

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E
ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**INFLUÊNCIA DO PROCESSO DE USINAGEM NA RESISTÊNCIA À FADIGA
DE LAMINADOS UNIDIRECIONAIS DE EPÓXI/FIBRA DE CARBONO**

Alex Ricardo Cervini

São Carlos-SP
2000

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E
ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**INFLUÊNCIA DO PROCESSO DE USINAGEM NA RESISTÊNCIA À FADIGA
DE LAMINADOS UNIDIRECIONAIS DE EPÓXI/FIBRA DE CARBONO**

Alex Ricardo Cervini

Dissertação apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em Ciência e
Engenharia de Materiais como requisito
parcial à obtenção do título de MESTRE EM
CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS

Orientador: Dr. Elias Hage Junior

Coorientador: Dr. Dawilson Lucato

Agência Financiadora: CAPES e FAPESP

São Carlos-SP
2000

DEDICATÓRIA

Aos meus pais: Tereza e Irineu Cervini

VITAE DO CANDIDATO

Engenheiro de Materiais (área de polímeros) pela UFSCar (1997).



Folha de Aprovação

Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Alex Ricardo Cervini, realizada em 15/12/2000.

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Elias Hage Junior (UFSCar)

Prof. Dr. José Augusto Marcondes Agnelli (UFSCar)

Prof. Dr. Dirceu Spinelli (USP)

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais.

AGRADECIMENTOS

Meus agradecimentos aos Professores Dr. Elias Hage Jr.(DEMa-UFSCar) e Dr. Dawilson Lucato (EESC-USP) pela orientação neste estudo e, principalmente, pela amizade.

RESUMO

Materiais compósitos feitos de matriz polimérica reforçada por fibras de carbono têm boas propriedades mecânicas além de baixo peso.

Embora os materiais compósitos sejam geralmente moldados diretamente na forma final das peças projetadas, às vezes é necessário usiná-las para obter acabamento. Danos estruturais podem ser introduzidos compósitos de carbono-epoxy durante os procedimentos de usinagem de perfil de forma.

No caso específico deste trabalho, a usinagem de perfil de forma das amostras de ensaio tiveram influência do tipo de ferramentas de corte, e conseqüentemente a operação de usinagem de perfil de forma introduziu danos de superfície, tais como: cortar fibras de reforço deixando as extremidades livres sem efeito de suportar carga, microcrateras e delaminações nas superfícies usinadas.

A influência da usinagem de perfil de forma no comportamento mecânico do compósito foi estudada por usinagem de amostras na direção transversal às fibras orientadas. O comportamento de resistência à fadiga foi a principal propriedade observada.

O material estudado foi composto de fibra de carbono-epóxi fabricado com 60% em volume de fibras contínuas unidirecionais.

Os testes de fadiga foram realizados pela técnica de flexão rotativa, a máquina de teste produzida pela Tatnall Krouse.

Sobre os testes de fadiga, sob 800 MPa de tensão de flexão dinâmica e 1800 rpm de freqüência, obtendo:

1-As amostras usinadas com diamante monocristalino mostraram ser mais resistentes do que outras amostras, mas observou-se delaminação na região de transição da usinagem de perfil de forma do raio de concordância

dos corpos de prova;

2-Sob 800 MPa de tensão de flexão dinâmica e 3600 rpm de frequência, as amostras fraturaram rapidamente. A temperatura das amostras pode ter afetado o desempenho da matriz epoxi;

3-Sob 700 MPa de tensão de flexão dinâmica e 1800 rpm de frequência, amostras usinadas com diamante novamente tiveram delaminação na região de transição da usinagem de perfil de forma do raio de concordância dos corpos de prova;

O mecanismo de propagação de danos das amostras foi mapeado passo a passo, mostrando cada passo através de micrografias.

**INFLUENCE OF SHAPE PROFILE MACHINING IN THE TRANSVERSAL
DIRECTION TO FIBERS ON FATIGUE STRENGTH BEHAVIOR OF A
UNIDIRECTIONAL EPOXY-CARBON FIBER LAMINATE**

ABSTRACT

Composite materials made of polymeric matrix reinforced by carbon fibers have good mechanical properties besides low weight.

Although composite materials are usually molded directly in the final shape of the designed parts, sometimes it is necessary to machine it to get finishing. Structural damages can be introduced to epoxy reinforced by carbon fibers (carbon fiber-epoxy composites) during shape profile machining procedures.

The chosen parameters as well as the type of cutting tools in those procedures can cut fibers leaving off load ends, holes and delamination on the machined surfaces.

The influence of the shape profile machining on the mechanical behavior of the composite was studied by machining samples in the transversal direction to the oriented fibers. The fatigue strength behavior was the main property observed.

The material studied was carbon fiber-epoxy composite manufactured with 60% by volume unidirectional continuous.

The Fatigue Tests were done by the technique of rotating bending, the testing machine produced by Tatnall Krouse.

About the fatigue tests, under 800 MPa of dynamic bending tension and 1800 rpm of frequency, getting:

1. Machined samples with monocrystalline diamond showed to be more resistant than others samples, but it was observed delamination in the transition region of the shape profile machining of the radius of the specimens during the tests.

2. Under 800 MPa of dynamic bending tension and 3600 rpm of frequency, the samples fractured quickly. The performance of the samples can have been affected by temperature increase of the epoxy matrix.

3. Under 700 MPa of dynamic bending tension and 1800 rpm of frequency, machined samples with diamond showed delamination in the transition region of the shape profile machining of the radius of the specimens during the tests.

The mechanism of propagation of damages of the samples was mapped step by step, showing each step through of micrographs.

ÍNDICE DE ASSUNTOS

| | |
|---|----|
| 1. INTRODUÇÃO | 1 |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 5 |
| 3 FABRICAÇÃO DO COMPÓSITO EPOXI/FIBRA DE CARBONO | 13 |
| 4 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MICROESTRUTURAL | 13 |
| 4.1 Verificação experimental da fração volumétrica de fibras ϕ_V | 13 |
| 5 PROPRIEDADES MECÂNICAS | 17 |
| 5.1 Ensaio de Flexão em três pontos | 17 |
| 5.2 Ensaio de Tração | 21 |
| 6 USINAGEM DO CARBONO-EPOXI | 25 |
| 7 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À FADIGA POR FLEXÃO ROTATIVA | 47 |
| 7.1 Fundamentos da técnica de ensaio de fadiga por flexão rotativa | 48 |
| 7.1.1 Sistema de aplicação de força | 48 |
| 7.1.2 Forma de carregamento senoidal | 50 |
| 7.2 Resultados | 51 |
| 7.2.1 Ensaio Preliminares | 51 |
| 7.3 Análise da fratura por microscopia eletrônica de varredura, e tentativa de mapear o mecanismo da fratura observado nos ensaios de fadiga sob tensão de flexão dinâmica (800 MPa) para frequências de 1800 rpm e 3600 rpm. | 59 |
| 8 CONCLUSÕES | 73 |
| 9 REFERÊNCIAS | 75 |
| 10 ANEXO 1 | 79 |

ÍNDICE DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1: Valores das propriedades mecânicas em flexão de 3 pontos. | 19 |
| Tabela 2: Valores das propriedades mecânicas em tração | 22 |
| Tabela 3: Dados da geometria das ferramentas de corte. | 26 |
| Tabela 4: Valores de rugosidade superficial (Ra) e (Rt). | 27 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1: Geometria dos corpos de prova usinados e polidos, que foram testados nos ensaios de fadiga utilizando a técnica de flexão rotativa. As medidas são em milímetros..... | 3 |
| Figura 2: Exemplo de peça produzida com compósito carbono-epoxi com fibras de carbono dispostas em várias direções. Peça componente do rotor de helicóptero - tipo Starflex [3]. Peça moldada na forma final. | 4 |
| Figura 3: Dados experimentais | 6 |
| Figura 4: Exemplo de curva S/N desenvolvida no trabalho de Lucato [2], pag 5-14 (dados experimentais da Figura 3)..... | 7 |
| Figura 5: Micrografias da superfície usinada de compósitos: a) com fibras de vidro, b) com fibras de carbono e c) com fibras de Kevlar..... | 10 |
| Figura 6: Exemplo de construção de uma preforma multi-axial costurada no sentido da espessura do laminado. | 12 |
| Figura 7: Gráfico típico de tensão de cisalhamento interlaminar em função da deflexão para compósito carbono-epoxi construído com preformas. As porcentagens se referem à direção de reforço perpendicular ao plano de reforço principal..... | 12 |
| Figura 8: Micrografia mostrando as fibras de carbono de topo em a) e b)..... | 15 |
| Figura 9: Máquina universal INSTRON de ensaios mecânicos, modelo 5505. Mostra o ensaio de flexão em 3 pontos. DEMa/UFSCar. | 18 |
| Tabela 1: Valores das propriedades mecânicas em flexão de 3 pontos. | 19 |
| Figura 10: Curva tensão x deformação referente à dez corpos de prova do material carbono-epoxi, ensaiadas sob flexão em 3 pontos, conforme a norma ASTM D790..... | 20 |
| Figura 11: Máquina de ensaios mecânicos universal INSTRON, modelo 5505. Mostra o ensaio de tração. DEMa/UFSCar. | 21 |
| Tabela 2: Valores das propriedades mecânicas em tração | 22 |
| Figura 12: Micrografias da fratura sob tração. Em (a) tem-se a superfície de fratura com arrancamento de blocos de fibra com matriz. Em (b) mostra-se que não há vazios entre fibra e matriz | 23 |

| | |
|---|----|
| Tabela 3: Dados da geometria das ferramentas de corte..... | 26 |
| Tabela 4: Valores de rugosidade superficial (Ra) e (Rt)..... | 27 |
| Figura 13: Usinagem dos corpos de prova por processo de Torno..... | 29 |
| Figura 14: Em a: micrografias da aresta de corte da ferramenta de diamante policristalino. Em b: micrografia da aresta de corte da ferramenta de diamante monocristalino..... | 30 |
| Figura 15: Esta micrografia mostra a superfície usinada com a ferramenta de diamante policristalino, PCD. A área observada é a secção mínima do corpo de prova..... | 31 |
| Figura 16: Micrografias destacando marcas de arrancamento de pedaços de fibras de carbono e matriz da superfície usinada com PCD..... | 32 |
| Figura 17: Micrografias da superfície usinada com PCD. Em (a) mostra-se uma região de arrancamento de matriz em torno de pontas de fibras cortadas; em (b) destaca o defeito em (a) provocado pela usinagem com PCD..... | 33 |
| Figura 18: Micrografias da superfície usinada com PCD. Em (a) mostra-se outra região de arrancamento de matriz em torno de pontas de fibras formando microcrateras (vazios); em (b) mostra uma ampliação deste defeito..... | 34 |
| Figura 19: Micrografia da superfície usinada com PCD. Mostra uma fibra de carbono contínua que foi cortada e o arrancamento de parte desta fibra.. | 35 |
| Figura 20: Micrografia da superfície usinada com PCD, com vista de perfil..... | 35 |
| Figura 21: Micrografia mostrando uma superfície polida..... | 36 |
| Figura 22: As micrografias (a) e (b) mostram a grande quantidade de fibras cortadas na superfície polida..... | 37 |
| Figura 23: Micrografia da superfície polida. Vista de perfil..... | 38 |
| Figura 24: Micrografia mostrando o aspecto da superfície usinada com a ferramenta de diamante monocristalino..... | 38 |
| Figura 25: Micrografia mostrando a superfície usinada com a ferramenta de diamante monocristalino. Destaque para o melhor arremate no corte das fibras de carbono..... | 39 |
| Figura 26: Micrografias (a) e (b) são da superfície usinada com a ferramenta de diamante monocristalino..... | 40 |

| | |
|--|----|
| Figura 27: : Micrografias (a) e (b) são da superfície usinada com a ferramenta de diamante monocristalino. Destaque para o arremate no corte de fibra de carbono..... | 41 |
| Figura 28: As micrografias (a) e (b) são da superfície usinada com a ferramenta de diamante monocristalino. Destaque para uma fibra da superfície que foi danificada pela usinagem. | 42 |
| Figura 29: As micrografias (a) e (b) são da superfície usinada com a ferramenta de diamante monocristalino..... | 43 |
| Figura 30: Micrografia do raio de concordância usinado com a ferramenta de diamante monocristalino..... | 44 |
| Figura 31: As micrografias (a) e (b) mostram o pó da usinagem do carbono-epoxi com a ferramenta de diamante monocristalino. | 45 |
| Figura 32: As micrografias (a) e (b) mostram o pó da usinagem do carbono-epoxi com a ferramenta de diamante monocristalino, com aumento de 5000x..... | 46 |
| Figura 33: Distribuição de tensões, com a variação da distância entre o centro e a superfície da secção transversal do corpo de prova..... | 49 |
| Figura 34: Gráfico da tensão cíclica (ou dinâmica) no ensaio de fadiga por flexão rotativa. | 51 |
| Figura 35: mostra um corpo de prova submetido a uma tensão de 700 MPa após ter atingido 1×10^7 ciclos. | 53 |
| Figura 36: Esta fotografia mostra o corpo de prova polido, ensaiado sob 1800 rpm de frequência e sob 800 MPa de tensão de flexão dinâmica. Este corpo de prova rompeu em 3×10^5 ciclos..... | 53 |
| Figura 37: Esta figura mostra a superfície plana da fratura do corpo de prova polido, ensaiado sob 800 MPa de tensão de flexão dinâmica e 1800 rpm de frequência..... | 54 |
| Figura 38: Micrografia mostrando que a secção onde surgiram as esfoliações coincidiu com a secção da fratura. | 55 |
| Figura 39: Micrografia mostrando fibras de carbono contínuas que foram rompidas na fratura do corpo de prova polido. | 55 |

| | |
|---|----|
| Figura 40: Micrografia mostrando as trincas se propagando entre pontas de fibras de carbono cortadas, na secção de surgimento de esfoliações. | 56 |
| Figura 41: Esta fotografia mostra o corpo de prova usinado com PCD, ensaiado sob 700 MPa de tensão de flexão dinâmica e 3600 rpm de frequência. Esta fratura foi chamada de "Efeito Lápis". | 56 |
| Figura 42: Esta figura mostra o corpo de prova usinado com diamante monocristalino, submetido ao ensaio de fadiga por flexão rotativa, nas condições de 800 MPa e 1800 rpm. O número de ciclos até a falha foi $n = 1,5 \times 10^6$ ciclos. | 57 |
| Figura 43: Esta figura destaca o corpo de prova da figura 42. | 57 |
| Figura 44: Esta figura mostra o corpo de prova usinado com diamante monocristalino, submetido ao ensaio de fadiga por flexão rotativa, nas condições de 800 MPa e 1800 rpm. O número de ciclos até a falha foi $n = 1,6 \times 10^6$ ciclos. | 58 |
| Figura 45: Esta figura destaca o corpo de prova da figura 44. | 58 |
| Figura 46: Mapeamento do mecanismo de fratura, observado para os corpos de prova ensaiados sob tensão de flexão dinâmica de 800 MPa e 3600 rpm de frequência. | 61 |
| Figura 47: Micrografia mostrando a superfície de fratura de um corpo de prova usinado com a ferramenta de diamante monocristalino, submetido a 3600 rpm e 800 MPa de tensão de flexão dinâmica. | 62 |
| Figura 48: Micrografia mostrando as esfoliações, que surgiram na região adjacente à secção mínima do corpo de prova, usinado com diamante monocristalino, ensaiado sob 800 MPa de tensão de flexão dinâmica e 3600 rpm de frequência. | 63 |
| Figura 49: Micrografia mostrando as esfoliações, com vista de frente, observadas no corpo de prova usinado com diamante monocristalino, ensaiado sob 800 MPa de tensão de flexão dinâmica e 3600 rpm de frequência. | 64 |
| Figura 50: Micrografias (a) e (b) mostrando a superfície interna lateral, por onde se propagaram as delaminações, chegando até a secção transversal da fratura..... | 65 |

- Figura 51: Micrografia mostrando a superfície de fratura do "lápiz" interno de fibras contínuas, do corpo de prova submetido a 800 MPa de tensão de flexão dinâmica e 3600 rpm de frequência..... 66
- Figura 52: Esta figura mostra a superfície de fratura das fibras contínuas, que foram rompidas sob tensão de flexão dinâmica de 800 MPa e frequência de 3600 rpm. 67
- Figura 53: Micrografias (a) e (b) mostrando detalhes do furo central, característico em todas as fraturas nos corpos de prova ensaiados sob tensão de flexão dinâmica de 800 MPa e 3600 rpm de frequência. 68
- Figura 54: Micrografias (a) e (b) mostrando as esfoliações que surgem em torno da secção mínima, de um corpo de prova usinado com diamante monocristalino, ensaiado sob tensão de flexão dinâmica 800 MPa e 1800 rpm. 69
- Figura 55: Micrografia mostrando trincas radiais na porção do corpo de prova sob maior momento fletor..... 70
- Figura 56: Micrografias (a) e (b) mostrando as fibras das camadas internas da secção mínima de um corpo de prova, usinado com diamante monocristalino, após ter sido ensaiado sob 800 MPa de tensão de flexão dinâmica e 1800 rpm. 71

1. INTRODUÇÃO

As teorias de micromecânica sobre materiais compósitos [1] demonstraram que o desempenho do material compósito depende da transferência de tensão da matriz polimérica para as fibras de reforço.

