reticulação da estrutura e, normalmente, as alterações são muito menos acentuadas que nos termoplásticos. A medição da temperatura de transição vítrea em polímeros é realizada, recorrendo a métodos como a calorimetria diferencial de varredura ou análise térmica diferencial [6, 8].

Os efeitos da transição vítrea e da fusão no comportamento mecânico dos polímeros são facilmente perceptíveis pela análise da evolução do módulo da elasticidade, E, com a temperatura. Um termoplástico amorfo apresenta uma considerável alteração das propriedades mecânicas, para a temperatura de transição vítrea. Assim, a temperatura máxima de utilização de um termoplástico amorfo deve ser inferior a temperatura de transição. Um polímero termoendurecível sofre alterações muito menos pronunciadas a essa temperatura, devido ao elevado grau de reticulação. Contudo, a temperatura máxima de utilização não deve exceder a temperatura de transição, para evitar fenômenos de fluência e relaxação acentuados. Os polímeros semicristalinos apresentam igualmente pequenas variações de propriedades à temperatura de transição vítrea, devido à presença

das regiões cristalinas da matriz. Neste caso, é corrente a utilização de temperaturas, compreendidas entre temperatura de transição e temperatura de fusão, pois abaixo da temperatura de transição, os polímeros semicristalinos são geralmente demasiado frágeis.[6, 8]

2.2.2 Reforços

A fase dispersa ou reforço existe em diversas formas sendo a classificação mais geral feita em três categorias: compósitos particulados, compósitos de fibras descontínuas (*whiskers*) e compósitos de fibras contínuas. No geral, os constituintes do reforço dos compósitos proporcionam força e rigidez, mas também aumentam a resistência ao calor, corrosão e condutividade [6]. Com relação ao tipo de reforço, a classificação desses materiais é dividida em compósitos reforçados com partículas (partículas grandes e reforçados por dispersão), compósitos reforçados com fibras, como mostra a Figura 2.2.

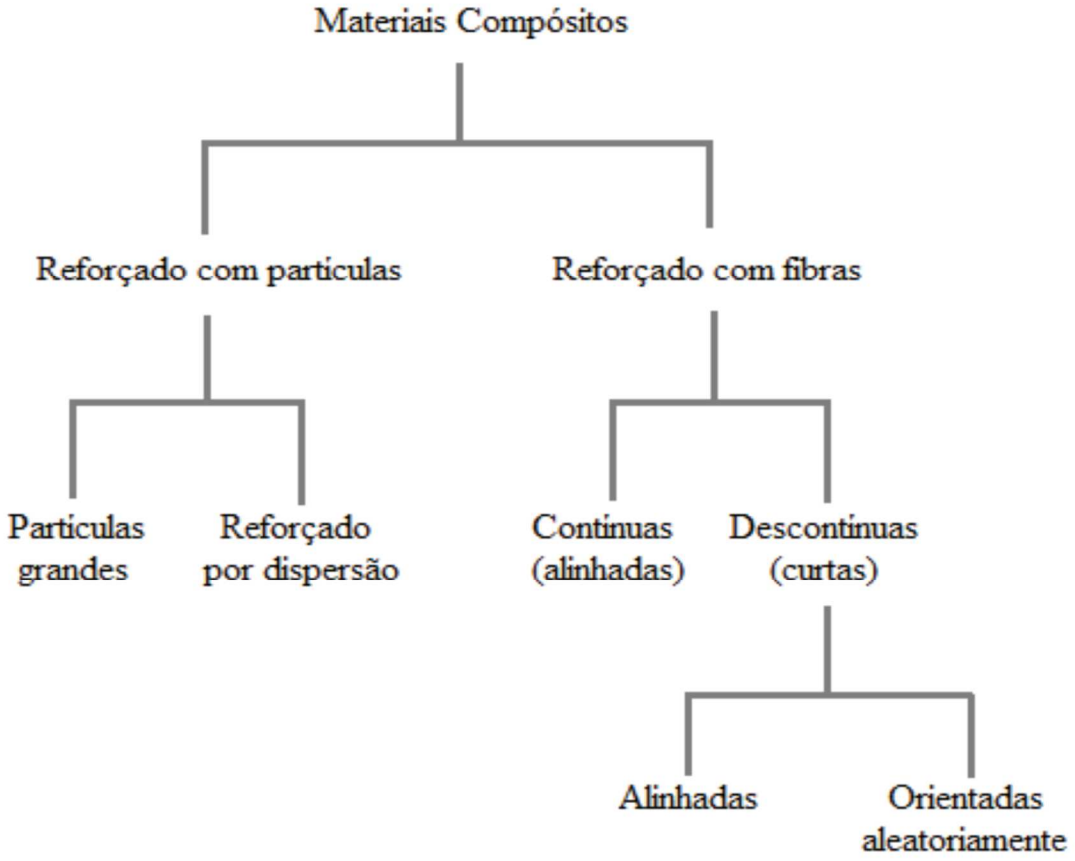


Figura 2.2: Classificação dos compósitos quanto ao reforço [7].

Os compósitos reforçados com partículas grandes e os compósitos reforçados por dispersão distinguem-se pelo aumento de resistência, ou seja, pela fase particulada mais dura e rígida que a fase matriz. No primeiro, as partículas são grandes o suficiente para que não possam ser tratadas a nível atômico, e no segundo as partículas são muito pequenas, tal que as interações ocorrem a nível molecular. Um exemplo comum de compósito reforçado com partículas grandes é o concreto, o que apresenta areia e brita dispersas no cimento (fase matriz) [7]

Os compósitos reforçados com fibras são muito importantes para aplicações em estruturas mecânicas, pois possuem alta resistência e alta resistência, em relação ao peso. Esses materiais são classificados, de acordo com os comprimentos das fibras. As propriedades mecânicas do compósito reforçado com fibras não dependem apenas das propriedades das fibras, mas também da transmissão da carga aplicada da matriz para as fibras, o que demanda que as fibras sejam suficientemente grandes e, por isso fibras curtas não produzem uma melhoria significativa na resistência do material. A orientação das fibras também influencia nas propriedades mecânicas do compósito, podendo estas serem alinhadas ou orientadas aleatoriamente (Figura 2.3).

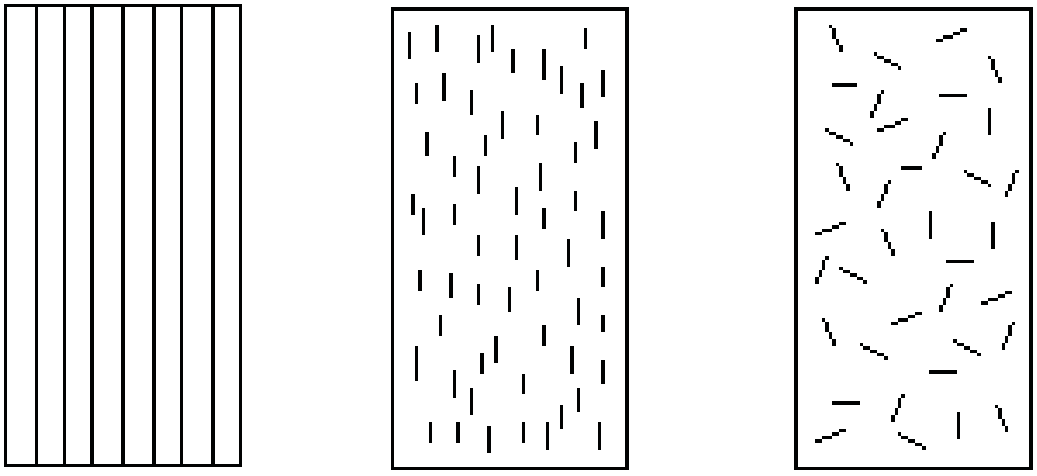


Figura 2.3: Representação de compósitos reforçados com fibras (a) contínuas e alinhadas, (b) descontínuas e alinhadas e (c) descontínuas e orientadas aleatoriamente [7].

As fibras de vidro constituem o tipo de reforço mais utilizados. A técnica mais comum para produzir fibras de vidro é o estiramento de vidro fundido através de uma fieira em liga de platina-ródio com orifícios de dimensões muito precisas. A temperatura de fusão depende da composição do vidro. As fibras de vidro são sujeitas a tratamentos superficiais a saída da fieira, que variam consoante o fim a que se destinam: um revestimento têxtil para a fabricação de tecidos, sem risco de danificação da fibra e um revestimento plástico para permitir a compatibilização da fibra com as diferentes matrizes orgânicas existentes[7].

Existem dois tipos de fibras agrupáveis: as fibras de carbono propriamente ditas, com percentagens de carbono entre 80 e 95%, e as fibras de grafite, onde a porcentagem de carbono chega aos 99%. Estas são aplicadas em compósitos de elevado desempenho mecânico, em áreas como a aeronáutica e a indústria espacial[7].

As fibras aramídicas são produzidas, a partir de poliamidas aromáticas. A solução de polímero é mantida a baixa temperatura (entre -50C e -80C), sendo depois extrudida a uma temperatura de aproximadamente 200 C. Por este método, a cadeia molecular é alinhada, conseguindo-se obter uma melhoria das propriedades mecânicas. As fibras aramídicas foram comercializadas pela primeira vez pela Dupont, em 1972, e posteriormente quer a Enke, quer a Teijin desenvolveram fibras similares. Atualmente, existem dois tipos de produtos: as fibras standard tipo Kevlar 29 e as fibras de elevado módulo, tipo Kevlar 49. Outros tipos de reforços são boro, amianto, sisal, poliamidas, poliésteres [7].

Formas típicas dos reforços são roving (cordão de filamentos contínuos, enrolados helicoidalmente em bobinas), mantas (as fibras são distribuídas aleatoriamente e agregadas com um ligante especial em emulsão ou em pó, que confere estabilidade e deve ser solúvel na impregnação), tecidos (2D ou 3D) e define-se como a confecção de uma ligação entre feixes de fibras longas de carbono, aramida, vidro ou combinação destas, para aplicações em que se exigem elevadas propriedades mecânicas, tecidos entrelaçados, tecidos quase unidirecionais e tecidos híbridos, malhas, tecidos 3D, tecidos entrançados, pré-formas [7].

2.2.3 Processamento

As técnicas de fabricação propiciam reduções substanciais do número de peças a integrar um determinado conjunto, diminuindo os custos de mão-de-obra, associados à montagem. O desenvolvimento tecnológico dos últimos anos tem permitido acentuar o grau de automatização e tornar os diferentes processos de fabricação mais competitivos. Outra consideração a ser feita é a natureza da matriz. Para as matrizes termorrígidas, os ciclos térmicos (aquecimento e arrefecimento) são a base para iniciar e controlar o processo de cura, para permitir o preenchimento do molde e definição da peça. A elevada fluidez inicial, favorece a utilização em pressões baixas. Ao invés, com matrizes termoplásticas, o aquecimento inicial provoca o necessário amolecimento e fusão, sendo combinado com a aplicação de pressões elevadas[7].