No entanto, a transferência de tensão não ocorre em todo comprimento das fibras de reforço. As extremidades das fibras reduzem a eficiência da transferência de tensão.

Lucato [2], em seu trabalho de doutorado, iniciou o estudo de fadiga de materiais compósitos utilizando a técnica de flexão rotativa. Até então, esta técnica era aplicada para materiais metálicos. Neste trabalho foi realizado um estudo sobre a resistência à fadiga do material compósito vidro E/Epoxi unidirecional, contendo 60% de fibras em volume.

Neste trabalho de Lucato [2], foram usinados corpos de prova do compósito vidro E/Epoxi unidirecional conforme a geometria da Figura 1. Processo de usinagem de perfil de forma utilizando torno.

Foram realizados os ensaios de fadiga com estes corpos de prova em compósito vidro E/Epoxi unidirecional utilizando a técnica de flexão rotativa, e o resultado dos ensaios de fadiga foi o desenvolvimento da curva S/N (tensão x número de ciclos até fratura).

A partir dos resultados da curva S/N, Lucato [2] prosseguiu para a fabricação de um trem de pouso em lâminas unidirecionais do compósito vidro E/Epoxi e testou em avião de pequeno porte enquadradas no F.A.R. PART-23.

No entanto, as fibras de carbono são mais rígidas do que as fibras de vidro. Tendo em vista a diferença de rigidez da fibra de carbono comparando com a fibra de vidro, surgiu a iniciativa de estudar o comportamento do laminado unidirecional carbono-epoxi, contendo 60% de fibras em volume, sob ensaios de fadiga por flexão rotativa e fazer uma comparação com os resultados obtidos por Lucato [2] nos estudos com compósito vidro E/Epoxi.

O estudo atual tem como referência o trabalho realizado por Lucato [2], direcionado para fazer os ensaios de fadiga utilizando a técnica de flexão rotativa, e fazendo a usinagem dos corpos de prova carbono/epoxi em torno conforme a geometria da Figura 1.

De forma complementar, as etapas do mecanismo de fratura dos corpos de prova usinados e polidos de carbono-epoxi unidirecional foram mapeadas conforme os resultados dos ensaios de fadiga.

A seqüência experimental deste estudo pode ser descrita a seguir:

1. Foram realizados os ensaios de tração e flexão para verificar a resistência mecânica;
2. Análise da fração volumétrica de fibras (60%) utilizando Microscopia Eletrônica de Varredura;
3. Foram usinados corpos de prova com ferramentas específicas (diamante monocristalino e PCD), conforme a geometria da figura 1;
4. Foram identificados os defeitos de superfície nos corpos de prova utilizando Microscopia Eletrônica de Varredura;
5. Foram realizados ensaios de fadiga dos corpos de prova usinados e polidos utilizando a técnica de flexão rotativa;
6. Foi mapeado o mecanismo de fratura dos corpos de prova usinados e polidos conforme o resultado prático dos ensaios de fadiga.

Dessa forma, este trabalho atual tem como ponto de partida estudar o compósito carbono-epoxi unidirecional sob ensaios de fadiga por flexão rotativa, e pode-se fazer a projeção para um trabalho futuro de estudar laminados moldados com preformas de fibra de carbono, e com fibras de carbono dispostas em várias direções, se possível até mesmo perpendiculares ao plano principal de reforço (fibras dispostas no sentido da espessura do laminado).

A Figura 2 mostra um exemplo de peça que tem sido solicitada sob efeitos de fadiga e tem geometria com variação de espessura ao longo do

comprimento e com raio de concordância entre estas regiões de espessuras diferentes, e geometria moldada na forma final (perfil de forma final) [3] e esta peça tem similaridades com os corpos de prova deste estudo atual (ver Figura 1).

A geometria dos corpos de prova dos ensaios de fadiga por flexão rotativa tem similaridade com a geometria da peça da Figura 2 em termos de variação de espessura ao longo do comprimento e com raio de concordância entre as regiões de espessuras diferentes.

Além disso, a solicitação de esforço mecânico dos corpos de prova de fadiga por flexão rotativa tem similaridade com os esforços da peça da Figura 2. A aplicação da força (que está relacionada ao Momento Fletor da máquina de ensaio de fadiga por flexão rotativa) coloca a secção transversal do corpo de prova em um estado de flexão, de forma que a superfície superior do corpo de prova está em tração, enquanto que a superfície inferior está sob compressão. Enquanto o corpo de prova gira na máquina de ensaio, qualquer posição sobre a superfície do corpo de prova experimenta estados alternados, em que existe uma máxima tensão de tração e uma máxima de compressão.

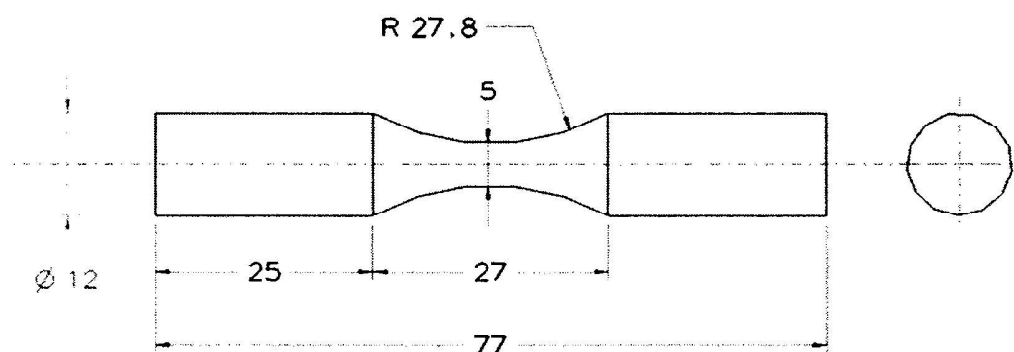


Figura 1: Geometria dos corpos de prova usinados e polidos, que foram testados nos ensaios de fadiga utilizando a técnica de flexão rotativa. As medidas são em milímetros.

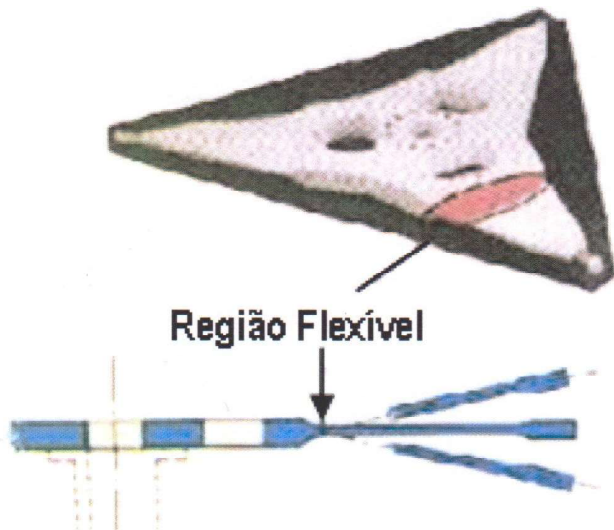


Figura 2: Exemplo de peça produzida com compósito carbono-epoxi com fibras de carbono dispostas em várias direções. Peça componente do rotor de helicóptero - tipo Starflex [3]. Peça moldada na forma final.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Lucato [2], em seu trabalho de doutorado, iniciou o estudo de fadiga de materiais compósitos utilizando a técnica de flexão rotativa. Até então, esta técnica era aplicada para materiais metálicos. Neste trabalho foi realizado um estudo sobre a resistência à fadiga do material compósito vidro E/Epoxi unidirecional, contendo 60% de fibras em volume.

Neste trabalho de Lucato [2], foram usinados corpos de prova do compósito vidro E/Epoxi unidirecional conforme a geometria da Figura 1. Processo de usinagem de perfil de forma utilizando torno.

Foram realizados os ensaios de fadiga com estes corpos de prova em compósito vidro E/Epoxi unidirecional utilizando a técnica de flexão rotativa, e o resultado dos ensaios de fadiga foi o desenvolvimento da curva S/N (tensão x número de ciclos até fratura) conforme mostram as Figuras 3 e 4.

Frequência dos ensaios de fadiga por flexão rotativa do trabalho de Lucato [2]: 30 Hz.

| Esforço Momento Fletor (Lb x in) | Tensão dinâmica alternada à flexão (MPa) | OBSERVAÇÕES (em Nc) |
|--|--|--|
| 35,0 | 318,5 | 3040 4750 6080 |
| 32,5 | 295,7 | 4370 4760 8075 |
| 30,0 | 273,0 | 6840 7600 7980 |
| 27,5 | 250,2 | 9025 9690 12065 |
| 25,0 | 227,5 | 14440 14630 16340 |
| 22,5 | 205,0 | 19000 23655 28310 |
| 21,5 | 195,6 | 81700 87400 114950 |
| 21,0 | 191,0 | 53390 54720 78850 |
| 20,0 | 182,0 | 107255 129865 141740 |
| 19,5 | 177,5 | 206150 237120 289750 |
| 19,0 | 173,0 | 2198000 2912000 3463000 4567000 8251000 8702000 |
| 18,5 | 168,3 | 10000000 10000000 10000000 10000000 10000000 100000000 100000000 |

Figura 3: Dados experimentais:

Dados experimentais dos ensaios de fadiga por flexão rotativa do compósito vidro E/Epoxi do trabalho de Lucato [2] pag 5-13. (Momento Fletor, tensão dinâmica à flexão e número de ciclos até a fratura).

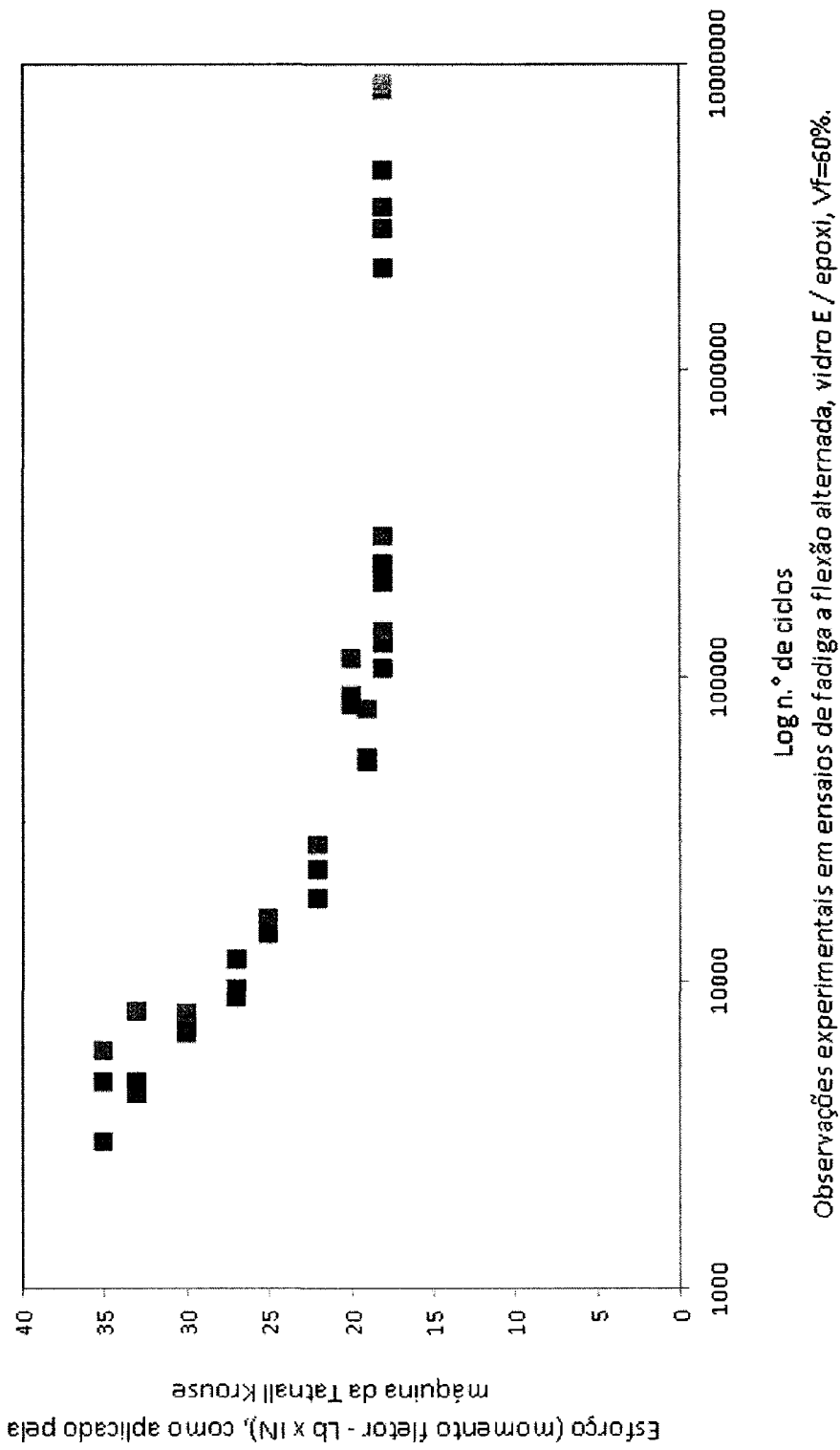


Figura 4: Exemplo de curva S/N desenvolvida no trabalho de Lucato [2], pag 5-14 (dados experimentais da Figura 3)

As contribuições deste trabalho foram:

- 1) ter iniciado o estudo de fadiga por flexão utilizando material compósito Vidro E/Epoxi, unidirecional, com corpos de prova usinados, com corte transversal às fibras contínuas (usinagem de forma);
- 2) utilização da técnica de fadiga por flexão rotativa, porque esta técnica era utilizada somente para materiais metálicos;
- 3) esta tese de doutorado serviu como modelo para o trabalho atual;

Santhanakrishnan [4] e outros realizaram operações de usinagem de superfície sobre plásticos reforçados com fibras de vidro ("PRFV"), plásticos reforçados com fibras de carbono ("PRFC") e plásticos reforçados com fibras de Kevlar ("PRFK"), para estudar a superfície usinada em aplicação como superfície de fricção.

Quanto à rugosidade superficial e morfologia, é conhecido que durante a usinagem de compósitos reforçados por fibras, a textura superficial está associada com a deformação até a fratura e ruptura das fibras.

Resultados:

1-Explicou-se que as fibras de carbono rompem por fratura frágil gerando uma superfície lisa. As fibras de carbono são frágeis, e tem mínima deformação até ruptura.

2-No caso do PRFV, pelo fato das fibras de vidro serem menos frágeis e terem maior taxa de deformação que o carbono, observou-se maior arrancamento de material em termos de fibras e de matriz na superfície usinada de Vidro-Epoxi do que na superfície usinada com fibras de carbono.

3-Quanto ao PRFK, apresentou textura superficial com delaminações, muitas fibras soltas, e fibras alongadas enroladas entre si. Explica-se este fato pelas fibras de Kevlar terem maior deformação até ruptura.

4-Os valores da rugosidade superficial média (R_a) e da rugosidade total (R_t) foram de 1,5 e 15 μm , respectivamente, para o compósito com fibra de carbono; para o compósito com fibra de vidro, os valores de rugosidade média e rugosidade total foram de 2,8 e 30 μm para o compósito com fibras de Kevlar,

Suas principais conclusões foram:

1. As fibras de carbono rompem por fratura frágil durante a usinagem de PRFC. Esta rigidez favoreceu melhor textura superficial, comparando com os outros compósitos.
2. Superfícies usinadas de PRFK mostraram acabamento superficial inferior, devido ao alongamento das fibras de Kevlar.

A Figura 5 mostra micrografias da superfície usinada de compósitos com fibras de vidro, fibras de carbono e com fibras de Kevlar.