Na maioria das aplicações estruturais utilizam-se laminados multidirecionais. Estes laminados são constituídos por camadas com diferentes orientações dispostas em sequencias diversas, de forma que estas orientações e sequências de empilhamento das camadas constituem variáveis adicionais ao projeto, e conferem a estes materiais uma enorme flexibilidade quanto à aplicação [6]. A Figura 2.4 mostra a configuração de uma placa de compósito laminado.[7].

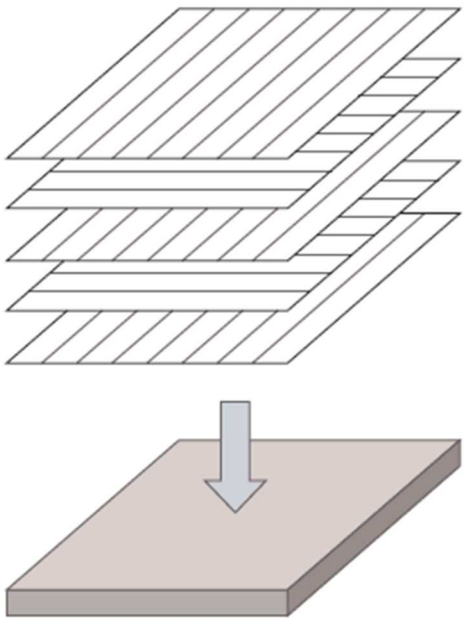


Figura 2.4: Configuração de uma placa de material compósito laminado [1].

O método mais econômico de fabricação é a moldação por contato, sobretudo para compósitos de fibra de vidro. O processo pode ou não ser automatizado, levando-se em conta a distinção entre dois métodos: a moldação manual e a moldação por projeção.

No processo de moldação, que é utilizado na produção de laminados, começa-se cortando e empilhando o pré-impregnado sobre o molde, até se atingir a espessura desejada. O conjunto é inserido num saco de vácuo e sujeito a um ciclo de pressão temperatura previamente definido.

O laminado está inserido entre duas películas de teflon poroso, que permite o escoamento de excesso de resina, ao mesmo tempo que facilitam a desmoldagem. O excesso de resina é retido no tecido absorvente, colocado imediatamente antes das placas de moldação. Finalmente, o tecido homogeinizador para promover a uniformização do vácuo a toda a placa. Todo esse conjunto está coberto por uma película de Nylon, designada por saco de vácuo, cuja vedação é garantida por fibras de silicone. Todo o conjunto é colocado no interior da autoclave, que permite a produção de peças de grandes dimensões, a geometria complexa com excelentes propriedades mecânicas, devido a elevada fração volumétrica de reforço (mais de 60%) [7]

2.3 Adesão e Adesivos

As principais vantagens aplicadas às ligações adesivas estruturais são: a distribuição mais uniforme das tensões, ao longo da área ligada, o que permite uma maior rigidez e transmissão de carga, possibilitando assim uma redução de peso, ou seja, um menor custo; amortecimento de vibrações, que permite que as tensões sejam parcialmente absorvidas, melhorando assim a resistência a fadiga dos próprios componentes ligados; ligações de chapas eficientemente, o que pode constituir uma aplicação importante dos adesivos para ligar materiais metálicos ou não. É geralmente o método mais eficiente e efetivo de ligar dois materiais, uma vez que pode ser automatizado. A mistura e a aplicação do adesivo podem ser realizadas por um robô. Tornam o projeto mais flexível, permitindo o uso de novos conceitos e materiais. Um bom exemplo são as estruturas em ninho de abelha, onde o núcleo é colado a duas peles de metal ou compósito, resultando numa excelente rigidez específica. Permitem ter estruturas com contornos regulares, porque evitam furos (rebites, parafusos) e marcas, devida a solda. Criam um contato

contínuo entre as superfícies ligadas. Podem reduzir os custos, uma vez que os projetos, envolvendo ligações tendem a ser mais ligeiros e econômicos [8].

As principais desvantagens inerentes a ligação com adesivos são: a necessidade de um projeto da ligação, que elimine ao máximo as forças de arrancamento (principal inimigo das ligações adesivas), clivagem e impacto. Quando um dos dois materiais não é rígido, a ligação pode estar sujeita a forças de arrancamento e quando os dois materiais são rígidos, a ligação pode estar sujeita a forças de clivagem. É importante usar geometrias que evitem tensões localizadas e que garantam uma distribuição uniforme de tensões. Se as tensões não estiverem perfeitamente perpendiculares ao adesivo, podem surgir forças de arrancamento ou clivagem. A melhor solução é conceber uma ligação em que o adesivo esteja sujeito a tensões de corte. Neste caso, as tensões são paralelas à ligação adesiva e estão melhor distribuídas. Apresentam limitada resistência a condições extremas, tais como o calor e a umidade devido à natureza polimérica do adesivo. A ligação não é normalmente realizada, o que leva à utilização de ferramentas de fixação, para manter as peças em posição. Isto pode ser uma grande desvantagem econômica. Para obter bons resultados, é necessária uma cuidadosa preparação das superfícies através de, por exemplo, abrasão mecânica, desengorduramento com solvente, ataques químicos, primários etc [8].

Os adesivos são frequentemente curados a elevadas temperaturas (forno, prensa etc). O controle de qualidade e segurança são mais difíceis, embora tenham sido desenvolvidas recentes técnicas não destrutivas adequadas. Um dos grandes problemas da utilização mais frequente de adesivos estruturais é o fato de não haver critério de dimensionamento universal, que permita projetar qualquer estrutura. Existem muitos que funcionam bem apenas em determinadas situações.

2.3.1 Teoria da Adesão

A rugosidade de superfícies reais é variável, dependendo do modo como foram preparadas, é expressa pela rugosidade média Ra, que é a média aritmética das ordenadas. A única forma de um material aproximar-se de uma superfície rugosa é por meio de um líquido, podendo fluir e estabelecer um contato íntimo. A ligação entre um objeto e um

adesivo é a soma de um conjunto de forças mecânicas, físicas e químicas que se sobrepõem e se influenciam.

Distingue-se o encravamento mecânico causado nos poros e irregularidades das superfícies, às forças eletrostáticas relativas às diferenças de eletronegatividades dos substratos a ligar, e outros mecanismos de adesão, incluindo as forças intermoleculares e químicas, que ocorrem na interface de sistemas heterogêneos.

A teoria mecânica da adesão é a mais antiga, segunda a qual uma boa adesão ocorre, quando o adesivo penetra nos poros, cavidades, fendas e outras irregularidades da superfície do substrato. O adesivo deve molhar convenientemente o substrato e também ter as propriedades reológicas adequadas para penetrar nos poros e aberturas, num tempo razoável. Por exemplo, quando se cola couro, é importante tornar mais rugosa a superfície, para levantar as fibras do couro e para o adesivo as contornar e as envolver.

Pela teoria da adsorção, que depende da utilização das forças da superfície, desde que as moléculas do adesivo e substrato possam ser trazidas suficientemente próximas, haverá a adsorção física. A adsorção física contribui para a resistência de todas as juntas adesivas estruturais e é o mecanismo de adesão mais importante.

A teoria da difusão é aplicável e válida para adesão de materiais poliméricos e a solda por solvente ou calor. A extremidade de uma cadeia de uma molécula de uma superfície difunde na estrutura de uma segunda superfície, formando uma ponte ou ligação através da interface. Quando se trata de adesão de um material com ele próprio, designa-se por auto-adesão. No caso de polímeros diferentes, o fenômeno é denominado por heteroadesão.

A teoria eletrostática supõe que o adesivo e aderente são considerados como duas placas de um condensador e o trabalho de separação é o necessário, para separar as duas placas carregadas do condensador. A força é atribuída à transferência de elétrons, através da interface, criando cargas negativa e positivas, que se atraem. Quando o polímero é posto em contato com um metal, há transferência de elétrons, criando uma dupla camada elétrica.

A primeira causa de menor resistência de uma ligação é a existência de uma camada fraca. As superfícies de materiais reais são certamente diferentes das suas regiões internas e formam camadas fracas, devido a: inclusão do ar, em vazios ou bolhas na região ligada; formação de filmes de óxidos, que são eles próprios fracos ou mal ligados ao

material maciço subjacente (caso do cobre e suas ligas); concentração na superfície de constituintes, em pequenas proporções, tais como, plastificantes (migram facilmente à superfície), antioxidantes, diluentes etc. Estes constituintes são frequentemente ou líquidos ou sólidos muito macios.

A segunda causa de menor resistência está relacionada com a concentração de tensões numa junta que promove uma distribuição de tensões confinada numa área muito menor que aquela que se esperaria, a partir da área de contato, para uma junta de sobreposição simples. Neste tipo de juntas, verifica-se que a partir de um determinado comprimento de sobreposição, o aumento não se repercute na resistência da junta.

Uma terceira causa é que, em todos os materiais, a existência de irregularidades de superfície provoca pontos de iniciação para a propagação de fendas. Isto está de acordo com as teorias clássicas de Griffith para metais e materiais frágeis, e de Irwin para materiais tenazes.[8]

2.3.2 Carregamento em Juntas Adesivas

O carregamento aplicado é não uniforme, com picos de tensões acima da média. Há quatro modos fundamentais de carregamento em uma junta colada, tração, cisalhamento (corte), arrancamento e clivagem, como mostra a Figura 2.5. Combinações ou variações desses modos podem existir.

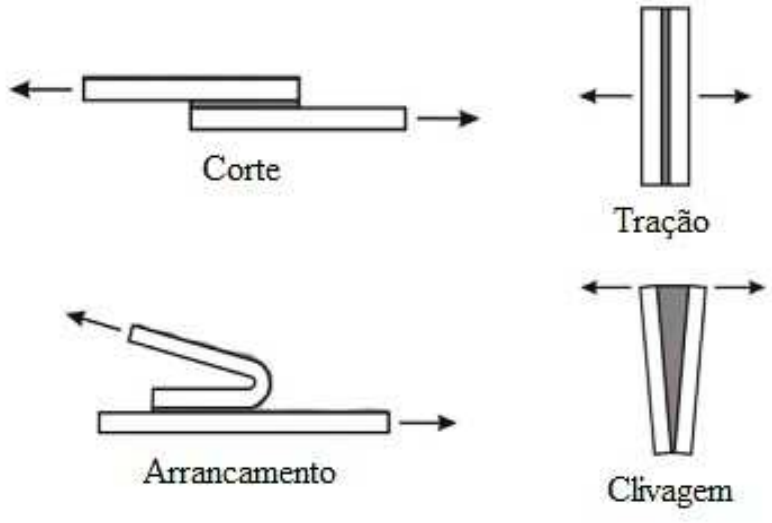


Figura 2.5: Tipos de carregamento em juntas coladas [7].

As tensões de tração são aplicadas, perpendiculares a superfície de junta, distribuídas uniformemente, ao longo da área colada, sendo que as superfícies dos substratos devem ser paralelas e as forças normais. As tensões indesejáveis de clivagem e arrancamento se originam devido a pequenas variações na espessura do adesivo, deformação dos substratos ou presença de forças não axiais.