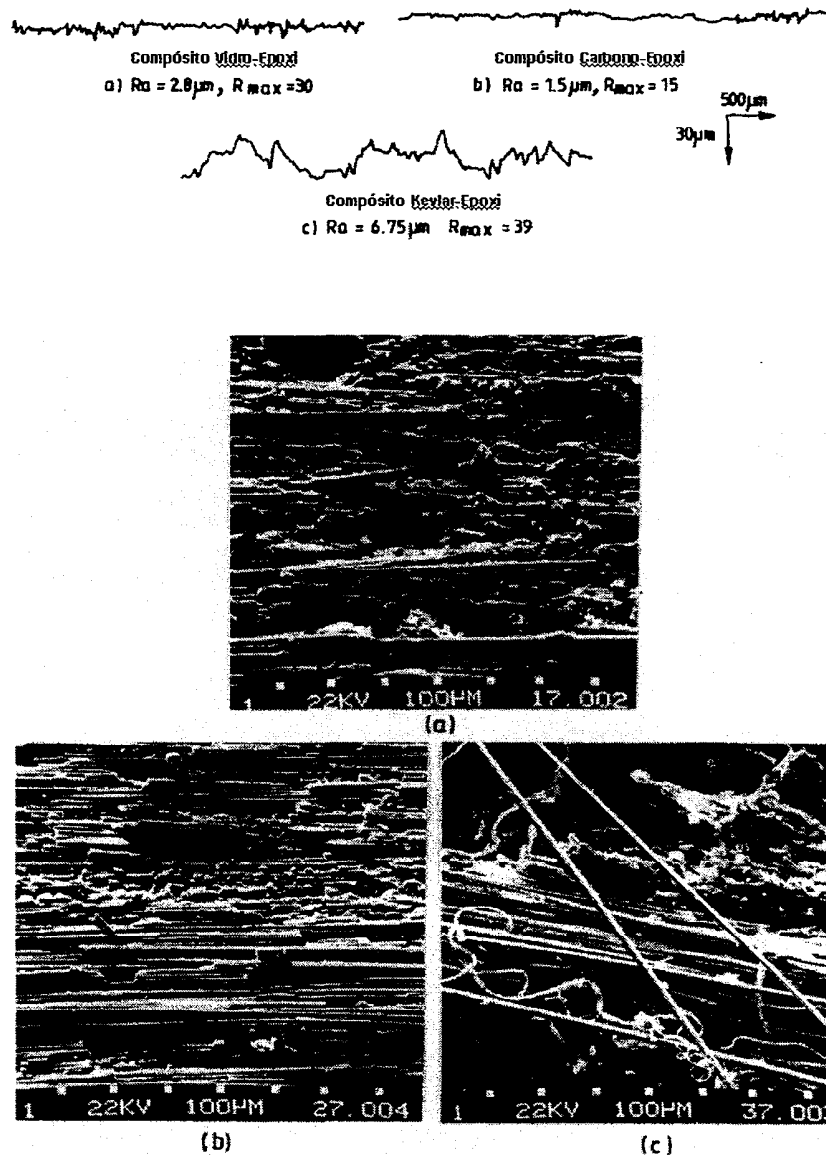


Figura 5: Micrografias da superfície usinada de compósitos: a) com fibras de vidro, b) com fibras de carbono e c) com fibras de Kevlar.

Pardini [5] mostrou que os compósitos estruturais obtiveram um ganho significativo na resistência à delaminação e na tenacidade à fratura interlaminar com o desenvolvimento e utilização de preformas multidirecionais.

Os compósitos podem ser obtidos com resistência ao cisalhamento e à fratura interlaminar utilizando preformas costuradas, e esta costura estaria na direção da espessura do laminado.

Com esta flexibilidade de orientação de fibras das preformas costuradas na direção da espessura do laminado, as propriedades dos compósitos estruturais podem se ajustar aos requisitos de projeto.

A figura 6 mostra um exemplo de preforma costurada no sentido da espessura do laminado.

A Figura 7 mostra um gráfico com resultados de resistência ao cisalhamento interlaminar para compósitos obtidos com preformas de fibras de carbono.

O gráfico mostra que após a máxima tensão de cisalhamento o compósito continua a se deformar significativamente.

Para efeito de comparação, compósitos unidirecionais de fibra de carbono tem resistência ao cisalhamento de aproximadamente 60 MPa e falham com com redução abrupta da tensão à deflexões de 0,5mm.

Os resultados do gráfico indicam que embora não tenha ocorrido um aumento no valor da resistência ao cisalhamento interlaminar, a capacidade do material de se deformar aumentou significativamente sem ocorrência de modo de fratura frágil.

As fibras posicionadas na direção de reforço perpendicular ao plano de reforço principal, incorporação de fibras através da espessura, podem estar atuando como concentradores de tensão.

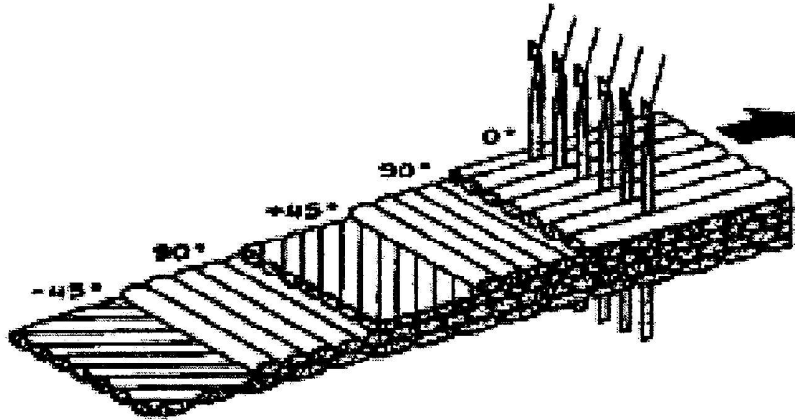


Figura 6: Exemplo de construção de uma preforma multi-axial costurada no sentido da espessura do laminado.

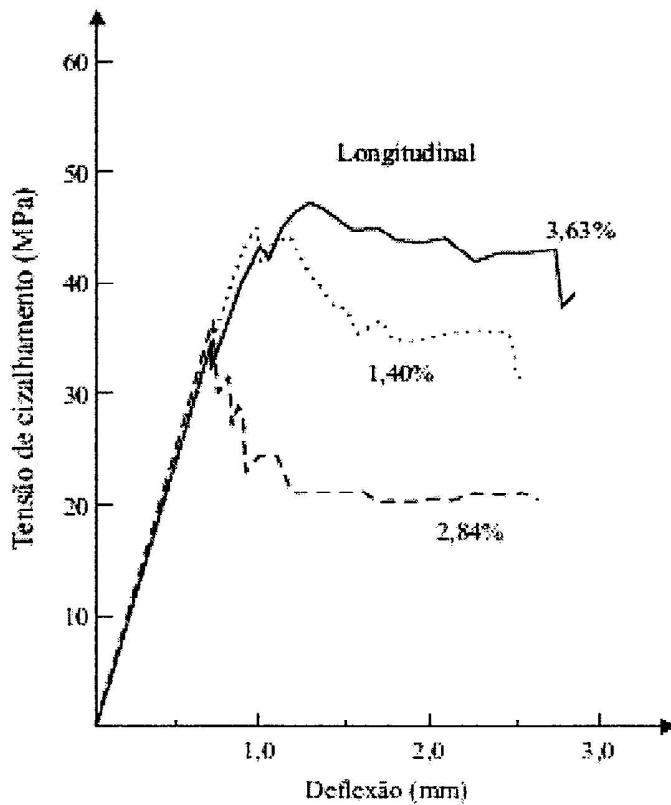


Figura 7: Gráfico típico de tensão de cisalhamento interlaminar em função da deflexão para compósito carbono-epoxi construído com preformas. As porcentagens se referem à direção de reforço perpendicular ao plano de reforço principal.

3 FABRICAÇÃO DO COMPÓSITO EPOXI/FIBRA DE CARBONO

Este compósito foi fabricado a partir de um empilhamento de lâminas ("tapes") unidirecionais pré-impregnados, compostos de resina Epoxi e Fibra de Carbono.

Construiu-se uma placa de 750 x 1700 x14 mm, unidirecional segundo o eixo maior, possuindo em cada face tecido de carbono bidirecional para garantir a estabilidade no manuseio.

Para se evitar variáveis indesejadas introduzidas nos corpos de prova, o empilhamento do laminado foi feito alternando-se os lotes, e isso garantiu a homogeneidade.

Também foi feito um só ciclo de cura, em autoclave, para garantia de que o ciclo Pressão-Temperatura-Tempo fosse o mesmo para todos os corpos de prova.

Após curada, a placa foi submetida à análise de defeitos (Ultrasom).

Os corpos de prova foram obtidos a partir de "tabletes" de 14x14x100 mm, que por sua vez foram obtidos por usinagem (corte), através de disco diamantado, a partir da placa laminada. A velocidade de corte foi 6000 rpm, com refrigeração a ar (Lucato [9], 1996).

4 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MICROESTRUTURAL

4.1 Verificação experimental da fração volumétrica de fibras ϕ_{vf}

O objetivo foi a verificação experimental da fração volumétrica de fibras no compósito, e então conferir com o valor fornecido pelo fabricante (60%).

Para determinação da fração volumétrica de fibras neste compósito epoxi/fibra de carbono empregou-se Microscopia Eletrônica de Varredura com análise de imagens. Empregou-se um microscópio eletrônico de varredura PHILIPS FEG XL 30 do Laboratório de Caracterização Estrutural do DEMa/UFSCar.

Preparou-se as amostras de diferentes tabletes, cortando perpendicularmente às fibras. Estas amostras foram submetidas às lixas nº 240, 320, 400 e 600, nesta ordem. Posteriormente, fez-se o polimento em óxido de cromo.

As figuras 8a e 8b mostram regiões de observação com menor e maior densidade de fibras de carbono, respectivamente. Além disso, mostram detalhes importantes da estrutura do compósito, principalmente a adesão interfacial fibra-matriz, uma vez que não há vazios ou defeitos em torno das fibras.

Através das figuras 8a e 8b pode-se ver as fibras de carbono muito bem definidas no meio da matriz de epoxi, isso possibilitou medidas precisas do diâmetro médio e área das fibras.

Para medir os valores do diâmetro médio e da fração volumétrica das fibras foi utilizado o analisador de imagens Quantimet 600 - Leica do CCDM/UFSCar.

Os resultados experimentais obtidos foram:

Diâmetro médio de fibras = $6,72 \pm 0,20$ microns;

Fração Volumétrica de fibras = $63,10 \pm 4,16\%$;

Este valor experimental de $63,10 \pm 4,16\%$ está de acordo com o valor fornecido pelo fabricante: 60%.

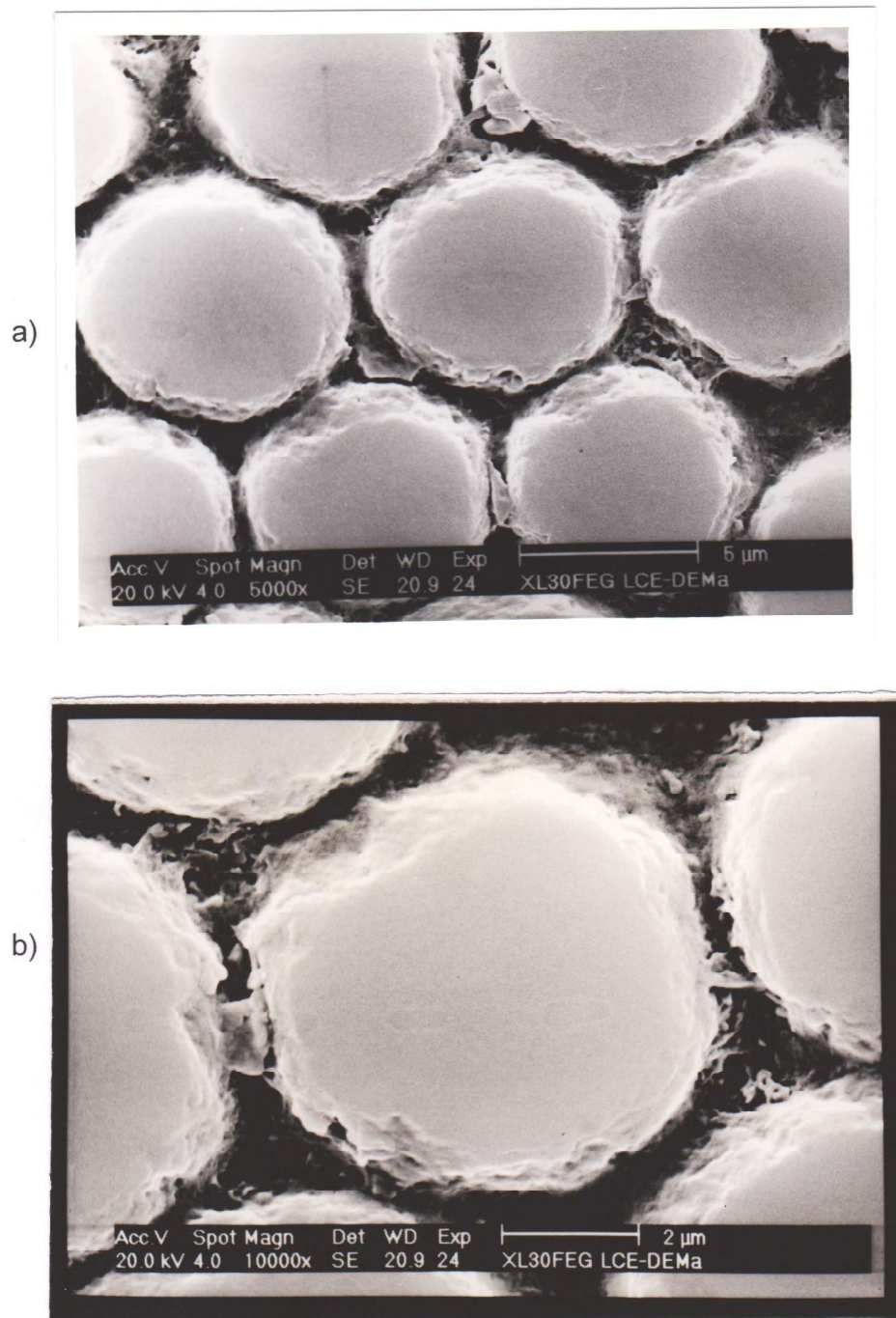


Figura 8: Micrografia mostrando as fibras de carbono de topo em a) e b).

5 PROPRIEDADES MECÂNICAS

5.1 Ensaio de Flexão em três pontos

O objetivo do ensaio de flexão em três pontos foi verificar experimentalmente o Módulo de Rigidez e a Tensão de Ruptura em flexão deste material carbono-epoxi unidirecional.

O ensaio de flexão em 3 pontos é normalizado pela ASTM D 790 [13].

As condições deste ensaio foram velocidade de travessão 2 mm/min., distância entre os apoios inferiores de 80 mm e as dimensões dos corpos de prova foram comprimento = 100 mm, largura = 13 mm e espessura = 4,8 mm.

A máquina de ensaio INSTRON modelo 5505, do laboratório de ensaios mecânicos do Departamento de Engenharia de Materiais da UFSCar, o corpo de prova sendo ensaiado, e o gabarito de ensaio de flexão em 3 pontos conforme a norma ASTM D 790, podem ser observados na figura 9.

Os valores experimentais das propriedades mecânicas podem ser vistos na tabela 1.

A figura 10 mostra o gráfico de tensão x deformação até a ruptura.

Os valores médios de Tensão de Ruptura e Módulo de Rigidez atingiram $1303 \pm 87,7$ MPa e $106 \pm 7,3$ GPa, respectivamente. A deformação até a ruptura foi cerca de 1,3%.

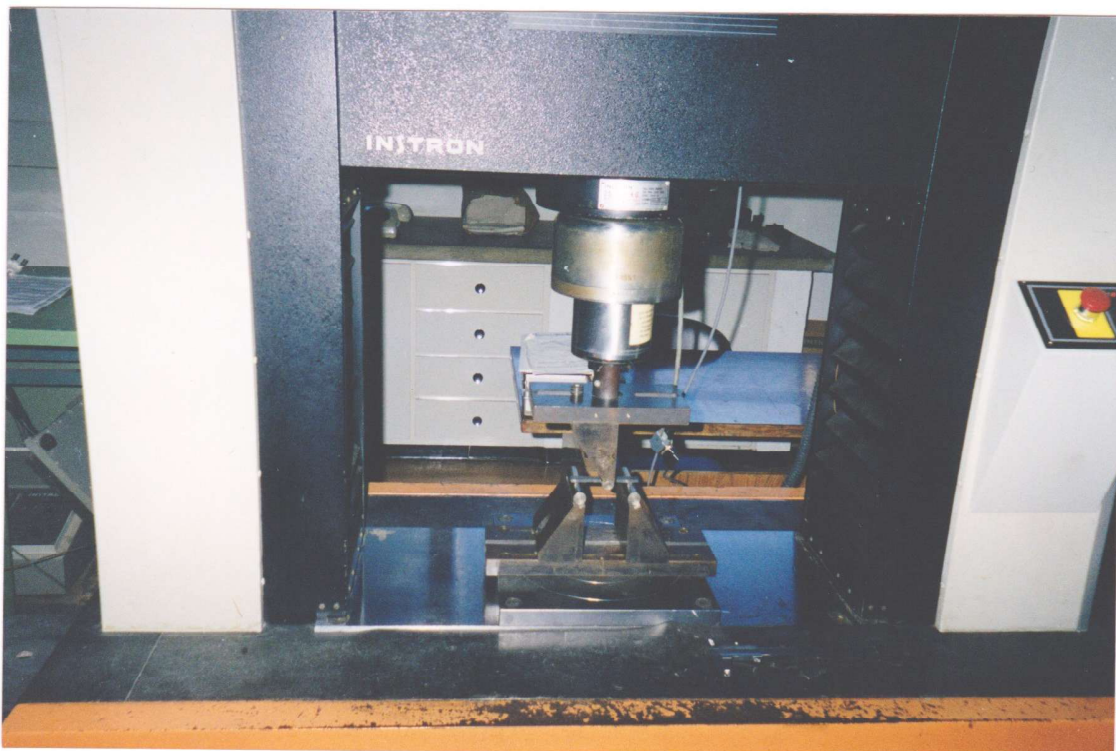


Figura 9: Máquina universal INSTRON de ensaios mecânicos, modelo 5505. Mostra o ensaio de flexão em 3 pontos. DEMa/UFSCar.

Tabela 1: Valores das propriedades mecânicas em flexão de 3 pontos.

| | Tensão de Ruptura (MPa) no ensaio de flexão 3 pontos (ASTM D 790) | Módulo de Rigidez (GPa) no ensaio de flexão 3 pontos (ASTM D 790) |
|------------|--|---|
| Amostra 1 | 1372 | 107 |
| Amostra 2 | 1367 | 114 |
| Amostra 3 | 1274 | 108 |
| Amostra 4 | 1295 | 109 |
| Amostra 5 | 1170 | 94 |
| Amostra 6 | 1299 | 107 |
| Amostra 7 | 1132 | 90 |
| Amostra 8 | 1417 | 111 |
| Amostra 9 | 1314 | 111 |
| Amostra 10 | 1387 | 107 |
| Média | 1303± 87,7 | 106± 7,3 |

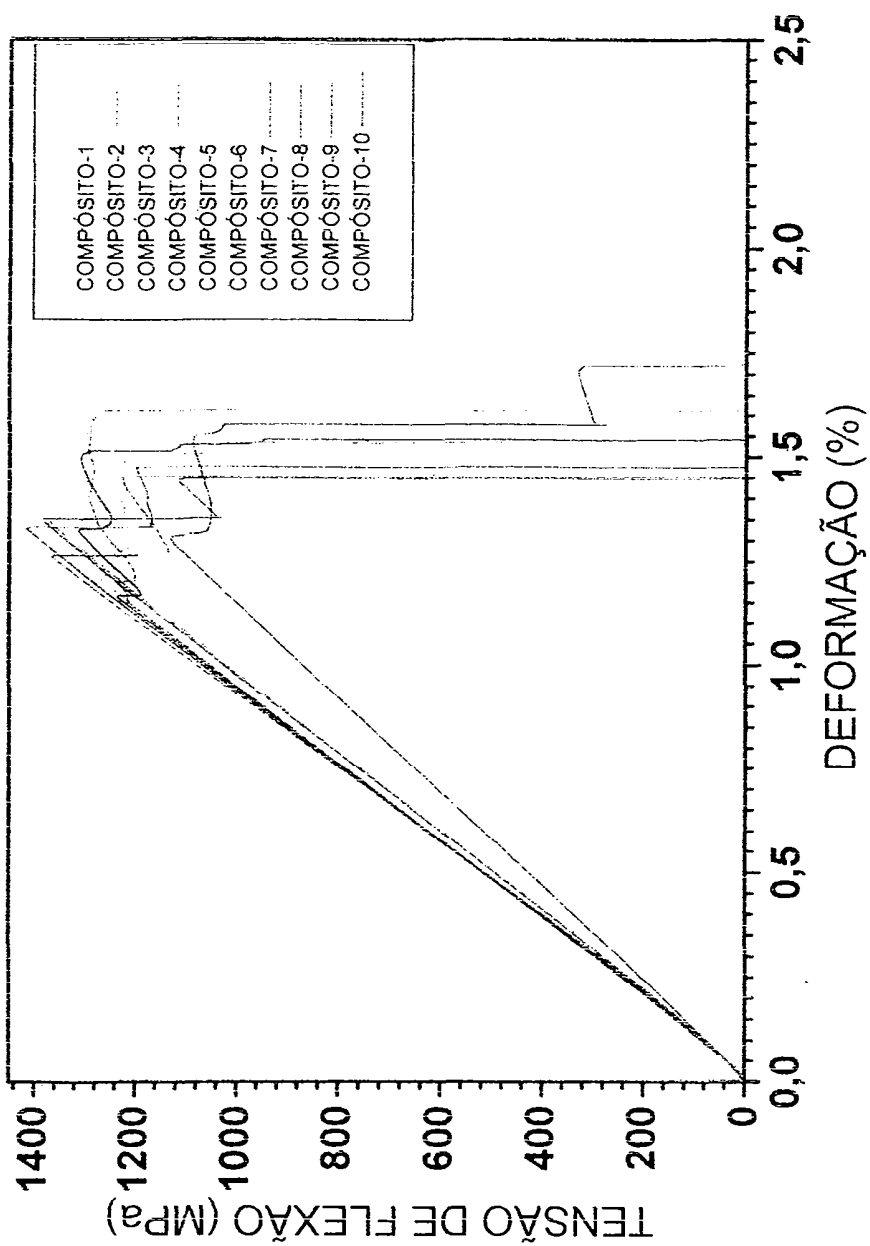


Figura 10: Curva tensão x deformação referente à dez corpos de prova do material carbono-epoxi, ensaiadas sob flexão em 3 pontos, conforme a norma ASTM D790.

5.2 Ensaio de Tração

O objetivo do ensaio de tração foi verificar experimentalmente a Resistência Máxima em tração e Módulo de Elasticidade.

Foi realizado segundo a norma ASTM D 3039. Dimensões dos corpos de prova: comprimento = 100 mm, largura 12,7 mm, espessura da alma = 0,6 mm e espessura dos "tabs" = 1,5 mm, comprimento dos "tabs" = 33 mm e a velocidade do ensaio de 0,4 mm/min.

O equipamento utilizado no ensaio de tração foi a máquina de ensaio universal INSTRON, modelo 5505, do Laboratório de Ensaios Mecânicos do DEMa/UFSCar. Utilizou-se também um extensômetro mecânico, para medida do Módulo de Elasticidade real do compósito.

A figura 11 exemplifica o arranjo experimental do ensaio de tração.

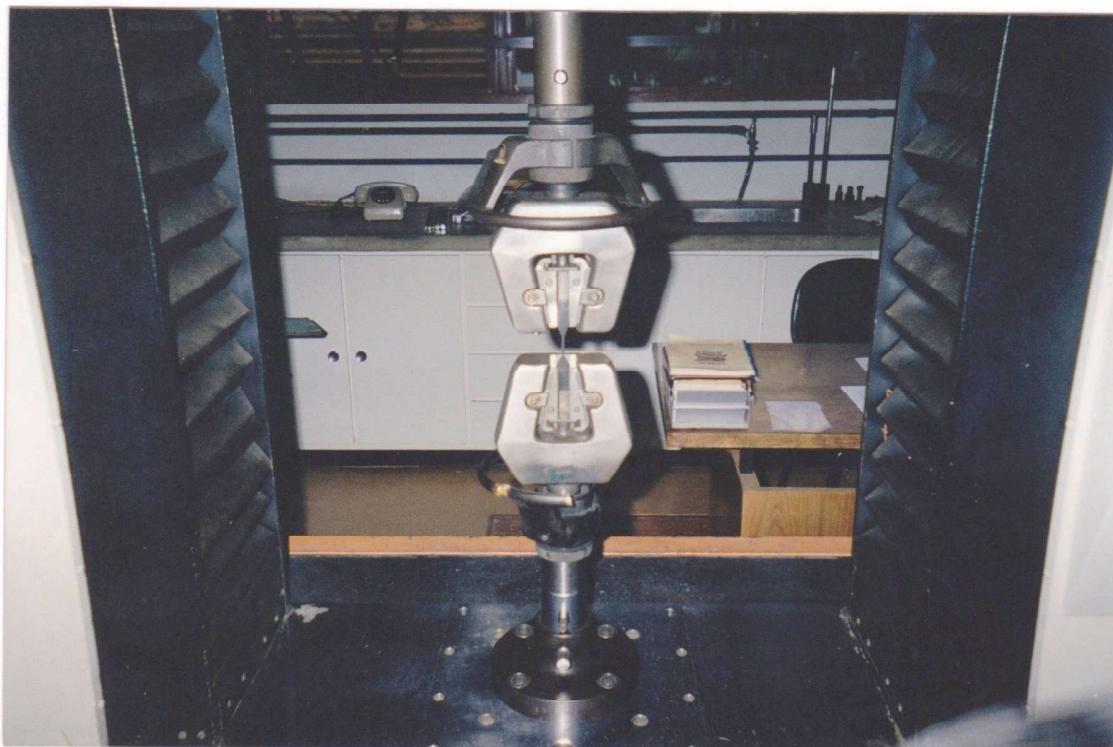


Figura 11: Máquina de ensaios mecânicos universal INSTRON, modelo 5505. Mostra o ensaio de tração. DEMa/UFSCar.

Os valores experimentais referentes à Resistência Máxima em tração e ao Módulo de Elasticidade podem ser vistos na tabela 2. O Módulo de Elasticidade foi obtido até 0,5% de deformação, com uso de extensômetro.

Tabela 2: Valores das propriedades mecânicas em tração

| | Resistência Máxima (MPa) obtida no ensaio de tração ASTM D 3039 | Módulo de Elasticidade (GPa) obtido no ensaio de tração ASTM D 3039 |
|-----------|--|--|
| Amostra 1 | 1242 | 100 |
| Amostra 2 | 1493 | 94 |
| Amostra 3 | 1384 | 102 |
| Média | 1373±103 | 99±3,4 |

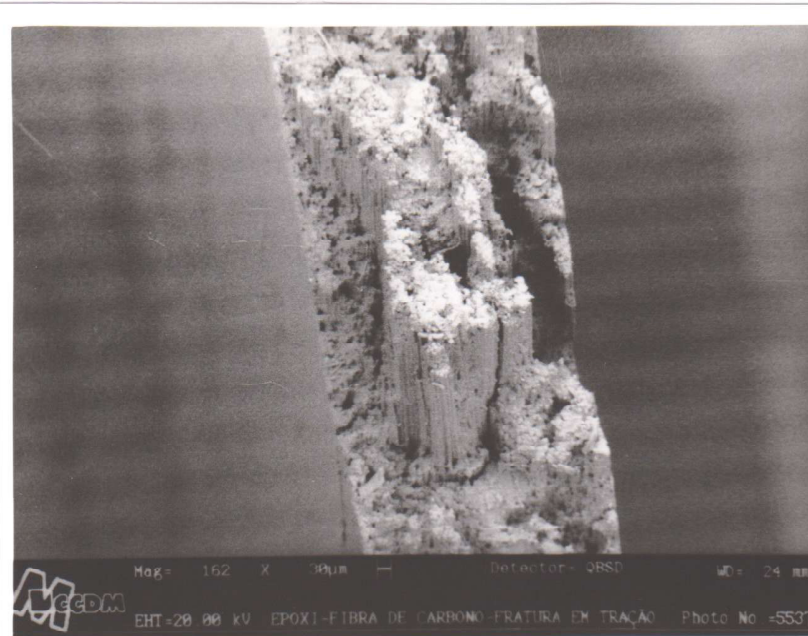
Dessa forma, os valores experimentais médios são Resistência Máxima 1373±103 MPa e o Módulo de Elasticidade 99 ±3,4 GPa.

Estes valores obtidos caracterizam um material de elevada Resistência Máxima.

A figura 12 mostra a superfície de fratura sob tração obtidas por Microscopia Eletrônica de Varredura.

Através da figura 12 verifica-se a adesão interfacial entre fibra e matriz. Não há fibras de carbono descoladas da matriz epoxi.

(a)



(b)



Figura 12: Micrografias da fratura sob tração. Em (a) tem-se a superfície de fratura com arrancamento de blocos de fibra com matriz. Em (b) mostra-se que não há vazios entre fibra e matriz .

6 USINAGEM DO CARBONO-EPOXI

As etapas de trabalho podem ser listados como segue:

-Usinar corpos de prova com ferramentas específicas (diamante monocristalino, PCD), usinar conforme a geometria da figura 1;

- Preparar corpos de prova polidos;
- Verificar os defeitos introduzidos na superfície dos corpos de prova;
- Verificar características do pó gerado na usinagem do carbono-epoxi;

Quanto aos recursos de máquina, foi utilizado um torno CNC (comando numérico computadorizado) marca NARDINI modelo FAST TRACE, pertencente à Universidade Federal de São Carlos - UFSCar. A figura13 mostra este equipamento.

Quanto à forma original da matéria-prima carbono-epoxi, eram tabletes com 14x14x100 mm.

Quanto à forma final da matéria-prima carbono-epoxi, os tabletes foram usinados conforme a geometria da figura 1. Obteve-se corpos de prova usinados na geometria para os ensaios de fadiga (técnica por flexão rotativa).

Quanto aos parâmetros de máquina da fase de acabamento dos corpos de prova usinados, foram os seguintes:

- rotação do torno: 3000 rpm;
- profundidade de corte: 0,1 mm; última estapa: 0,05mm;
- avanço: 0,015 mm/volta;

Quanto à descrição das ferramentas de corte utilizadas, temos:

- diamante monocristalino;
- diamante policristalino (PCD);

Quanto aos detalhes geométricos das ferramentas de corte, a tabela 3 informa o ângulo de folga, o ângulo de saída e o raio da extremidade.

Tabela 3: Dados da geometria das ferramentas de corte.

| | Diamante Monocristalino | Diamante Policristalino (PCD) |
|---------------------|-------------------------|-------------------------------|
| Ângulo de folga | 10° | 7° |
| Ângulo de saída | -6° | 0° |
| Raio da extremidade | 1,5 mm | 0,4 mm |

Quanto ao polimento, o procedimento pode ser descrito como segue:

- partiu-se de alguns corpos de prova usinados com diamante policristalino;
- foram aplicadas as lixas n.180, 240, 320 e 400 nesta seqüência, a seco;
- para se obter uma superfície espelhada, o polimento foi concluído aplicando óxido de cromo.

Quanto à rugosidade superficial, separou-se os corpos de prova polidos e os corpos de prova usinados com as ferramentas de diamante. A tabela 4 mostra medidas de rugosidade aparente (R_a) e rugosidade total (R_t).

Tabela 4: Valores de rugosidade superficial (R_a) e (R_t).

| | Superfície Polida | | Superfície usinada com diamante monocristalino | | Superfície usinada com diamante policristalino (PCD) | |
|-----------------------------|-------------------|-------|--|-------|--|-------|
| | R_a | R_t | R_a | R_t | R_a | R_t |
| 1ª medida (μm) | 0,07 | 0,56 | 0,13 | 1,02 | 0,27 | 2,22 |
| 2ª medida (μm) | 0,06 | 0,38 | 0,48 | 3,31 | 0,84 | 5,17 |
| 3ª medida (μm) | 0,06 | 0,42 | 0,62 | 3,44 | 0,54 | 4,83 |
| 4ª medida (μm) | 0,06 | 0,40 | 0,43 | 3,35 | 0,63 | 4,69 |
| Média (μm) | 0,06 | 0,44 | 0,41 | 2,78 | 0,57 | 4,22 |

Através da figura 14 pode-se observar a aresta de corte da ferramenta de diamante policristalino e a aresta de corte da ferramenta de diamante monocristalino.

Resultados da análise das superfícies observadas através de Microscopia Eletrônica de Varredura:

1-Sobre a superfície dos corpos de prova usinados com a ferramenta de diamante policristalino :

1.1- superfície foi caracterizada nas micrografias da figura 15.

1.2-os defeitos superficiais foram:

a) corte das fibras contínuas;

b) foi observado evidências de arrancamento de matriz epóxi em torno de pontas de fibras cortadas;

2- Sobre a superfície dos corpos de prova usinados com a ferramenta de diamante monocristalino:

2.1- superfície foi caracterizada nas micrografias da figura 16.

2.1- os defeitos superficiais foram:

a) corte das fibras contínuas;

b) foi observado menos evidências de arrancamentos de matriz epóxi em torno de pontas de fibras cortadas;

3- Sobre a superfície dos corpos de prova que foram polidos:

3.1- superfície foi caracterizada nas micrografias da figura 17.

3.2- os defeitos superficiais foram:

a) foi observada uma superfície espelhada, porém, de qualquer maneira, permaneceram as fibras cortadas.

4- Sobre a caracterização do pó gerado da usinagem utilizando a ferramenta de diamante monocristalino está registrada nas micrografias da figura 18.

-neste caso, o pó da usinagem do carbono-epoxi é constituído por partes de fibras que foram cortadas.



Figura 13: Usinagem dos corpos de prova por processo de Torno.