As tensões de cisalhamento aparecem quando forças atuantes no plano do adesivo tendem a separar os substratos. As juntas de sobreposição simples (*single lap joints*) representam o tipo mais comum. Neste tipo de junta, a maior parte da tensão está localizada próxima às extremidades da sobreposição, enquanto a região central pouco contribui para a resistência.

A tensão de arrancamento age de modo semelhante, quando um dos substratos é flexível, sendo que o ângulo de separação é maior no arrancamento e as juntas adesivas são menos resistentes que nos casos de tração ou cisalhamento, pois o carregamento está concentrado numa extremidade da junta, enquanto o outro lado tem uma contribuição pequena para a resistência da junta. Os adesivos mais dúcteis mais adequados ao arrancamento, pois reduzem concentração de tensões e têm maior resistência.

Os métodos para se determinar as tensões em juntas de sobreposição foram desenvolvidos ao longo de várias décadas. Métodos analíticos muito simples e limitados foram inicialmente introduzidos, considerando apenas o comportamento plástico dos adesivos e substratos, além de outras limitações presentes nos métodos clássicos. À medida que essa análise foi se tornando mais completa e refinada, a solução analítica se

tornou inviável, substituída por métodos numéricos. A escolha do modelo a ser utilizado numa análise deve ser baseada no nível de precisão exigido e na facilidade de se obter a solução.[8]

2.3.3 Falhas em Juntas Adesivas

A finalidade de uma ligação eficiente é a transmissão de carga entre os dois componentes ligados, mantendo a sua integridade estrutural sob solicitações estáticas e dinâmicas, além de condições ambientais (umidade e temperatura) adversas. Torna-se, assim, fundamental a correta avaliação da distribuição do perfil de tensões e, consequentemente, dos modos de falha induzidos nas juntas adesivas.

2.3.3.1 Modos de falhas

De um modo geral, podem-se distinguir três modos de falha diferentes em juntas coladas: coesiva no interior do adesivo, adesiva na interface entre o substrato e falha de um dos substratos (Figura 2.6).

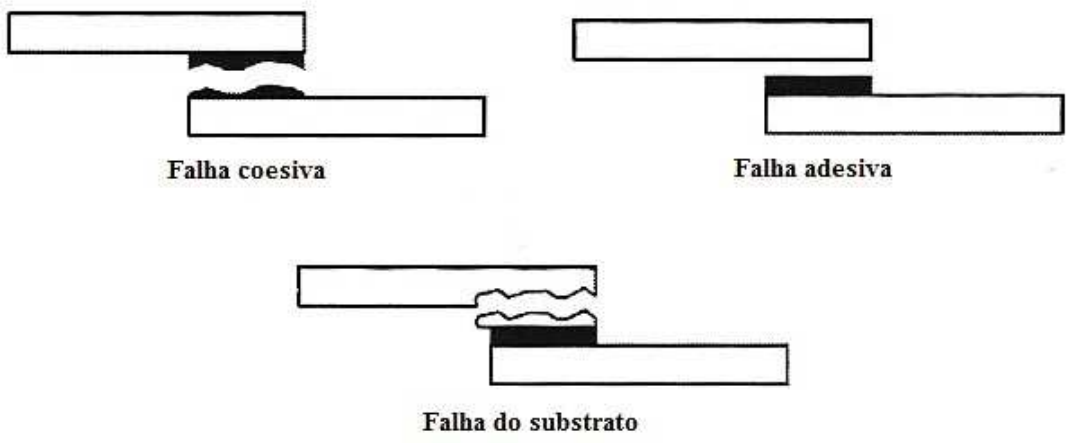


Figura 2.6: Tipos de falha em juntas coladas [7].

A falha (ruptura) coesiva ocorre quando os substratos são mais fortes que a resistência interna do próprio adesivo. É geralmente aceito que a fratura adesiva se deve a uma má preparação das superfícies. Por outro lado, assume-se que uma junta deve ser

projetada, de modo a que a falha nunca ocorra pelo adesivo. Então, uma junta projetada será onde ocorra falha do substrato.[8]

2.3.3.2 Analise das juntas

Os critérios de ruptura analisados baseiam-se na teoria de resistência de materiais, cujo um dos princípios básicos é considerar que o material está isento de defeitos. Em contrapartida, na Mecânica da Fratura assume-se que a estrutura não é necessariamente um meio contínuo, podendo conter defeitos causados pelo próprio processo de fabricação ou por qualquer acidente durante o seu funcionamento. O objetivo é saber se os defeitos existentes serão suscetíveis de causar a ruptura catastrófica, ou se, durante o período de vida da estrutura, as suas dimensões se mantém inferiores às críticas, embora possam se propagar de forma estável. Assim, em vez de uma análise local ao valor do pico das tensões, que é teoricamente infinito na extremidade da fenda, a Mecânica da Fratura avalia se as condições na estrutura são suscetíveis de induzir a ruptura.[8]

2.3.4 Tipos de defeitos

Uma junta adesiva pode apresentar três tipos básicos de defeitos. O primeiro se trata da fraca adesão entre o adesivo e o substrato, e resultam de uma má preparação da superfície ou pela presença de contaminantes no substrato. O segundo defeito é a fraca resistência coesiva, resultante de um erro na formulação, mistura ou cura do adesivo. O outro tipo de defeito possível são os vazios, decoesões e porosidades. Esses são os mais facilmente detectáveis e apresentam diversas causas, entre elas estão a presença de bolhas de ar, liberação de voláteis ou contração térmica do adesivo.[8]

2.3.5 Tipos de falhas

Uma trinca pode falhar de três modos distintos. O modo I representa o modo de abertura e os modos II e III são os modos de corte. No modo II, as superfícies da fenda

têm movimento relativo perpendicular à frente da fenda. A Figura 2.7 mostra os três modos de fratura recorrentes em juntas coladas.

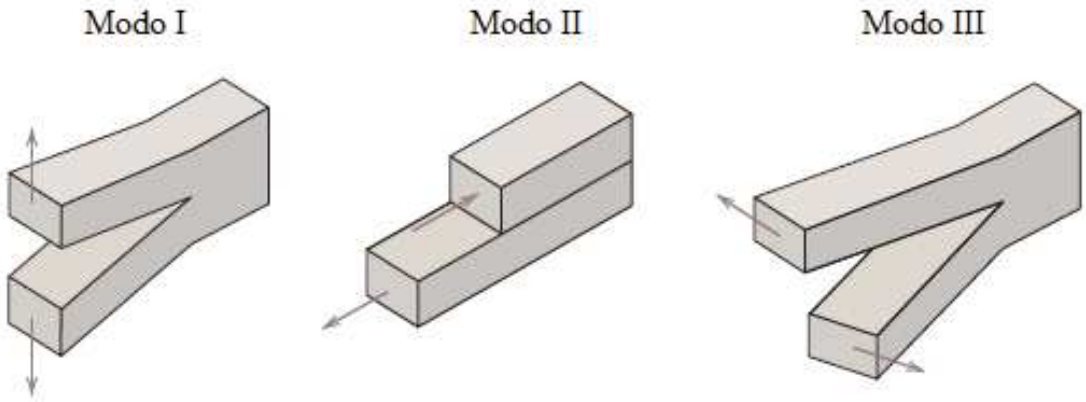


Figura 2.7: Modos de fratura de juntas coladas [7].

No caso de juntas coladas, a direção de propagação de um defeito está restringida pelos substratos, ou seja, a fratura sempre se propaga ao longo da junta. Nestas circunstâncias, uma propagação de modo misto (I e II), combinados é a mais esperada.[8]

Capítulo 3

3.1 Procedimento Experimental

Neste capítulo são abordados os procedimentos de análise usados neste trabalho. Primeiro, são mostrados em detalhe os de corpos de prova utilizados e sua confecção. Em seguida, são mostrados detalhes sobre o método experimental utilizado. Por fim, são expostos os resultados dos ensaios.

3.2 Materiais Utilizados

Os corpos de prova fabricados consistem na ligação adesiva entre o CFRP e aço carbono. Duas camadas de tecido de fibras de carbono em forma de tecido foram utilizadas para confecção do compósito. Cada camada de tecido é composta de duas camadas de fibras orientadas perpendicularmente. Uma chapa de aço carbono ASTM A36 de 3,0 mm de espessura foi usada. A colagem entre os substratos foi realizada com resina epóxi, assim como a impregnação das fibras do compósito.

A fabricação dos corpos de prova foi realizada por laminação manual, de forma que o empilhamento das camadas do compósito foi feito manualmente sobre a superfície da chapa metálica.

A colagem entre os substratos dissimilares foi realizada usando o adesivo epóxi NVT201E® (Novatec Ltd., Rio de janeiro, Brasil). Fibras de carbono em forma de tecido com massa específica de 430 g/m2 foram utilizadas para confecção do compósito. Cada camada de tecido é composta de duas camadas de fibras orientadas perpendicularmente. A resina epóxi PIPEFIX® (Novatec Ltd., Rio de janeiro, Brasil) foi usada como matriz no compósito.

A figura 3.1 as dimensões do corpo de prova usado. O comprimento do corpo de prova usado inicialmente é de 120 mm, a largura é 25 mm e a espessura 5 mm, sendo a

espessura do compósito 1,8 mm, a da placa de aço 3,0 mm e da camada de adesivo 0,2 mm.

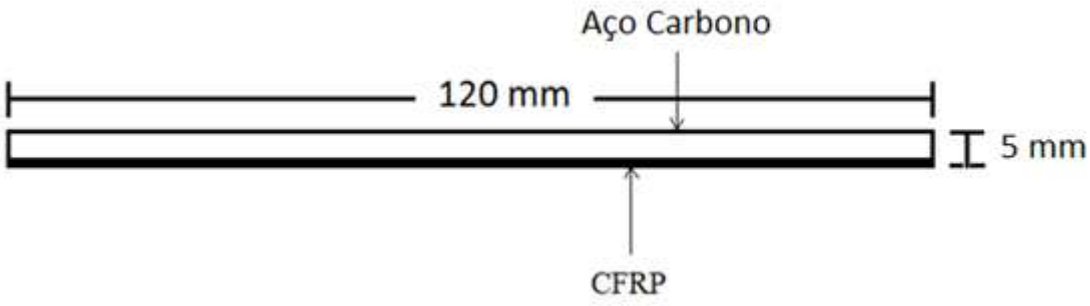


Figura 3.1 – Dimensões do corpo de prova

3.3 Métodos Experimentais

Os ensaios de propagação da fissura são usados no estudo do conjunto de comportamento de conjunto colados. Os tipos mais comuns de ensaios são aqueles nos quais duas placas coladas são submetidas à flexão para fazer uma fissura inicial se propagar. Os vários tipos de ensaios são classificados, segundo os modos de propagação da fissura, definidos pela mecânica da fratura. Os ensaios DCB (Double Cantilever Beam) e ENF (End-Notched Flexure) são respectivamente ensaios em modo I e em modo II. Há, finalmente, os ensaios que combinam os modos puros de propagação, como o MMF (Mixed Mean Flow), que é um dos mais comuns para placas coladas e foi empregado nesse trabalho. Os esquemas desses ensaios são mostrados na Figura 3.2.