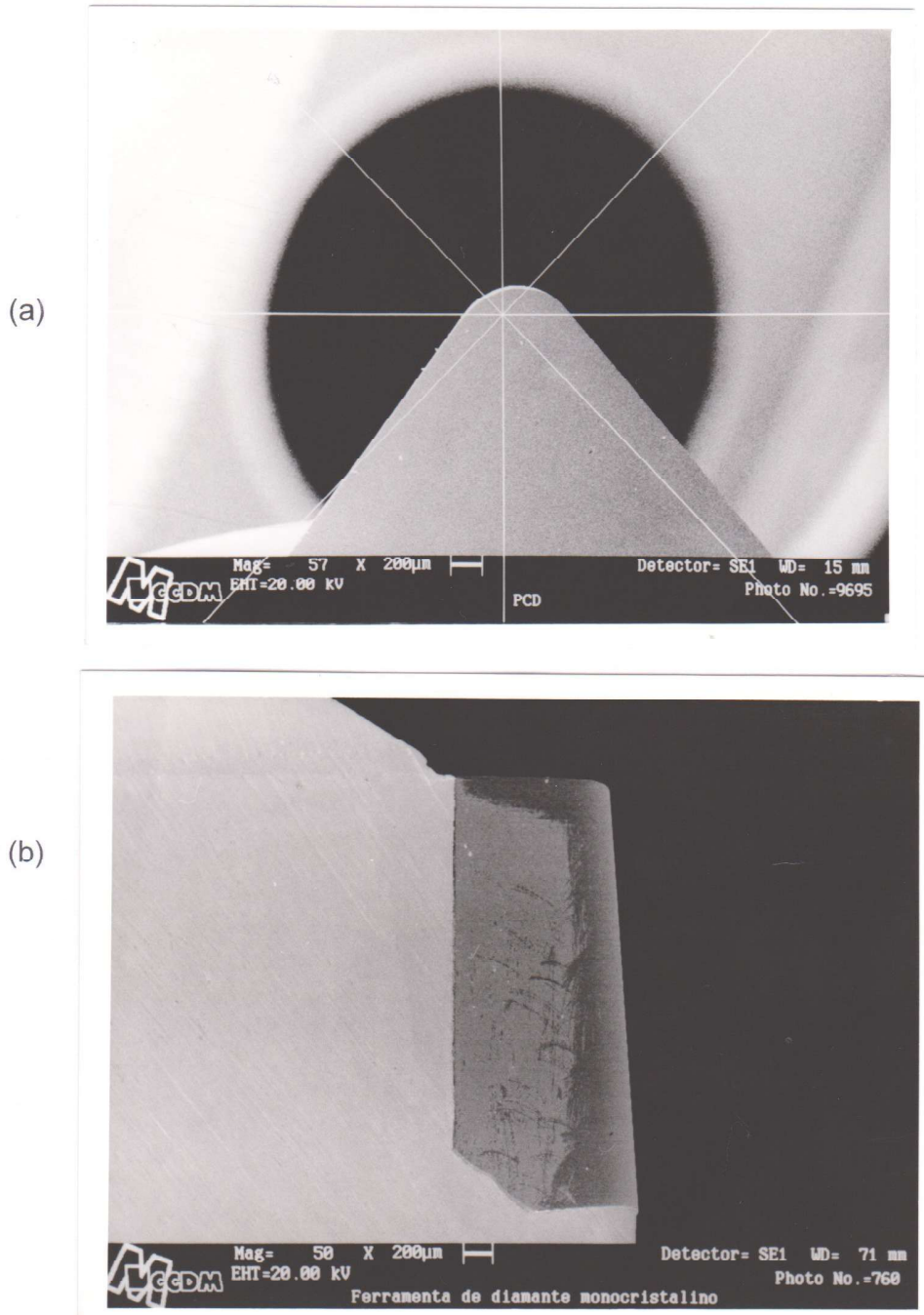


Figura 14: Em a: micrografias da aresta de corte da ferramenta de diamante policristalino. Em b: micrografia da aresta de corte da ferramenta de diamante monocristalino.

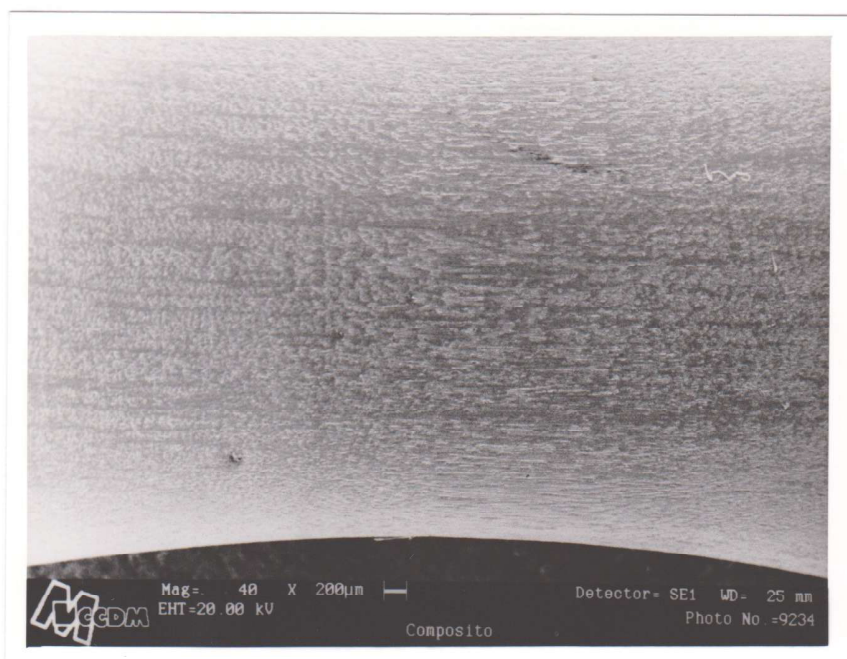


Figura 15: Esta micrografia mostra a superfície usinada com a ferramenta de diamante policristalino, PCD. A área observada é a secção mínima do corpo de prova.

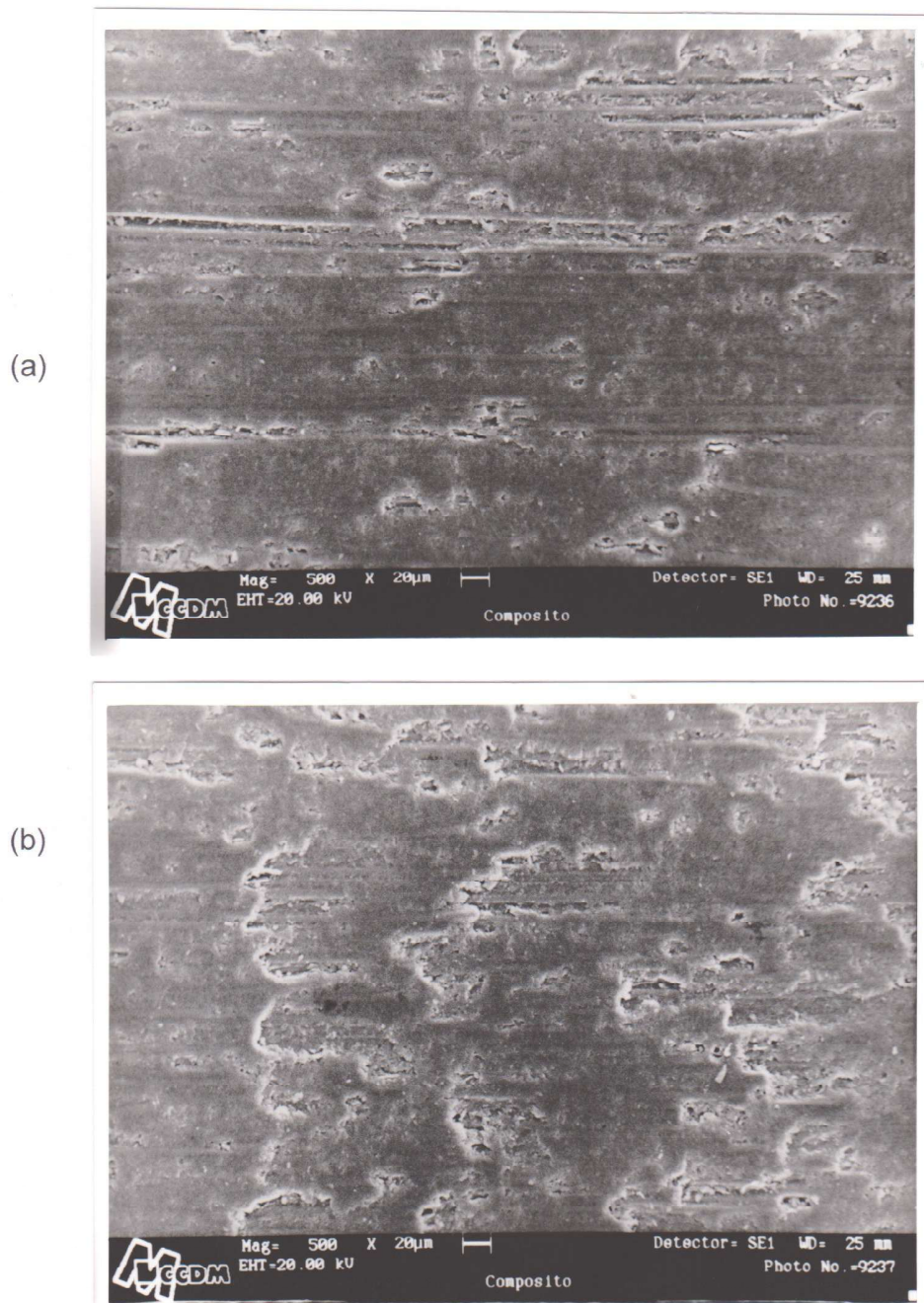
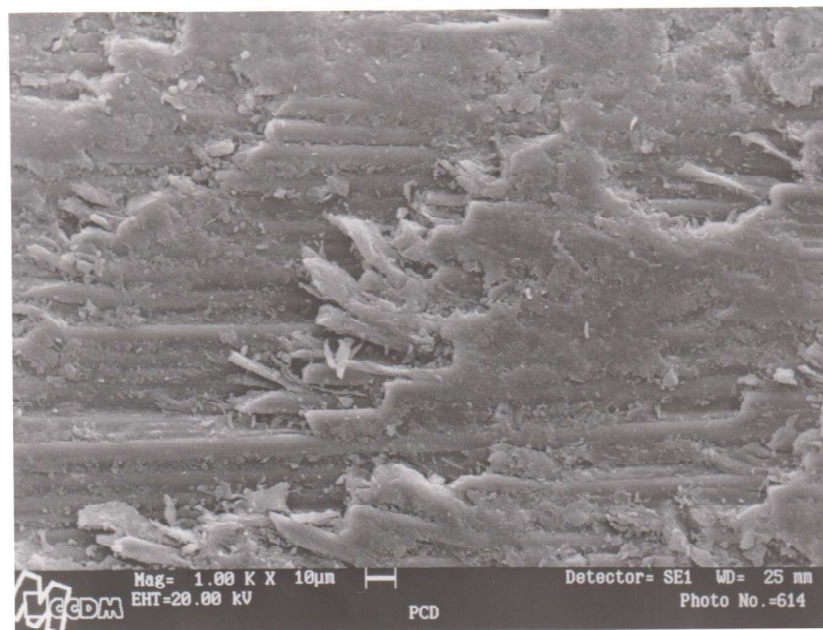


Figura 16: Micrografias destacando marcas de arrancamento de pedaços de fibras de carbono e matriz da superfície usinada com PCD.

(a)



(b)

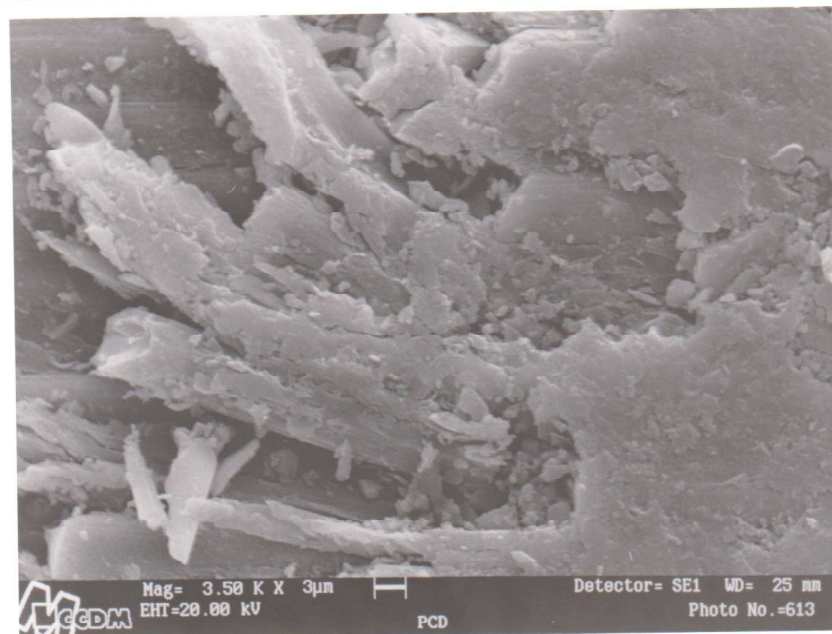


Figura 17: Micrografias da superfície usinada com PCD. Em (a) mostra-se uma região de arrancamento de matriz em torno de pontas de fibras cortadas; em (b) destaca o defeito em (a) provocado pela usinagem com PCD.

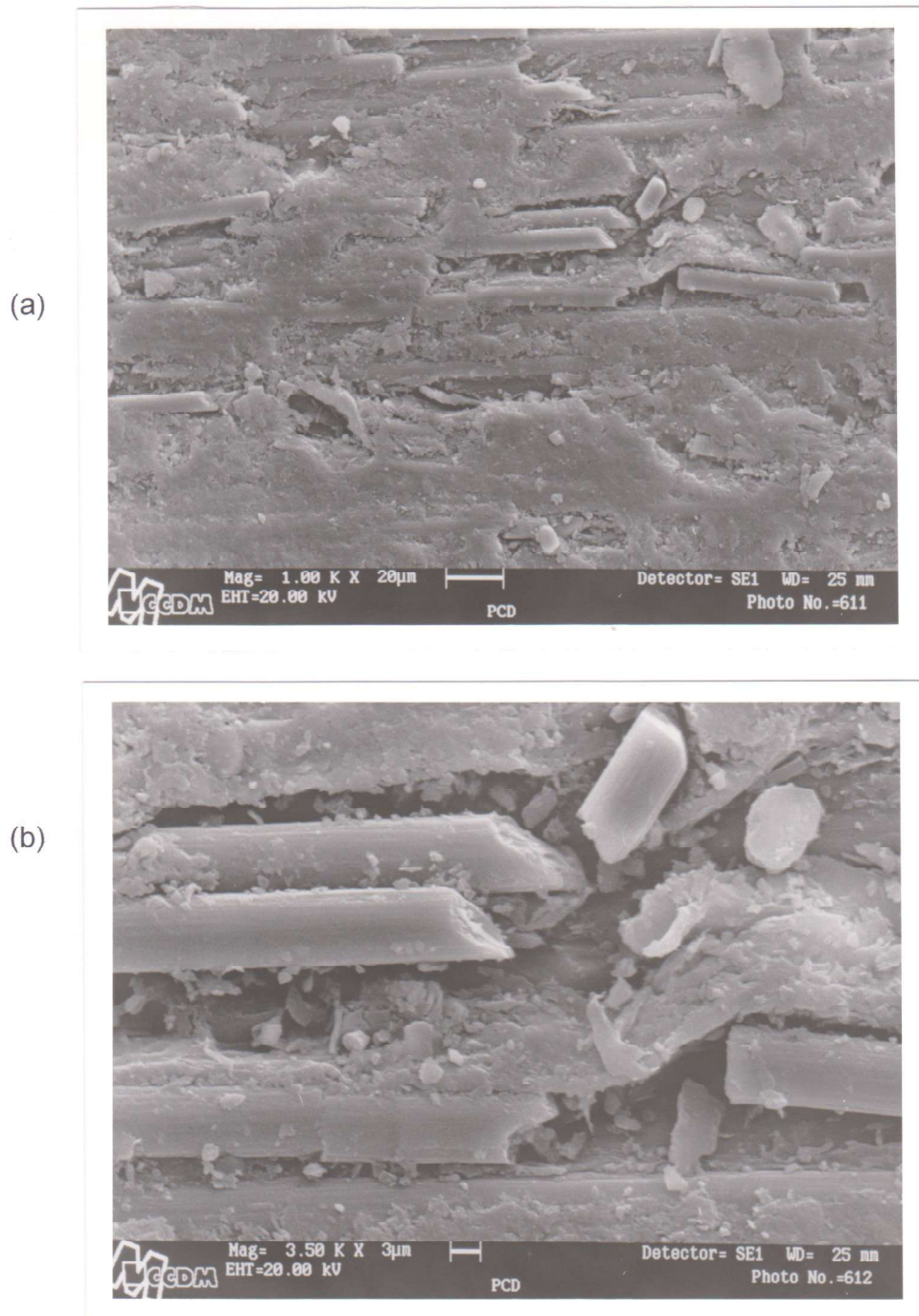


Figura 18: Micrografias da superfície usinada com PCD. Em (a) mostra-se outra região de arrancamento de matriz em torno de pontas de fibras formando microcrateras (vazios); em (b) mostra uma ampliação deste defeito.