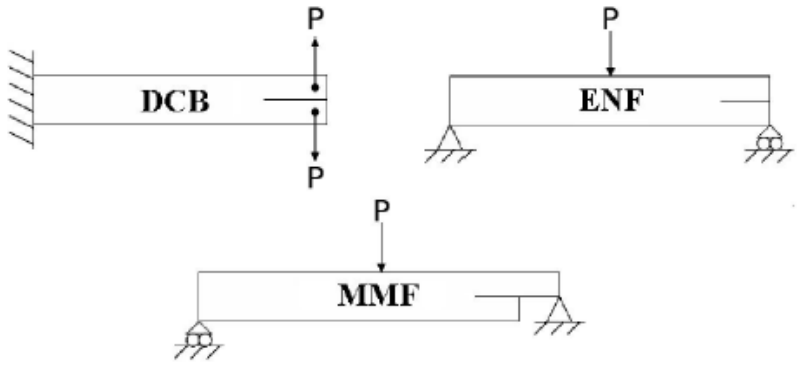


Figura 3.2: Representação dos ensaios de propagação de fissura [9].

A energia necessária para fazer a fissura avançar é um dos parâmetros básicos, para qualificar uma colagem. O comportamento de placas coladas durante um ensaio dependerá dessa energia crítica. Uma forma de prever esse comportamento, antes mesmo de realizar o ensaio é obter curvas de propagação para vários valores de energia crítica [10].

Os ensaios foram realizados com o aço em cima e o compósito embaixo. Foi utilizado uma máquina eletromecânica Instron de 10 kN. A velocidade utilizada nos testes foi de 1 mm/minuto. Nesta etapa, a distância entre os apoios (*spam*) foi alterada em cada ensaio, de modo a investigar a melhor configuração de ensaio para este tipo de corpo de prova. A Figura 3.3 mostra uma fotografia tirada durante a realização de um ensaio. A carga e o deslocamento da máquina são gravados ao longo o ensaio.

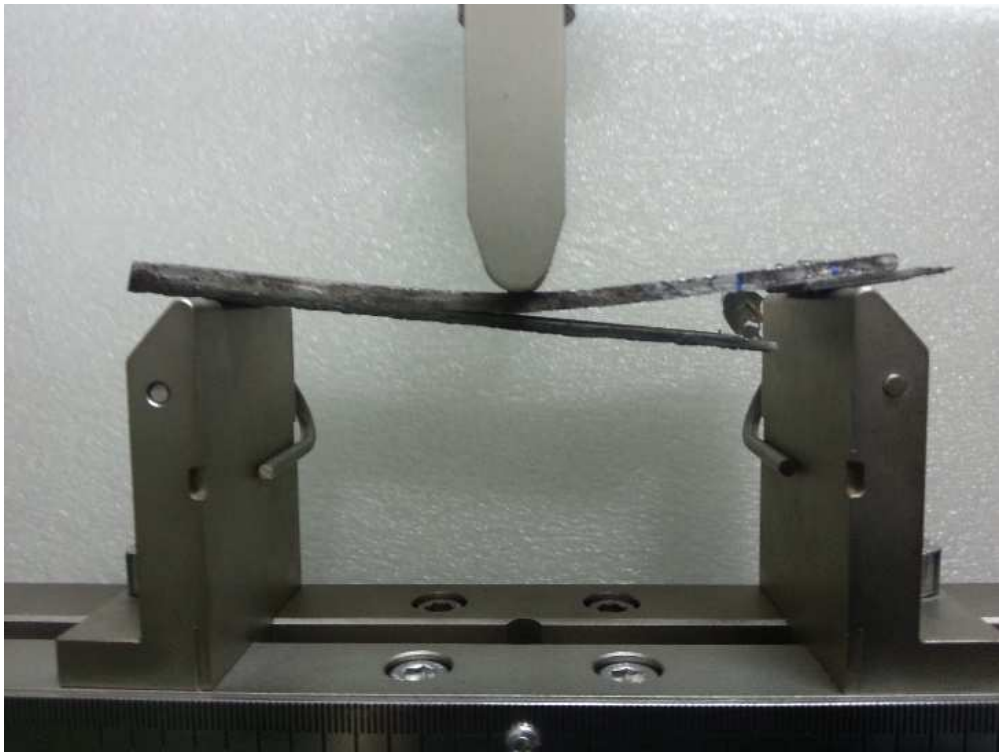


Figura 3.3: Realização do ensaio MMF.

Foram realizados 4 ensaios de fratura, utilizando uma pré-trinca de 15 mm de comprimento e o spam variando entre os valores de 100 mm a 60 mm. O conhecimento

das zonas de estabilidade permite que o ensaio seja planejado para que a propagação da fratura ocorra estavelmente, variando o comprimento da fissura inicial.

3.4 Resultados

Foram realizados 4 ensaios no corpo de prova relatado. As curvas obtidas nos ensaios MMF são mostradas na Figura 3.4. De acordo com os resultados, o ensaio com menor distância entre pontos apresentou menor deformação plástica durante a aplicação da carga. Isto pode ser visto pela curva mais linear apresentada pelo ensaio do início até o momento da fratura. Este ensaio possui spam de 60 mm. Isso mostra que esse valor de spam produz resultados mais próximos do comportamento linear elástico inicialmente desejado para análise da propagação de fissura na interface colada.

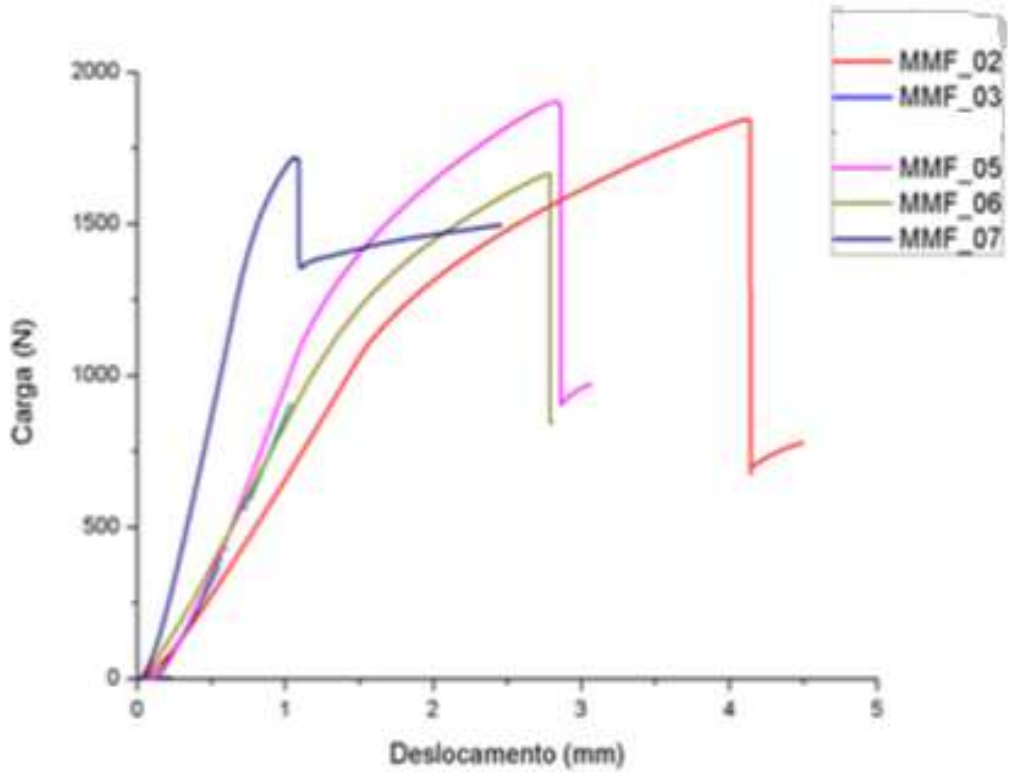


Figura 3.4 – Curvas obtidas nos ensaios MMF – Curva Azul (Spam 60mm), Curva Rosa (spam 70mm), Curva verde (spam 80mm), Curva vermelha(spam 100mm).

Capitulo 4

4.1 Modelagem numérica

Um modelo em elementos finitos foi feito no programa CAST3M, que é um programa aberto que pode ser baixado gratuitamente no site do desenvolvedor (http://www-cast3m.cea.fr/).

O modelo procurou representar os ensaios MMF, simplificando vários aspectos relativos aos materiais envolvidos, notadamente pelo fato de considerar os dois substratos como corpos perfeitamente elásticos. No que concerne o substrato de aço essa suposição é bastante usada desde que os efeitos da plasticidade não sejam alvo do estudo realizado. Porém no que diz respeito ao substrato compósito, essa suposição só se justifica pelo fato estarmos buscando a determinação da energia crítica de propagação de fissura (Gc) que é definida dentro do domínio da mecânica linear da ruptura. A rigor, o resultado do ensaio mostra claramente uma plastificação antes da ruptura, como já foi falado, contudo, esse fenômeno não é atribuído ao substrato compósito e sim ao aço. Vale ressaltar também que não foi constatada delaminação no compósito durante o ensaio, o que justifica o fato desse substrato não precisar ser modelado camada por camada, como é comum nesse tipo de material.

A figura 4.1 mostra a malha utilizada durante a simulação do ensaio MMF (malha vermelha). A configuração deformada também é apresentada na mesma figura (malha branca) e é possível ver a abertura da fissura inicial (15 mm) no lado direito da malha. Foram usados elementos quadrados de 8 nos (QUA8) para os substratos e elementos de interface elástica de 3 nos (JOI3) para representar a camada de cola que une os substratos.

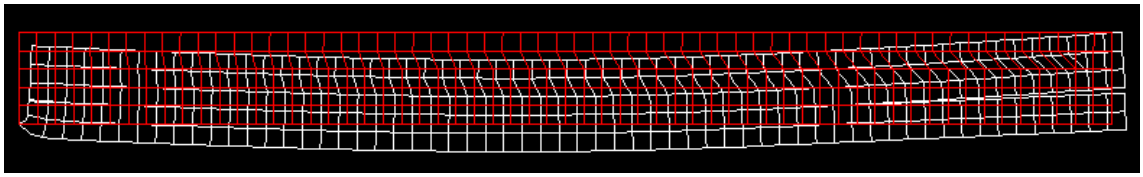


Figura 4.1: Malha para simular ensaio MMF

4.2 Propriedades elásticas dos materiais

A figura 4.2 mostra o mesmo resultado do ensaio MMF para o corpo de prova com distância entre pontos de 60 mm apresentado no capítulo anterior. Esse foi o resultado que melhor representou a propagação da fissura, mesmo apresentando uma pequena zona de plastificação antes da propagação. Dessa forma ele foi utilizado para investigar as propriedades em flexão do compósito.

Uma linha de tendência foi acrescentada na figura 4.2, considerando os pontos que constituem a parte elástica da curva. Dessa maneira foi determinada a rigidez global da estrutura (Rg). O valor retirado diretamente da equação da linha tendência foi Rg = 2.179 N/mm, com um coeficiente de determinação R^2 = 0,9994.

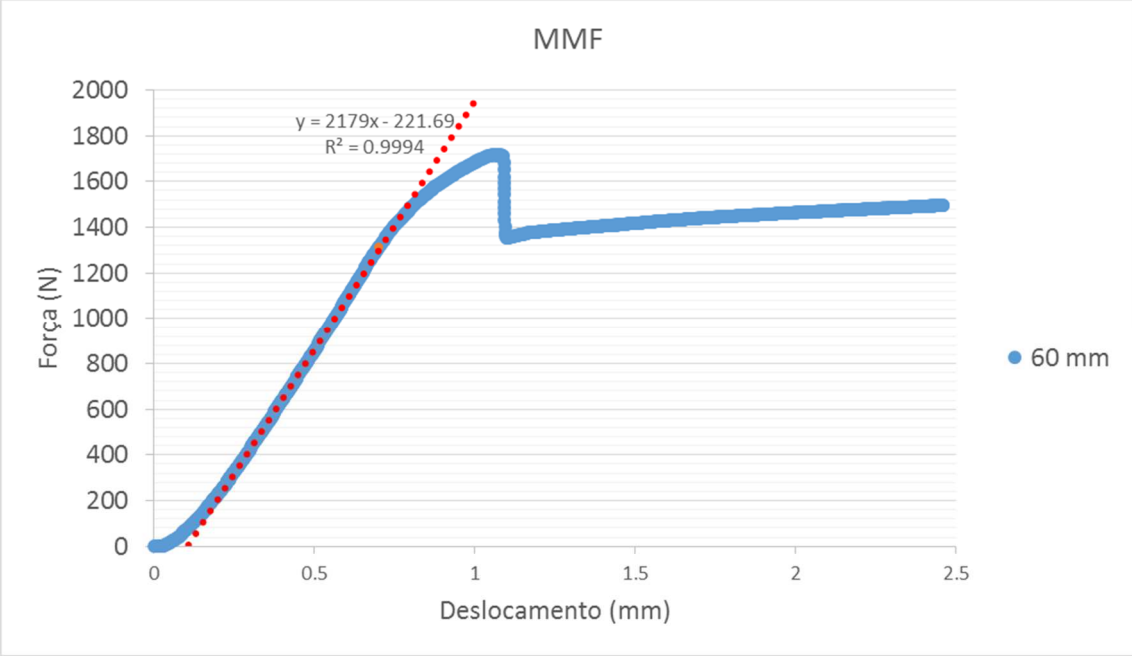


Figura 4.2: Ensaio MMF – 60 mm.

As propriedades necessárias para a simulação do comportamento elástico da estrutura metal/adesivo/compósito são o módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson dos dois substratos e a rigidez da interface. O valor usado para a rigidez da interface adesiva foi de 1000 N/mm [3], que é a constante linear do trecho reto da curva. Esse valor é baseado no trabalho de De Barros [12] que mostraram que uma rigidez acima desse valor não era possível de ser detectada em ensaios de flexão do tipo MMF. Para o

substrato de aço os valores usados foram E_a = 210 GPa e η = 0,3. Com base nesses valores e considerando o coeficiente de Poisson do compósito também igual a η = 0,3, foram feitas várias simulações onde foi variado o valor usado para o módulo de elasticidade do compósito. A ideia foi repetir as simulações até encontrar um valor para a rigidez global da estrutura obtida numericamente igual ao valor obtido no ensaio real em laboratório (Rg = 2.179 N/mm). Após algumas tentativas concluiu-se que o melhor valor para o módulo de elasticidade do compósito seria E_c = 497 MPa. É importante ressaltar que esse é um valor global e considera um material homogêneo e isotrópico, compatível com os valores da literatura. Esse valor de módulo de elasticidade pode ser considerado muito baixo, mesmo considerando que ele foi obtido usando a contribuição da fina camada de material compósito para a rigidez da estrutura.

4.3 Energia crítica de propagação de fissura (Gc) em regime elástico

O método usado nesse trabalho como tentativa de obtenção da energia crítica de propagação de fissura (Gc) foi desenvolvido por De Barros [12]. O método consiste em traçar curvas para vários valores de Gc até que seja encontrada uma curva que se ajuste ao resultado experimental obtido. Para isso são feitas simulações com um modelo elástico, como mostrado na seção anterior, repetindo as simulações para cada valor de fissura inicial (a) avançando de 1 em 1 mm e mantendo-se um valor fixo de carga aplicada. A figura 4.3 mostra esquematicamente as flechas (Y) correspondentes a cada valor de fissura inicial, para uma determinada carga aplicada (P0) [12].

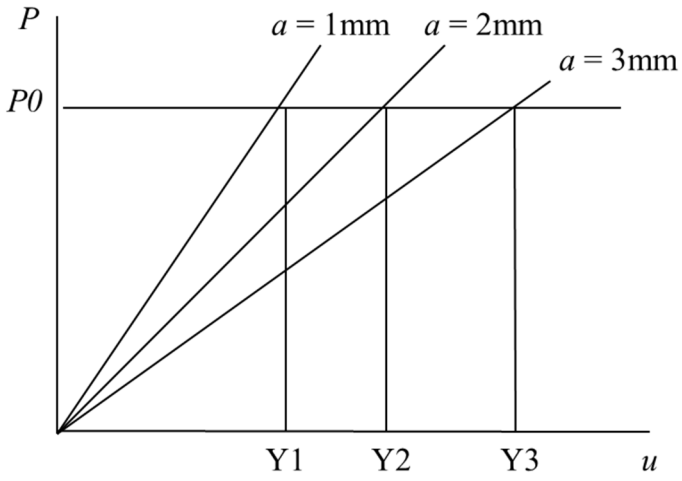


Figura 4.3: Relação de rigidez da estrutura com a fissura inicial

Dessa forma obtém-se a rigidez global da estrutura (Rg) correspondente a cada valor de fissura inicial. Essas rigidezes são então usadas para obter os valores de força (P) e deslocamento (u) correspondentes a um determinado valor de Gc responsável por fazer a fissura se propagar de um valor a outro. O conjunto de pontos força-deslocamento, com abscissa (FS) e ordenada (FLE) permite traçar uma curva de propagação para um determinado valor de Gc, conforme ilustrado na figura 4.4.

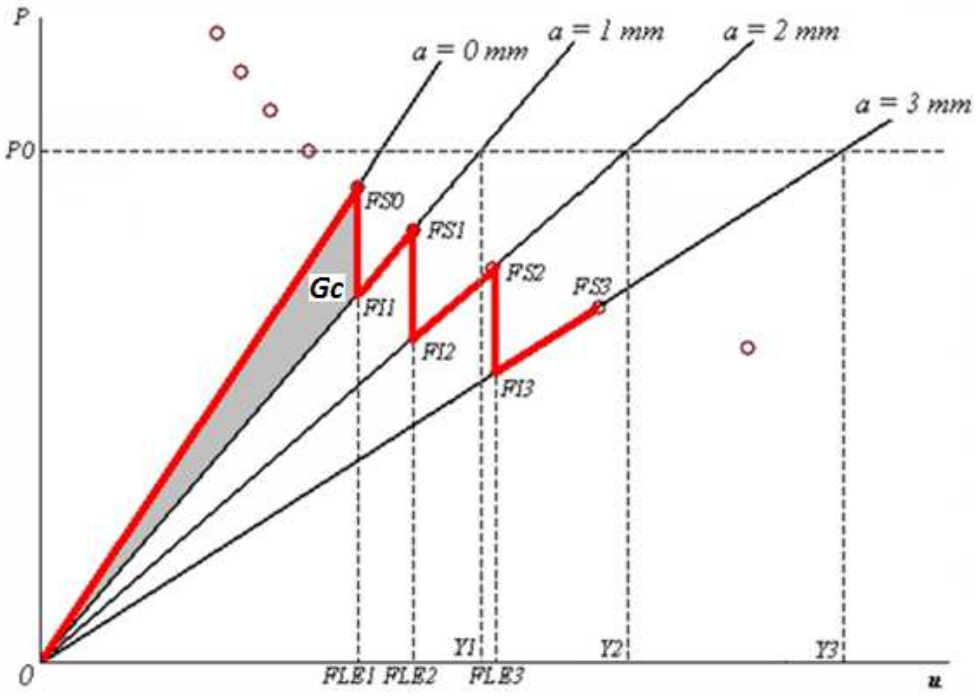


Figure 4.4: Esquema de curva de propagação a Gc constante [3]

A área cinza na figura 4.4 corresponde a energia Gc necessária para fazer avançar a fissura de 0 a 1 mm e pode ser calculada pela área do triangulo FS0-0-FI1, que nada mais é que a área do triangulo FS0-0-FLE1 menos a área do triangulo FI1-0-FLE1. A energia crítica Gc pode então ser escrita como:

$$Gc = \frac{(FLE1 \times FS0)}{2} - \frac{(FLE1 \times FI1)}{2} = \frac{FLE1}{2}(FS0 - FI1) \quad \text{(Eq.4.1)}$$

Considerando que a mesma energia Gc seja necessária para fazer evoluir a fissura de 1 a 2 mm, e assim sucessivamente, a Eq.4.1 pode ser generalizada para qualquer comprimento de fissura inicial a = *i*, com *i* variando entre 0 e o comprimento total da interface colada (L):

$$Gc = \frac{FLE(i)}{2}(FS(i-1) - FI(i)), \quad 0 < i < L \quad \text{(Eq.4.2)}$$

Como foi dito anteriormente, o modelo elástico desenvolvido no CAST3M permite obter o valor da rigidez global da estrutura para cada comprimento de fissura inicial (Rg(i)) usando um valor qualquer para a força P0 e a flecha correspondente Y(i).

$$Rg(i) = \frac{P0}{Y(i)} \quad \text{(Eq.4.3)}$$

Observando a figura 4.4 percebemos que essa rigidez pode ainda ser expressa como a razão entre as forças e as flechas correspondentes da seguinte forma:

$$Rg(i) = \frac{P0}{Y(i)} = \frac{FS(i)}{FLE(i+1)} = \frac{FI(i)}{FLE(i)} \quad \text{(Eq.4.4)}$$

Combinando as equações 4.2 e 4.4 é possível chegar a uma expressão para obter as flechas (FLE(i)) que correspondem a um dado valor Gc:

$$FLE(i) = \sqrt{\frac{2Gc}{Rg(i-1) - Rg(i)}} \quad \text{(Eq.4.5)}$$

Uma vez obtidos os valores das flechas FLE(i), podemos voltar a Eq.4.4 e obter os valores das forças FS(i). O conjunto de pontos FS(i)-FLE(i) forma a curva de propagação para um determinado valor de Gc.

Uma rotina contendo as expressões anteriores foi programada no próprio CAST3M a fim de obter diretamente as curvas de propagação. Para isso é feita uma execução da simulação em *looping* mudando a malha para cada valor de fissura inicial e estocando os valores de Rg, FS e FLE correspondentes. A figura 4.5 mostra alguns exemplos de curvas de propagação de fissura para determinados valores de Gc.