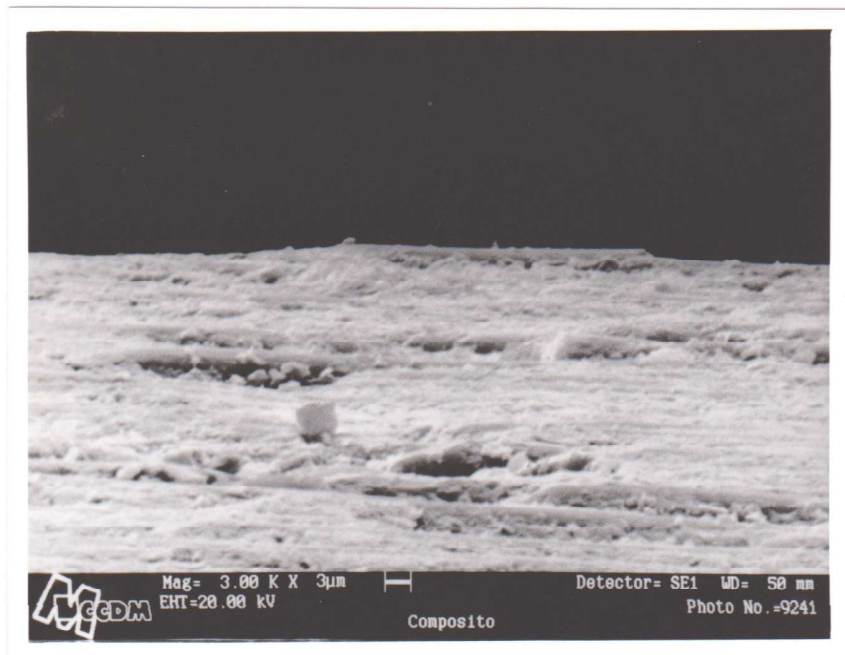


Figura 19: Micrografia da superfície usinada com PCD. Mostra uma fibra de carbono contínua que foi cortada e o arrancamento de parte desta fibra.

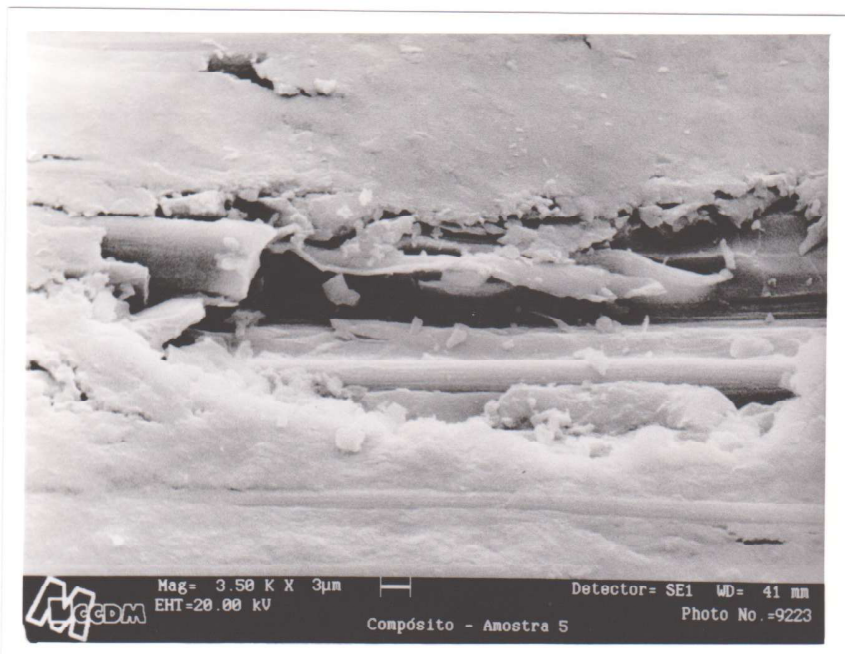


Figura 20: Micrografia da superfície usinada com PCD, com vista de perfil.

Através da figura 20 pode-se observar o relevo da superfície usinada com PCD.

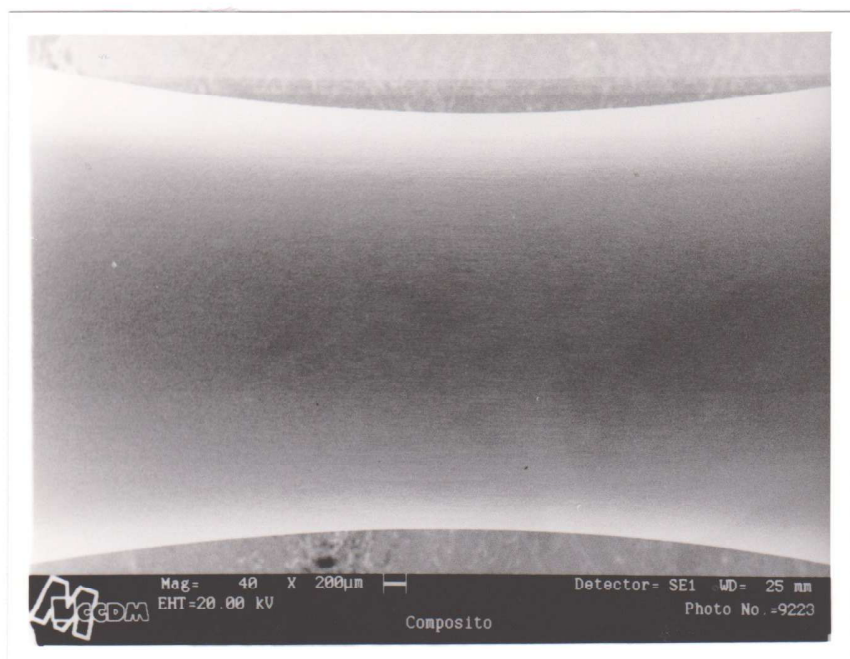


Figura 21: Micrografia mostrando uma superfície polida.

A figura 21 destaca o polimento realizado sobre uma superfície usinada com PCD. Pode-se observar que não há marcas de usinagem na superfície polida. Por este aspecto, o polimento foi muito eficiente.

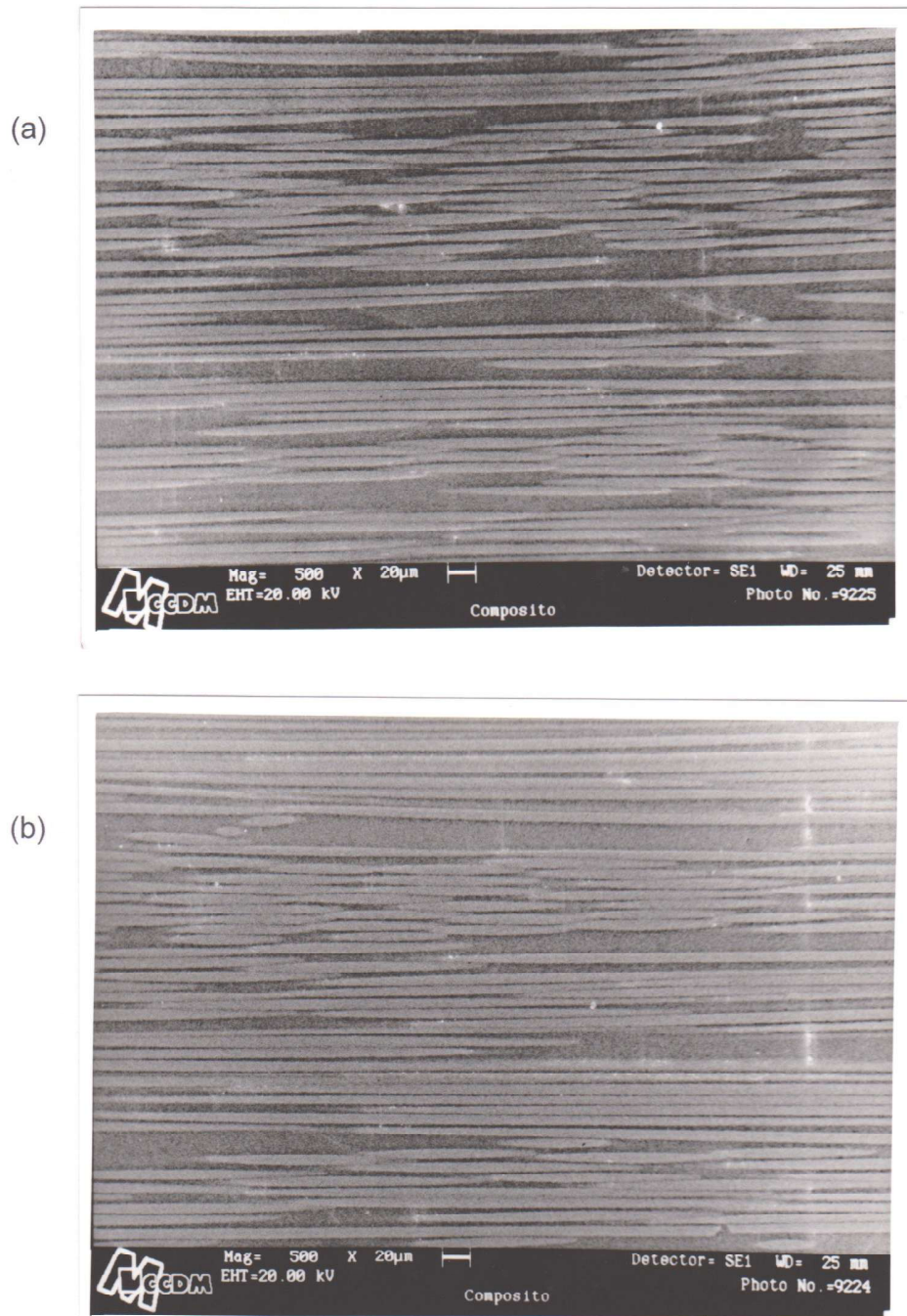


Figura 22: As micrografias (a) e (b) mostram a grande quantidade de fibras cortadas na superfície polida.

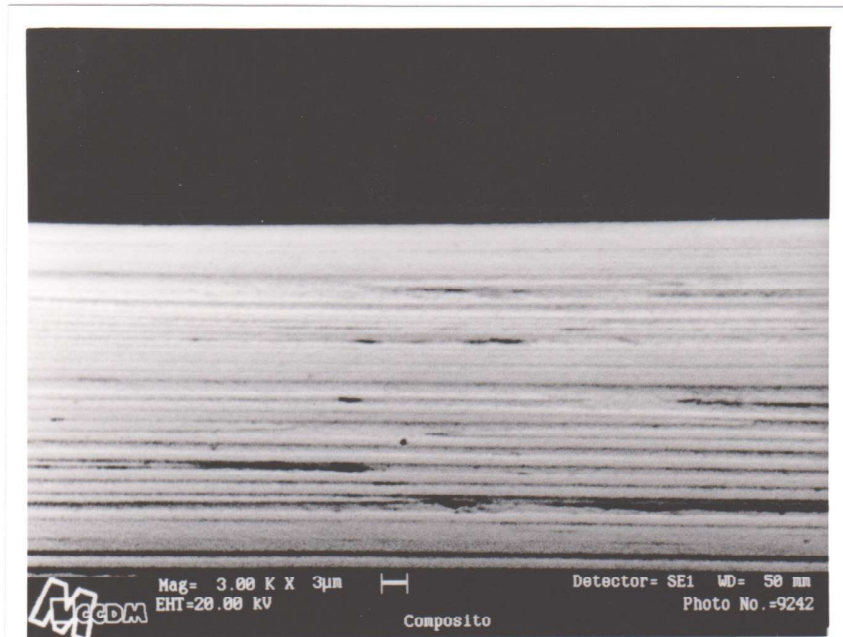


Figura 23: Micrografia da superfície polida. Vista de perfil.

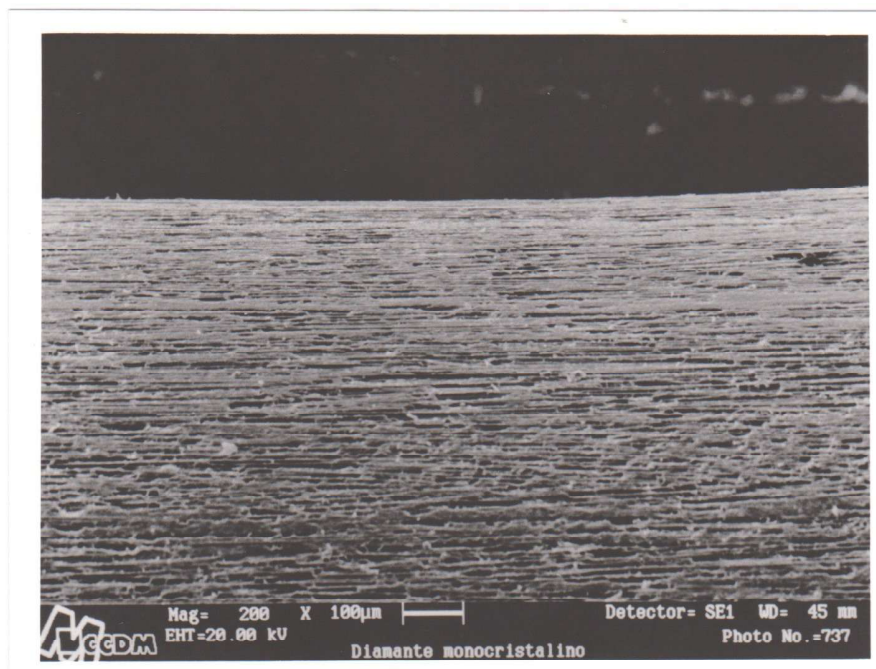


Figura 24: Micrografia mostrando o aspecto da superfície usinada com a ferramenta de diamante monocristalino.

Através da figura 24 pode-se observar as marcas de usinagem na superfície usinada com a ferramenta de diamante monocristalino. A área observada foi a secção mínima do corpo de prova do ensaio de fadiga.

As marcas de usinagem estão associadas com o corte de fibras de carbono e também com o arrancamento de partes de fibras que foram cortadas.

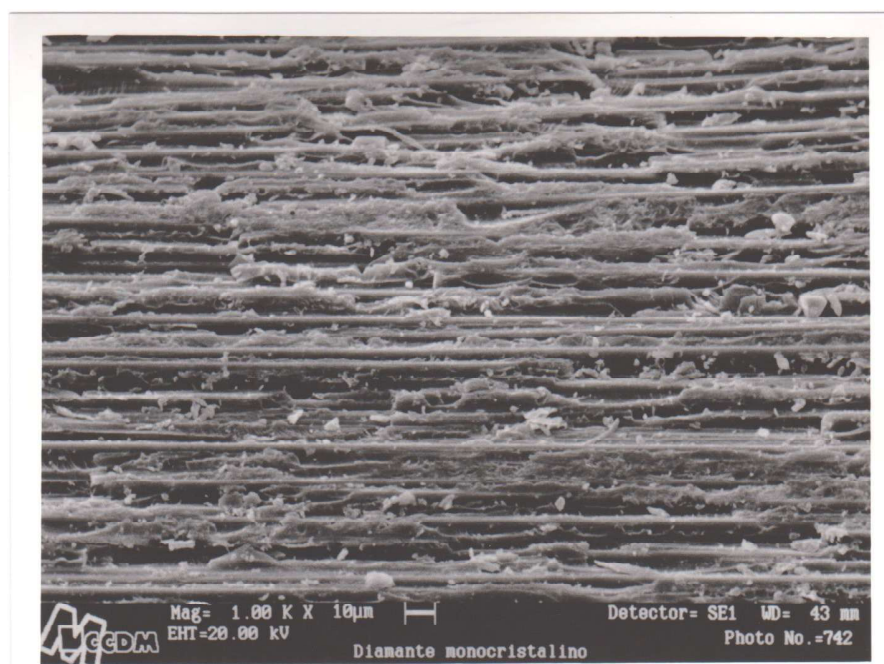


Figura 25: Micrografia mostrando a superfície usinada com a ferramenta de diamante monocristalino. Destaque para o melhor arremate no corte das fibras de carbono.

Conforme mostra a figura 25, não se encontrou arrancamentos de matriz em torno de pontas de fibras cortadas, formando microcrateras.

A usinagem com a ferramenta de diamante monocristalino introduz defeitos também, cortou fibras contínuas, arrancou partes de fibras cortadas, mas não se formou as microcrateras, conforme observado na usinagem com PCD.