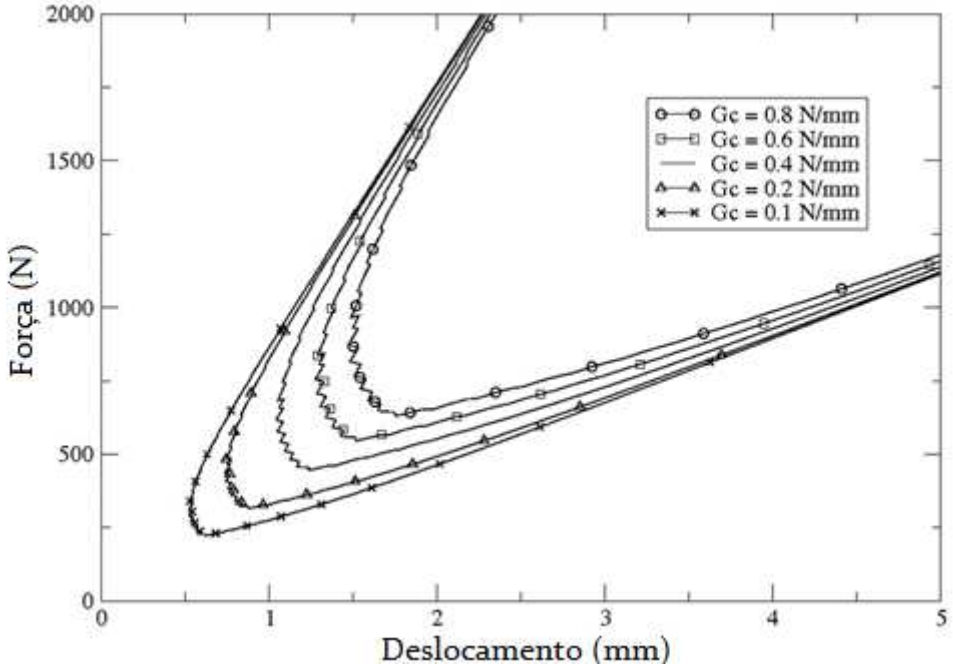


Figure 4.5: Exemplo de curvas de propagação a Gc constante [3]

4.4 Comportamento elasto-plástico do metal

Seguindo essa metodologia descrita na seção anterior, o primeiro passo foi verificar em qual configuração de ensaio de propagação realizado experimentalmente seria possível detectar uma propagação de fissura. A fim de reproduzir o comportamento observado nos ensaios, foi incluído o comportamento plástico do metal nas simulações apresentadas a partir de agora. O modelo de comportamento elástico usado no CAST3M necessita somente a inclusão de um valor do limite de plasticidade do material.

A figura 4.6 mostra a simulação com a deformação plástica estrutura com dois comprimentos de fissura diferentes, de 2 e 15 mm, para o material ASTM A36, conforme Módulo de Elasticidade E=310 Mpa. A figura mostra que não existe diferença perceptível entre as duas curvas, ou seja, uma propagação de fissura entre esses valores não seria percebida.

Por outro lado, na figura 4.7 podemos ver que a simulação com uma fissura de 27 mm já apresenta diferença em relação as outras duas anteriores. Pode-se ver ainda que a curva coincide melhor com o final do ensaio onde na verdade a fissura chega bem próxima a metade da distância entre pontos que é 60 mm.

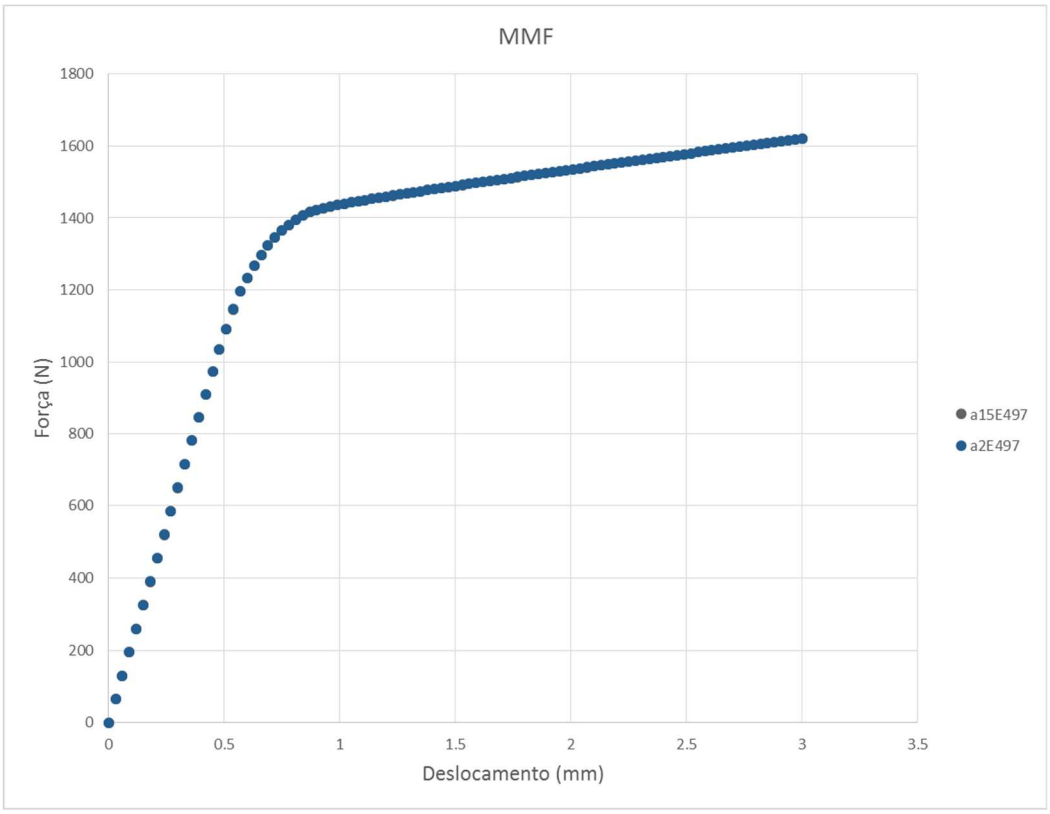


Figura 4.6: Simulação com deformação plástica e fissuras iniciais de 2 e 15 mm, para o material ASTM A36

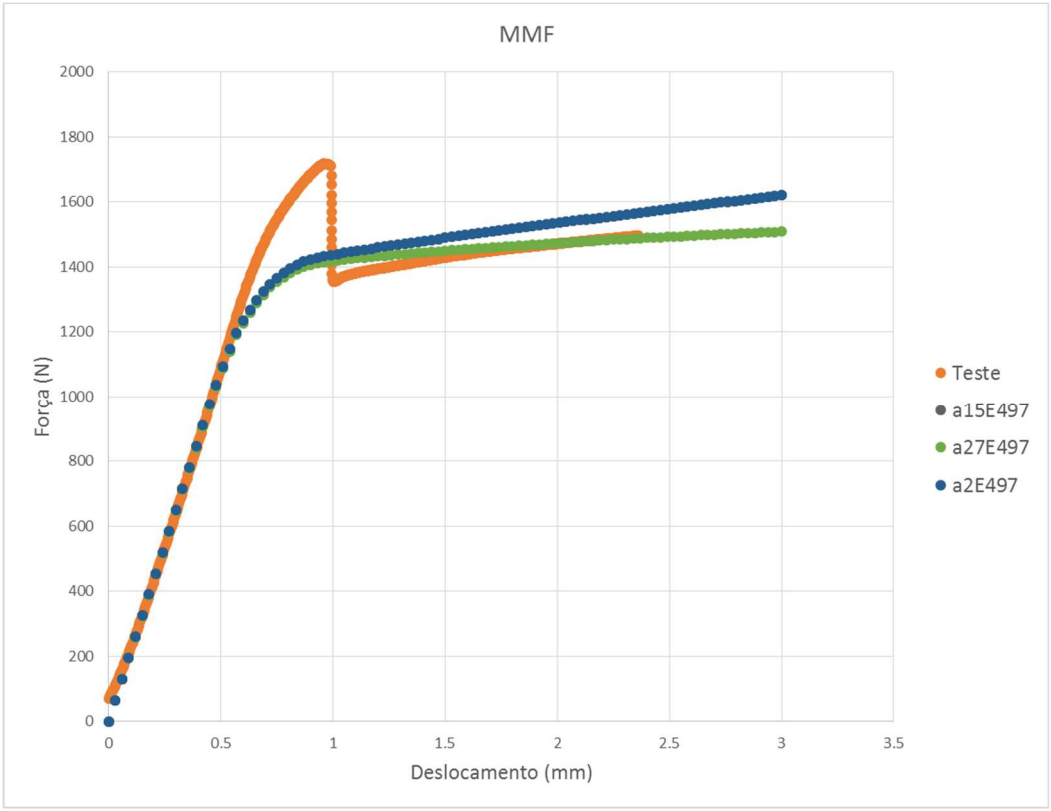


Figura 4.7: Simulação com fissuras iniciais de 2, 15 e 27 mm para o material A36

Resta agora entender a diferença entre a força máxima encontrada no ensaio real e carga máxima na fase de deformação plástica obtida nos ensaios (material A 36).

A primeira idéia foi verificar se o valor adotado como limite de escoamento para o aço estava correto (SIG=310 MPa). O valor da tensão de escoamento foi estimado, a partir de ensaio real.

Foram então feitas simulações com valores de SIG=414 MPa, cuja tensão é a estimada, a partir do ensaio real, que é o valor que corresponde a um aço 1045, para verificação da adequação do Módulo de Elasticidade. Na figura 4.8, vemos que houve uma melhor coincidência entre a simulação e a curva do ensaio. Contudo, da mesma forma que no caso anterior, não é possível ver a propagação da fissura entre a simulação com a = 15 e a = 35 mm, por não haver concordância entre as curvas de ensaio e teste.

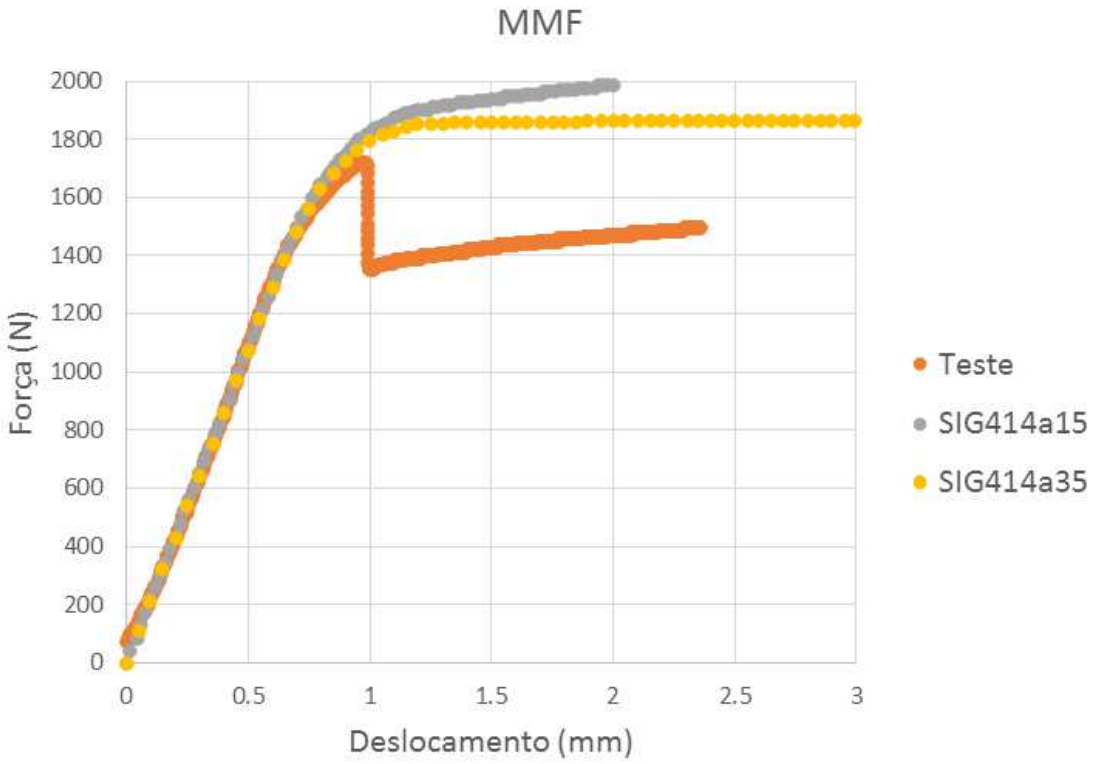


Figura 4.8: Simulação com fissuras iniciais de 15 e 35 mm para o material A-36

Todas as mudanças de variáveis possíveis foram testadas com o teste de 60mm, porém mesmo alterando as variáveis, a diferença entre as curvas com a = 15 mm e a = 30 mm (metade do spam) não permitiria detectar propagação de fissura que foi vista no ensaio. Desta forma pode-se concluir que esse ensaio, embora a primeira vista fosse o mais adequado para buscarmos a simulação numérica pois era o que apresentava menor deformação plástica, era também o que apresentava maior deslocamento/deformação proporcional. Saindo, portanto, da definição da mecânica de ruptura usada nas simulações que prevê pequenas deformações e deslocamento.

Dessa forma, voltou-se a atenção ao ensaio com maior spam (100 mm) e novas simulações foram feitas considerando obviamente a deformação plástica ocorrida. A figura 4.9 mostra duas simulações com a = 15 mm e a = 50 mm (metade do spam). Nela é possível perceber que essas duas curvas coincidem com o comportamento antes e depois da propagação da fissura observado no ensaio. Isso prova que, usando-se os mesmos valores de constantes de material usados nessas simulações será possível obter curvas de

propagação de fissura da maneira proposta por De Barros [12]. As propriedades dos materiais usadas nas simulações são mostradas na tabela 4.1.

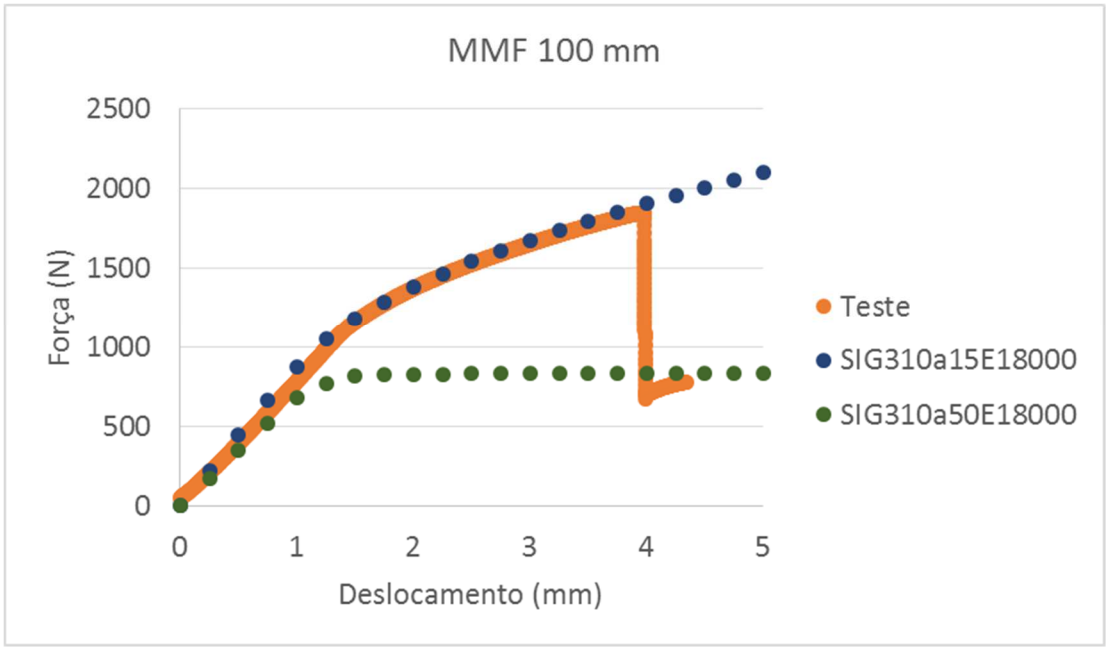


Figura 4.9: Simulação com fissuras iniciais de 15 e 50 mm

Tabela 4.1: Propriedades dos materiais

	Módulo de elasticidade E (MPa)	Coeficiente de Poisson	Limite de escoamento (MPa)
Aço	210000	0.3	310
Compósito	18000	0.3	-

Cabe observar que o valor do módulo de elasticidade do compósito aplicado agora é mais coerente com a literatura do que aquele encontrado nas primeiras simulações feitas com um spam de 60 mm que era E_c = 497 Mpa. Podemos concluir que naquela simulação, a influência do módulo de elasticidade na rigidez da estrutura era muito pequena.

A figura 4.10 mostra o estudo feito com simulações usando vários valores de fissura iniciam diferentes. Pode-se observar que para valores de fissura entre 10 e 20 mm a propagação da fissura praticamente não seria percebida no resultado do ensaio.

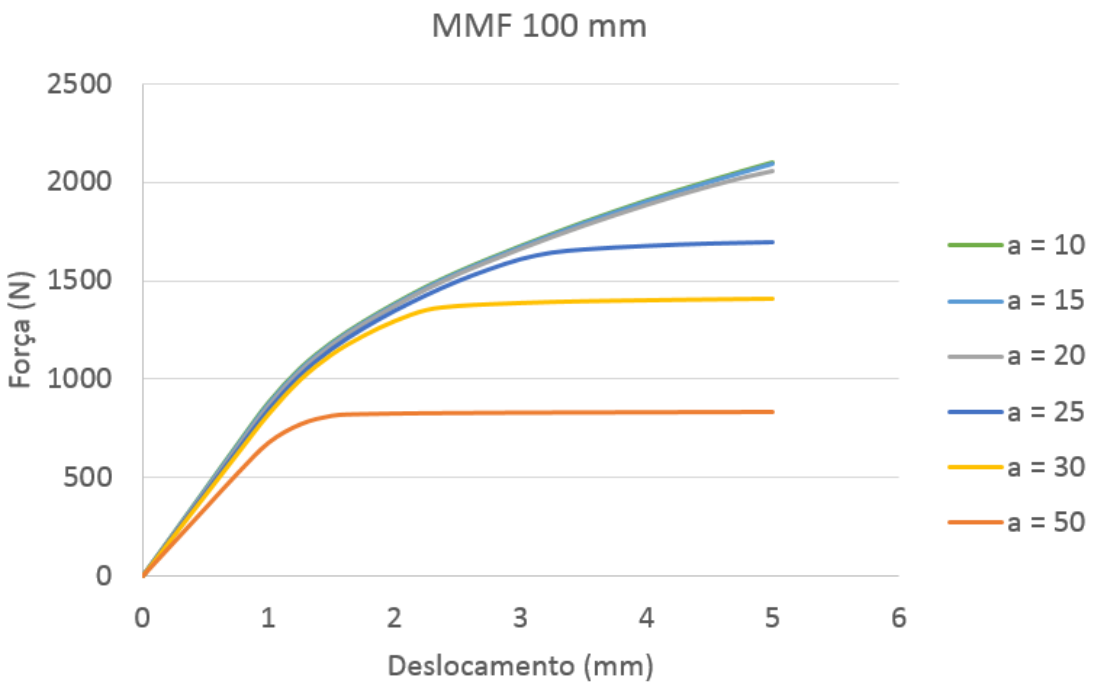


Figura 4.10: Simulação com fissuras iniciais entre 10 e 50 mm

Com base no comportamento mostrado na figura 4.10 nas proximidades do ponto de propagação de fissura ocorrido no experimento, próximo aos 4 mm de deslocamento, foi constatado que nesse ensaio o valor real da fissura inicial foi de 20 mm. A figura 4.11 mostra a simulação com uma fissura de 20 mm comparada ao resultado experimental, onde é possível se ver uma boa concordância entre as duas curvas. Essa concordância é particularmente boa exatamente no ponto de propagação da fissura, portanto esse valor de fissura inicial foi o usado na busca do valor de energia crítica de propagação de fissura Gc.

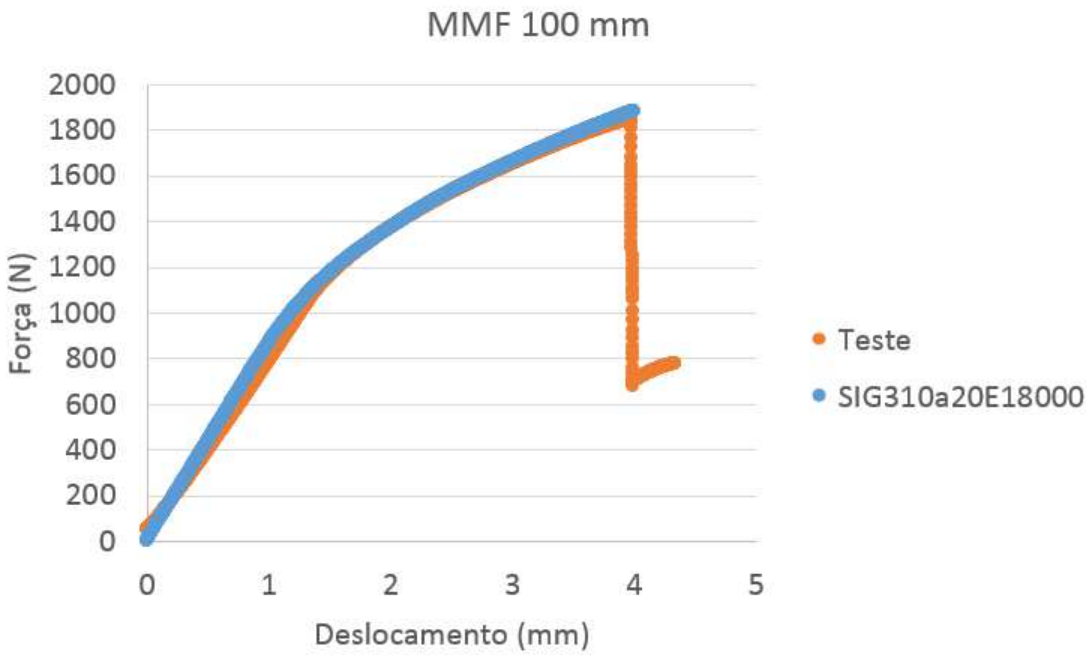


Figura 4.11: Simulação com uma fissura de 20 mm

4.5 Energia crítica de propagação de fissura (Gc) em regime elasto-plástico

Uma adaptação a metodologia proposta por De Barros [12] foi feita no sentido de incluir a plasticidade no cálculo de Gc.