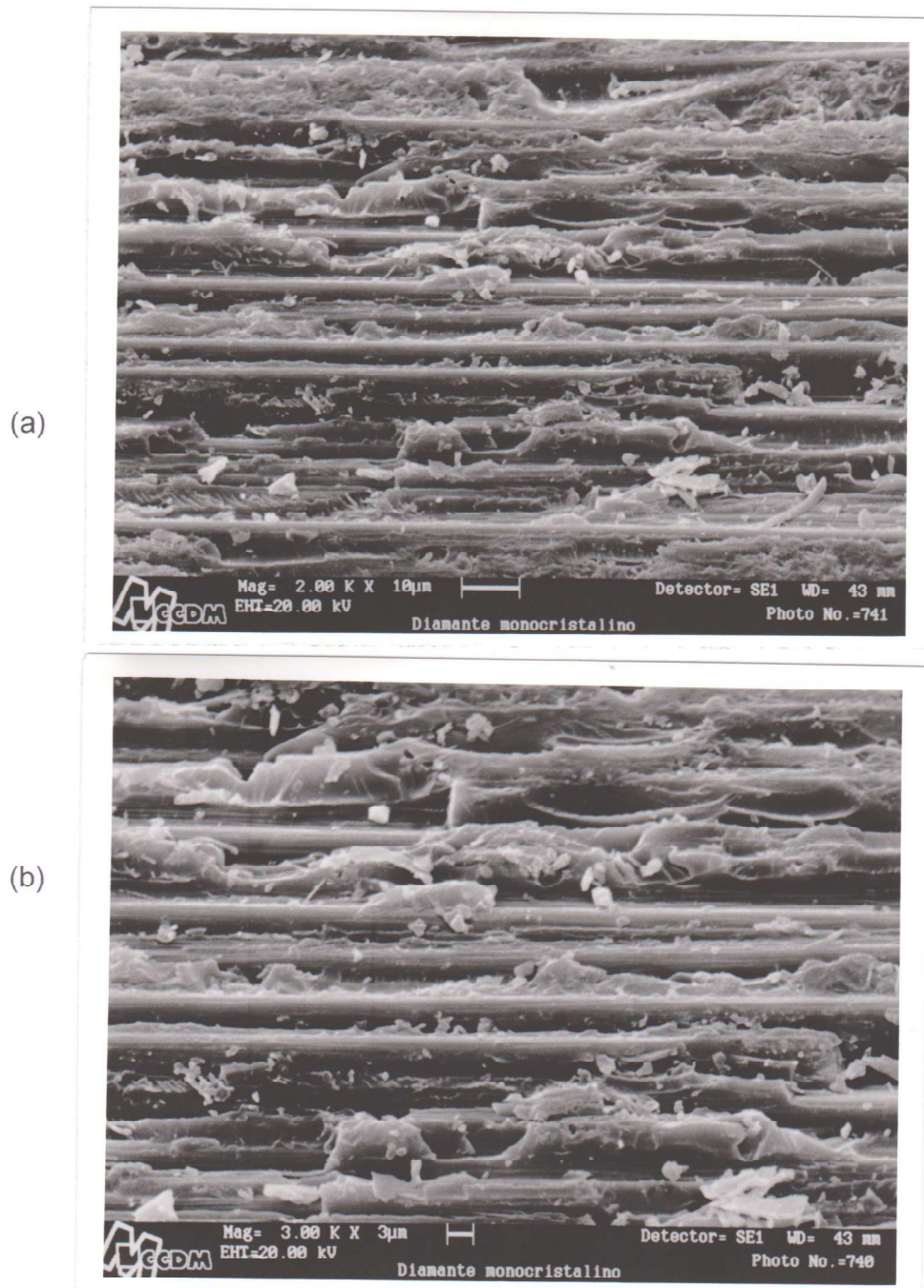
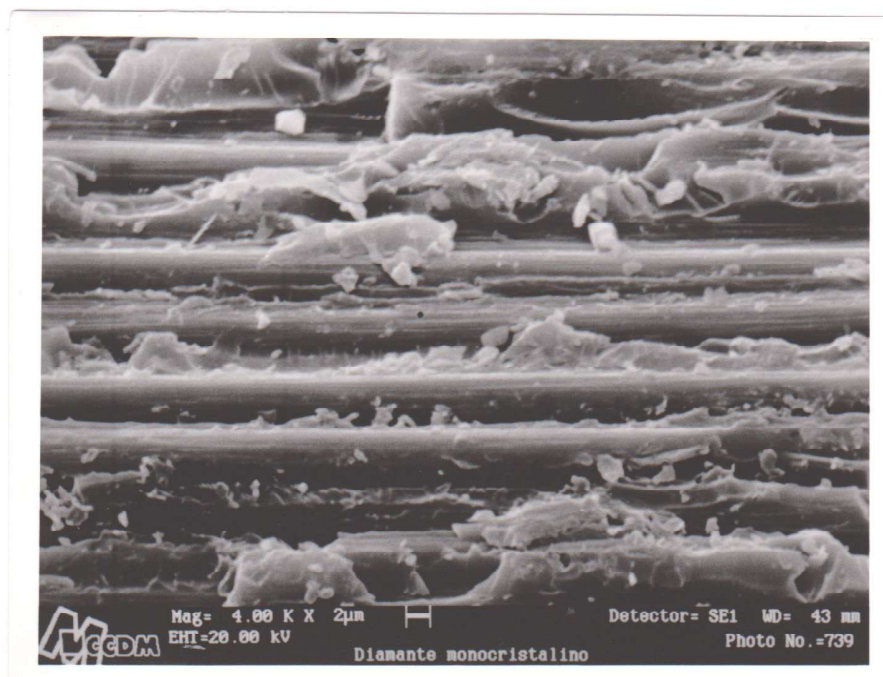


Figura 26: Micrografias (a) e (b) são da superfície usinada com a ferramenta de diamante monocristalino.

Através da figura 26 pode-se ver que a usinagem com esta ferramenta não abriu vazios em torno de pontas de fibras cortadas.

(a)



(b)

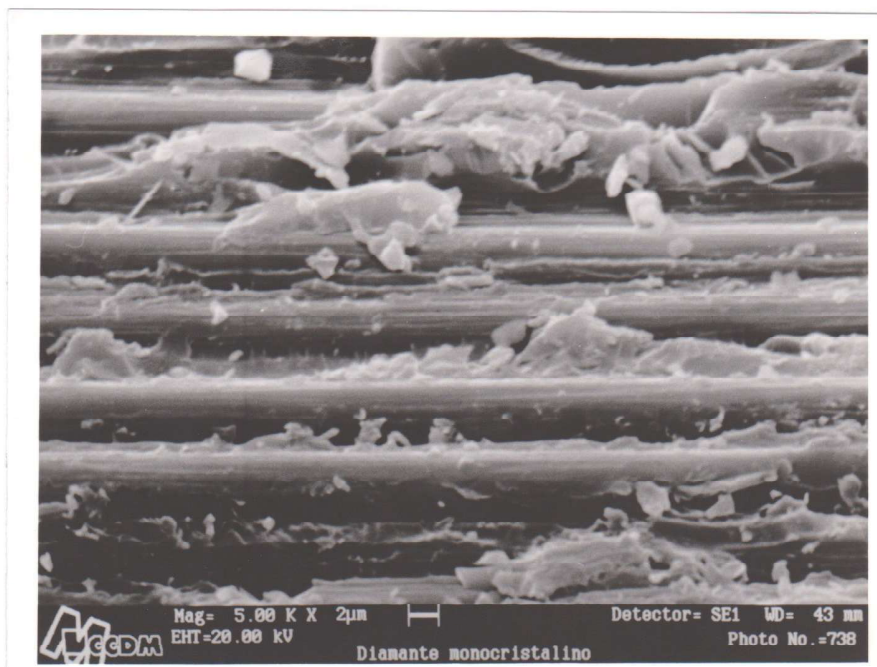


Figura 27: : Micrografias (a) e (b) são da superfície usinada com a ferramenta de diamante monocristalino. Destaque para o arremate no corte de fibra de carbono.

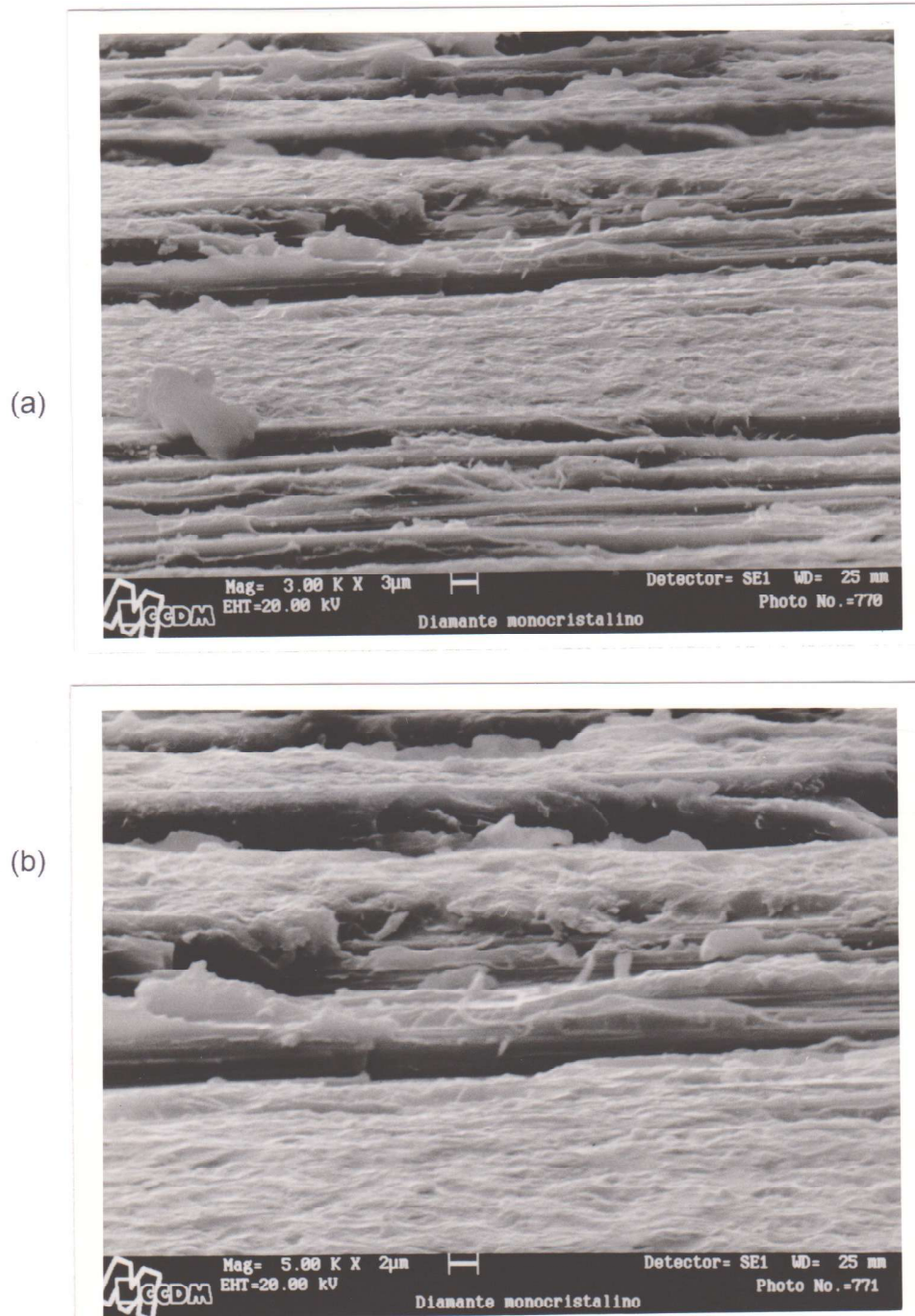
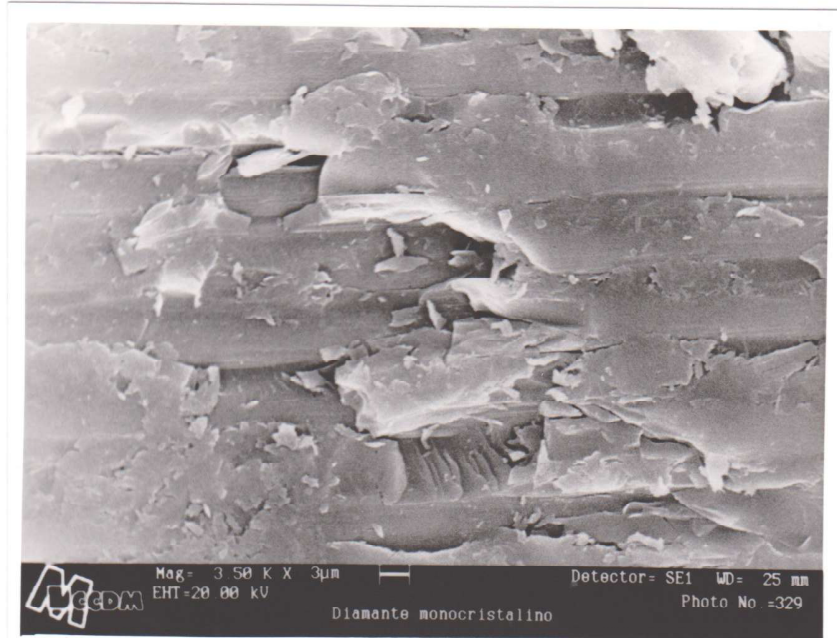


Figura 28: As micrografias (a) e (b) são da superfície usinada com a ferramenta de diamante monocristalino. Destaque para uma fibra da superfície que foi danificada pela usinagem.

(a)



(b)



Figura 29: As micrografias (a) e (b) são da superfície usinada com a ferramenta de diamante monocristalino.

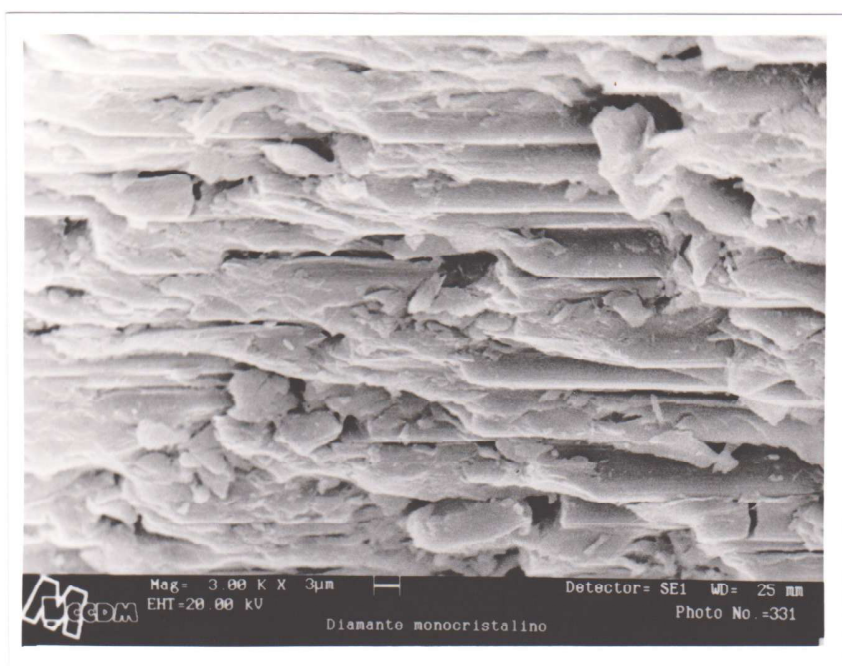


Figura 30: Micrografia do raio de concordância usinado com a ferramenta de diamante monocristalino.

Através da figura 30 pode-se ver que não se forma severas delaminações nem trincas superficiais nesta região do raio usinado. Não se observou microcrateras também.

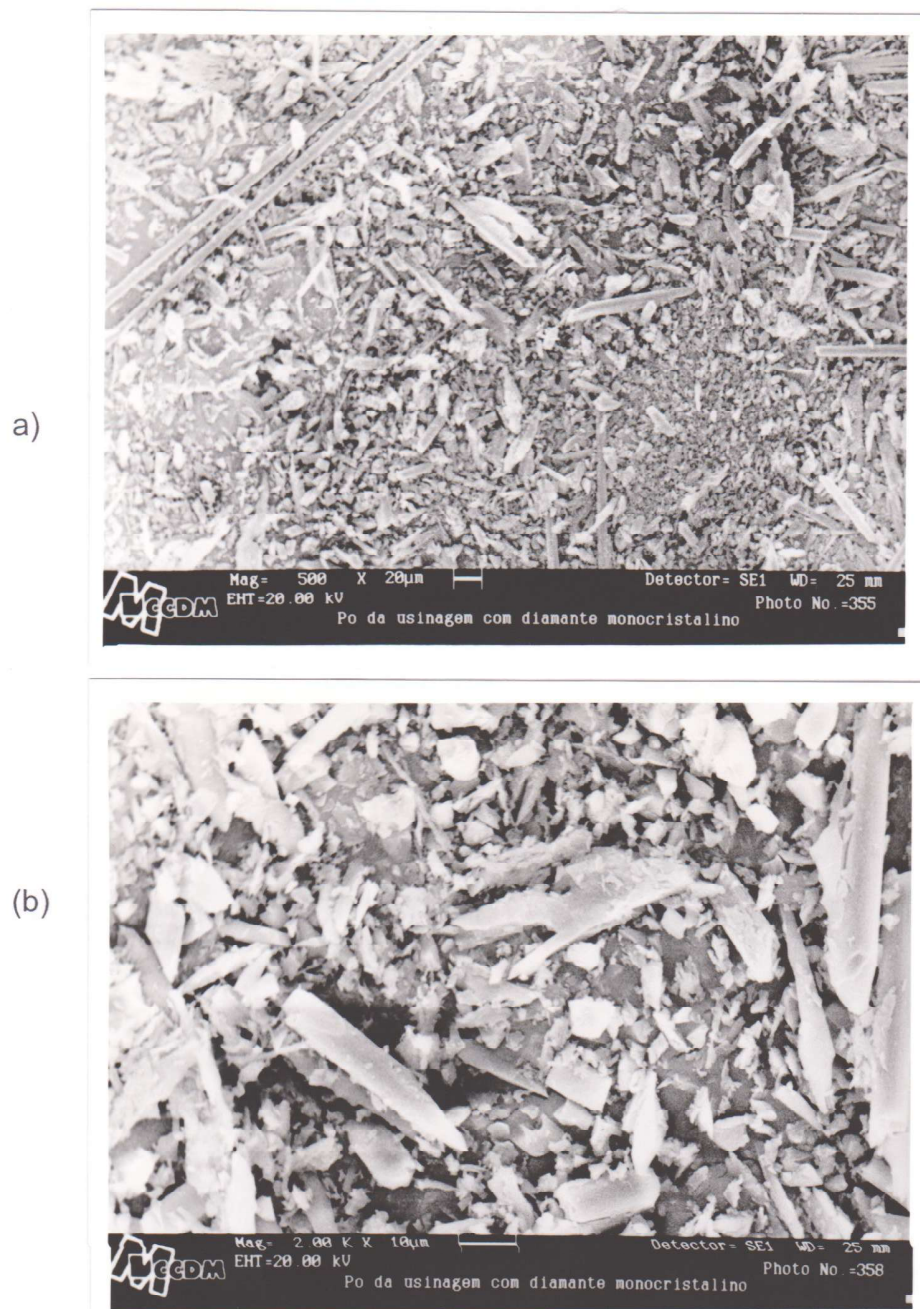


Figura 31: As micrografias (a) e (b) mostram o pó da usinagem do carbono-epoxi com a ferramenta de diamante monocristalino.