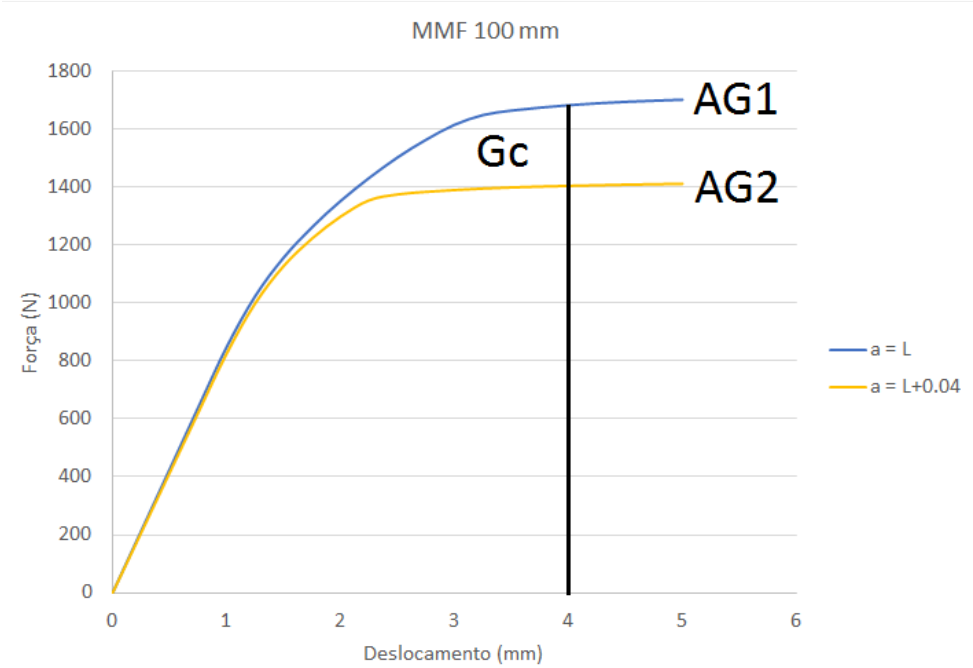


Figura 4.12: Esquema representativo da energia Gc.

A figura 4.12 mostra o esquema utilizado para calcular a energia Gc. A energia para fazer a fissura propagar de uma unidade de área corresponde a Gc e foi calculada segundo a expressão abaixo.

$$Gc = \frac{AG1 - AG2}{AF} \qquad \text{(Eq.4.6)}$$

Onde AF é a área de uma fissura com uma unidade de área.

$$AF = w \,.\, a_i = 1mm^2 \qquad \text{(Eq.4.7)}$$

Sendo *w* a largura do corpo de prova, ou seja *w* = 25mm, chegamos ao valor a_i, que é o avanço de fissura que corresponde a uma unidade de área.

$$25 \,.\, a_i = 1$$
$$a_i = 0.04mm$$

Na figura 4.12, AG1 corresponde à área sob a curva no momento da propagação da fissura para um determinado valor de fissura “L” e AG2 corresponde à área sob a curva para um determinado valor de fissura “L+0.04”.

As áreas sob as curvas foram calculadas pela soma das áreas até o ponto de propagação da fissura, conforme ilustrado na figura 4.13.

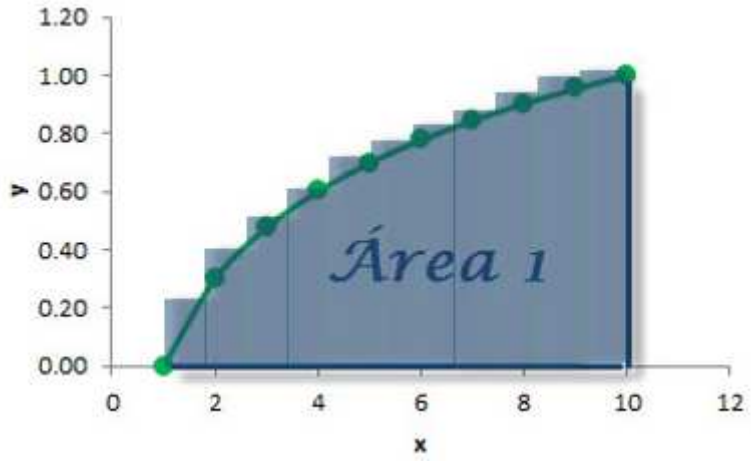


Figura 4.13: Esquema representativo do calculo da área sob a curva Força (y) - Deslocamento (x), em mm.

Considerando, como foi visto na figura 4.11, que a fissura inicial de 20 mm foi a que melhor se ajustou ao resultado do nosso ensaio, a simulação com esse valor de fissura e com o valor de 20,04 mm foi simulada no CAST3M com um passo de incremento muito pequeno, de 0,004 mm, para garantir uma medida da área a mais precisa possível.

O valor encontrado para AG1 e AG2 foram:

$$AG1 = 4.812{,}94\ N.mm$$

$$AG2 = 4.812{,}42\ N.mm$$

Dessa forma o valor encontrado para Gc foi de

$$Gc = \frac{AG1 - AG2}{AF} = \frac{4.812{,}94 - 4.812{,}42}{1}$$

$$Gc = 0{,}52\ N/mm$$

Esse valor encontrado para Gc esta coerente com o que esperava para esse tipo de união conforme pode ser visto na literatura De Barros [12].

Conclusões

Nesse trabalho foi estudada a propagação da fissura em juntas coladas dissimilares de tipo compósito e o aço. Uma abordagem numérico-experimental foi usada para atingir os objetivos do trabalho.

Na parte experimental do trabalho, foram realizados ensaios de propagação de fissura em modo misto, sendo este o modo de falha mais comum em aplicações reais desse tipo de união colada. Os corpos de prova foram fabricados com compósitos reforçados de fibra de carbono colados a um substrato de aço carbono. No ensaio de flexão em três pontos, a distancias entre os apoios foi variada entre 100 e 60 mm na tentativa de obter uma propagação da fissura antes de atingir a deformação plástica do aço. No entanto, isso não foi possível e todos os resultados dos ensaios mostraram algum grau de deformação plástica do substrato metálico.

A simulação usando o programa de elemento finitos CAST3M permitiu num primeiro momento identificar algumas propriedades dos materiais que não estavam disponíveis. A comparação entre resultados numéricos e experimentais levou a conclusão de que o melhor ensaio para a identificação da energia crítica de propagação de fissura Gc era o ensaio com maior distância entre pontos. Mesmo sendo esse o que apresentava maior deformação plástica, ele era o que melhor permitia a identificação de uma propagação de fissura dentro dos limites do ensaio.

Finalmente, foi desenvolvido um método para a obtenção da energia crítica de propagação de fissura Gc através das simulações do comportamento da junta com dois valores de fissura imediatamente subsequentes, sendo o primeiro valor aquele identificado pela comparação com o resultado experimental e o segundo aquele que corresponde ao avanço de uma unidade de área da fissura. A energia Gc pode então ser calculada e o valor encontrado é coerente com a literatura sobre esse tipo de juntas.

Perspectivas

Como perspectiva para continuação desse trabalho, pode-se propor o desenvolvimento do método numérico no CAST3M para geração de curvas de propagação a Gc constante.
A fim de que os ensaios possam ser melhor planejados com um conhecimento prévio das possibilidades de comportamento da estrutura, considerando vários valores de Gc.

Referências Bibliográficas

[1] Callister Jr., W. D.; Rethwisch, D. G.: Materials Science and Engineering - an Introduction, 8 ed., United States of America, Wiley, 2009.

[2] de Barros, S.; Banea, M. D.; Budhe, S.; de Siqueira, C. E. R.; Lobão, B. S. P.; Souza, L. F. G.: Experimental analysis of metal-composite repair of floating offshore units (FPSO). The Journal of Adhesion, 93:147-158, 2016.

[3] Meniconi, L. C. M.; Lana, L. D. M.; Morikana, S. R. K.: Experimental Fatigue Evaluation of the Composite Repair of a Metallic Ship Hull. 2nd Brazilian Conference on Composite Materials, São José dos Campos, São Paulo, Brasil, 15-18 September 2014.

[4] Meniconi, L. C. M.; Porciúncula, I. N.; Mcgeorge, D.; Pedersen, A.: Structural Repair at a Production Platform by Means of a Composite Material Patch. Offshore Technology Conference - OTC 20657, Houston, Texas, USA, 3-6 May 2010.

[5] Mcgeorge D.; Echtermeyer, A. T.; Leong, K. H.; Melve, B.; Robinson, M.; Fischer, K. P.: Repair of floating offshore units using bonded fibre composite materials. Composites: Part A, 40:1364-1380, 2009.

[6] de Moura, M. S. F. S.; de Morais, A. B.; de Magalhães, A. G.: Materiais Compósitos – Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico, 2 ed, Porto, Publindústria, 2011.

[7] Arouche, M. M.: Efeito da Umidade na Adesão de Juntas Coladas CFRP-Aço. Dissertação de Mestrado, CEFET/RJ, 2016.

[8] da Silva, L. F. M.; de Magalhães, A. G.; de Moura, M. F. S. F.: Juntas Adesivas Estruturais, Porto, Publindústria, 2007.

[9] De Barros, S.; Champaney, L. Crack propagation tests: analytical and numerical approaches. Mechanics of Solids in Brazil, H.S. da Costa Mattos & Marcílio Alves, Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2009.

[10] de Barros, S.: Comportamento de placas coladas em ensaios mecânicos. IV Congresso Nacional de Engenharia Mecânica - CONEM, Recife, Pernambuco, Brasil, Agosto de 2006.

[11] Hybrid Aluminium Metal Matrix Composite Reinforced with SiC and TiB2 Johny James. S, Venkatesan. K, Kuppan. P, Ramanujam, 12th Global Congress on Manufacturing and Management, GCMM 2014

[12] De Barros, S.; Champaney, L. Crack propagation curves on flexure adhesion tests, International Journal of Structural Integrity, Vol. 4 Issue: 3, pp.396-406, 2003.