Através da figura 31 pode-se observar os segmentos de fibras de carbono cortados na usinagem de perfil de forma. O cavaco da usinagem do compósito é na forma de pó.

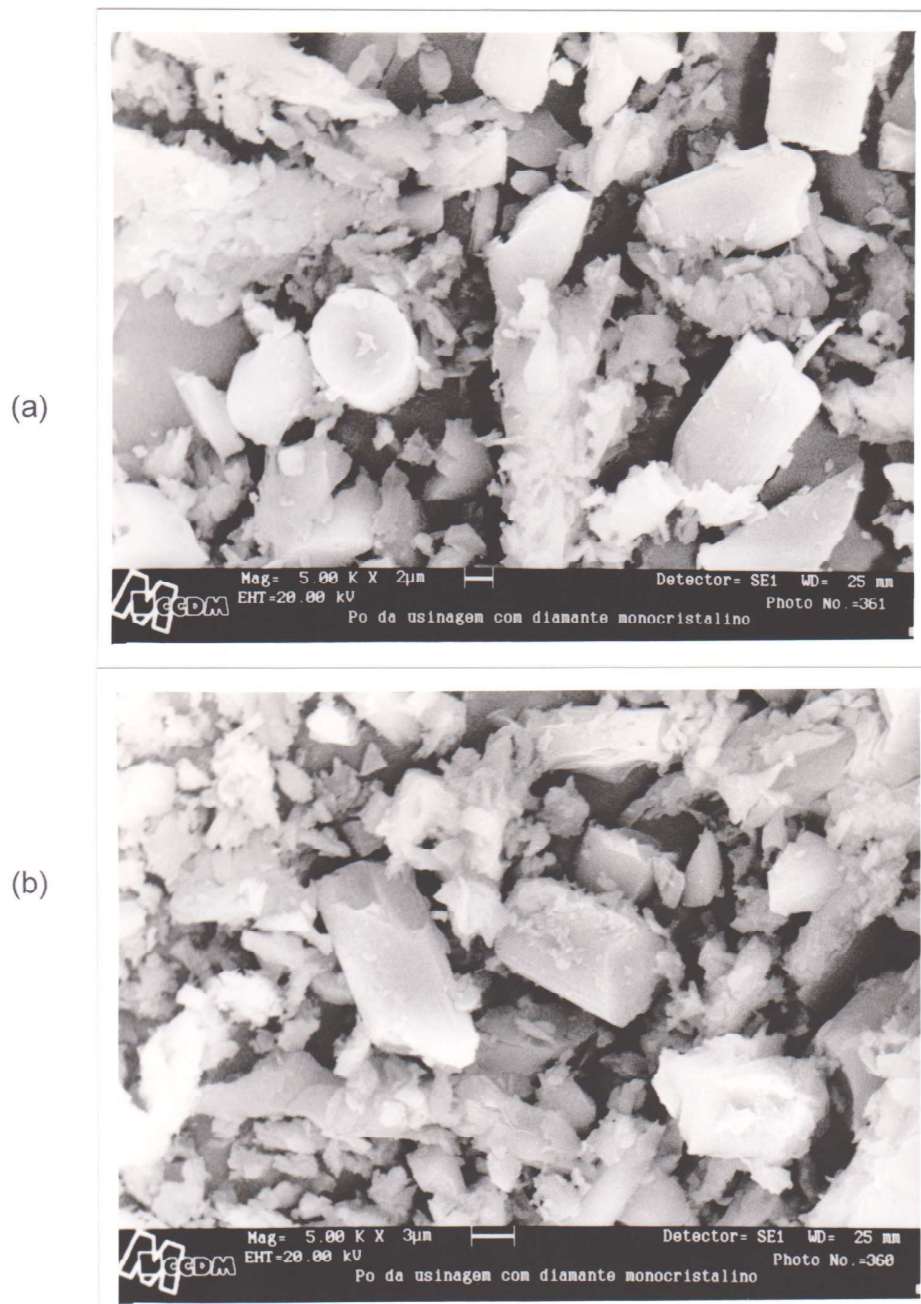


Figura 32: As micrografias (a) e (b) mostram o pó da usinagem do carbono-epoxi com a ferramenta de diamante monocristalino, com aumento de 5000x.

Através da figura 32 pode-se observar detalhes dos segmentos de fibras de carbono que foram cortados na usinagem do carbono-epoxi.

7 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À FADIGA POR FLEXÃO ROTATIVA

-Os objetivos dos ensaios de fadiga pela técnica de flexão rotativa podem ser listados abaixo:

-Verificar a influência dos defeitos introduzidos pela usinagem de Forma (usinagem de raio com corte perpendicular às fibras) sobre a resistência à fadiga (técnica por flexão rotativa);

-Fazer ensaios de fadiga de corpos de prova usinados com as ferramentas de diamante;

-Fazer ensaios de fadiga de corpos de prova polidos;

-Verificar ocorrência de delaminações monitorando desde o início dos ensaios;

-Mapear a propagação das delaminações e mapear o mecanismo de fratura conforme os resultados práticos do ensaio de fadiga;

-Verificação da superfície de fratura;

Quanto à técnica de ensaio de fadiga por flexão rotativa, escolhida para a realização deste trabalho, pode-se apontar razões importantes que fundamentaram esta escolha:

1. Esta técnica de ensaio de fadiga é normalizada pela ASTM E 466 [16]. Foi empregada com sucesso pelo Prof. Dr. Dawilson Lucato, em seu trabalho de Doutorado pela EESC-USP [2], trabalho que resultou na construção de um trem de pouso em compósito vidro E-epoxi, para aeronave de pequeno porte. Geralmente, realiza-se ensaios de fadiga em materiais compósitos reforçados por fibras sob solicitação tração - tração, conforme a norma ASTM D 3479 (Reapproved 1990) [17];

2. Os corpos de prova empregados neste ensaio são usinados,
3. Disponibilidade de máquina para realização dos ensaios;

Os dados deste tipo de ensaio são representados pela curva S/N, tensão dinâmica x número de ciclos até a falha.

7.1 Fundamentos da técnica de ensaio de fadiga por flexão rotativa

7.1.1 Sistema de aplicação de força

A equação de flexão pura da teoria de resistência dos materiais pode-se encontrar a tensão máxima, temos:

$$\sigma(y) = \left(\frac{M}{I}\right)y$$

onde:

σ = tensão aplicada a uma distância y do centro da secção transversal;

M = momento fletor;

I = momento de inércia;

Y = posição $0 \leq y \leq$ raio da secção transversal,

A tensão será máxima quando y =raio da secção transversal; $(d/2)$

$$\sigma(\text{máx}) = \frac{M}{\left(\frac{\pi \cdot d^4}{64}\right)} \cdot \left(\frac{d}{2}\right)$$

$M = 0,0982 \cdot \sigma(\text{máx}) \cdot d^3$, e esta é a equação registrada na régua de momento fletor da máquina Tatnall Krouse.

Sobre unidades: para selecionar o Momento Fletor em Lbf.in, ou (pounds.in), conforme a máquina de ensaio de fadiga por flexão rotativa da Tatnall Krouse está estabelecida para funcionar, e trabalhar com a respectiva

tensão escolhida em (MPa) e diâmetro da secção transversal escolhido em (mm), podemos aplicar a conversão a seguir:

$$M = 0,0982 \cdot 145 \cdot \sigma(\text{máx}) \cdot \left(\frac{d}{25,4}\right)^3$$

A figura 33 mostra a distribuição de tensão variando y do centro até o raio da secção.

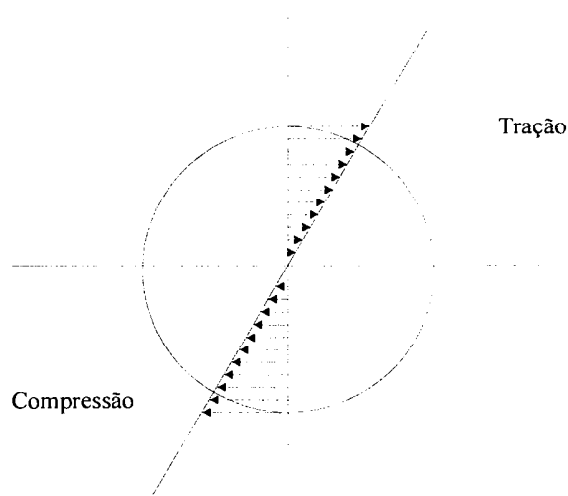


Figura 33: Distribuição de tensões, com a variação da distância entre o centro e a superfície da secção transversal do corpo de prova.

Pode-se observar que as tensões máximas estão na superfície e na camada subsuperficial. No centro do corpo de prova tem-se as menores tensões, e quando $y = 0$ a tensão é 0 (linha neutra). Estas tensões máximas na superfície torna a influência da usinagem do carbono-epoxi mais crítica, porque os defeitos introduzidos pela usinagem estarão solicitados pela tensão máxima do ensaio, daí esta técnica ser bastante adequada para o objetivo deste trabalho.

7.1.2 Forma de carregamento senoidal

Durante o ensaio de fadiga por flexão rotativa, o corpo de prova está submetido a tensão alternada de tração e compressão, e esta tensão cíclica pode ser representada por uma senóide da seguinte forma:

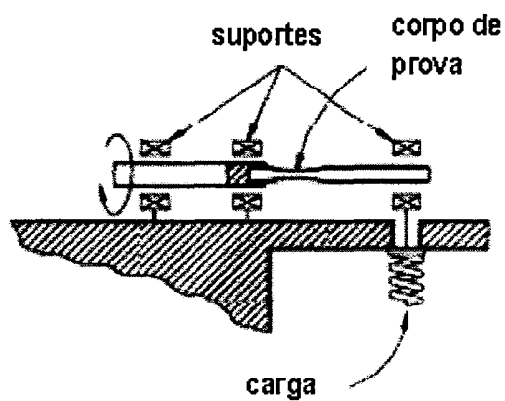
$$\sigma = A \text{ sen } (\omega t) , \text{ onde:}$$

A= amplitude, neste caso é a tensão máxima σ_{\max} ;

ω = velocidade angular ($2\pi f$) com f sendo a frequência do ensaio. Então reescrevendo a equação tem-se:

$$\sigma = \sigma_{\max} \text{ sen}(2\pi ft)$$

A Figura 34 mostra um gráfico típico de carregamento cíclico no ensaio de fadiga por flexão rotativa.



Solicitação de flexão no extremo

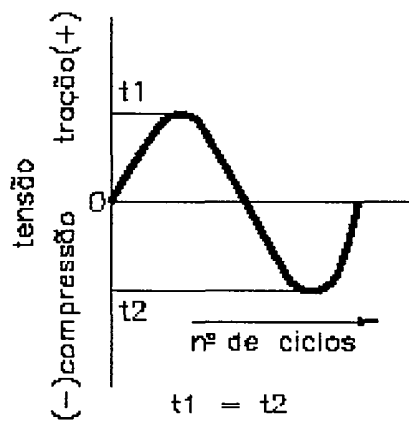


Figura 34: Gráfico da tensão cíclica (ou dinâmica) no ensaio de fadiga por flexão rotativa.

7.2 Resultados

7.2.1 Ensaio Preliminares

Primeiramente, os corpos de prova usinados com PCD foram testados, exatamente como saem do torno CNC, nas seguintes tensões: 300, 500, 700, 800, 900, 1000 e 1200 MPa.

Em seguida foram testados os corpos de prova polidos.

Testes foram realizados com 1800 rpm de frequência. Atingiu-se 10^7 ciclos em 100 horas de ensaio, nesta frequência. Com base na literatura, enciclopédia Modern Plastics [19], adotou-se como limite de fadiga neste trabalho o valor 10^7 ciclos .

Resultados:

- a) Os resultados mostraram que sob 300, 500 e 700MPa e 1800 rpm os corpos de prova não romperam até 10^7 ciclos;

Porém, fato importante é que os resultados também mostraram defeitos superficiais nos corpos de prova que surgiram desde o início do ensaio sob 700MPa, e começaram a se formar nas regiões vizinhas da secção mínima do corpo de prova. Chamou-se estes defeitos de "esfoliações";

- b) As imagens mostram que a fratura ocorreu no plano das esfoliações.

As figuras de 35 a 45 mostram os resultados dos ensaios dos ensaios de fadiga por flexão rotativa, observa-se os corpos de prova ensaiados e o tipo de fratura característica denominada de "Efeito Lápis". Sobre o "Efeito Lápis" existem duas características: n.1) uma das partes rompidas do corpo de prova parecer um lápis (na figura 41 esta parte do corpo de prova é aquela que está à direita) e n.2) também pela secção de fratura ter sido deslocada para a região de maior momento fletor.

Este tipo de fratura foi comum para todos os corpos de prova, independente do tipo de usinagem, nas condições testadas.

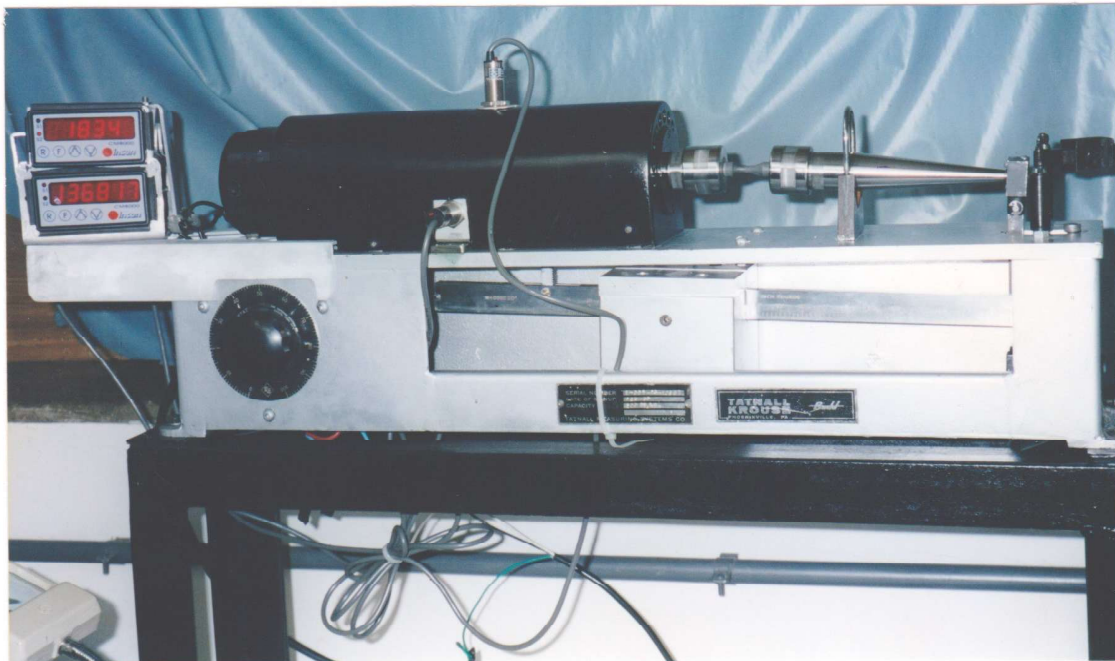


Figura 35: mostra um corpo de prova submetido a uma tensão de 700 MPa após ter atingido 1×10^7 ciclos.

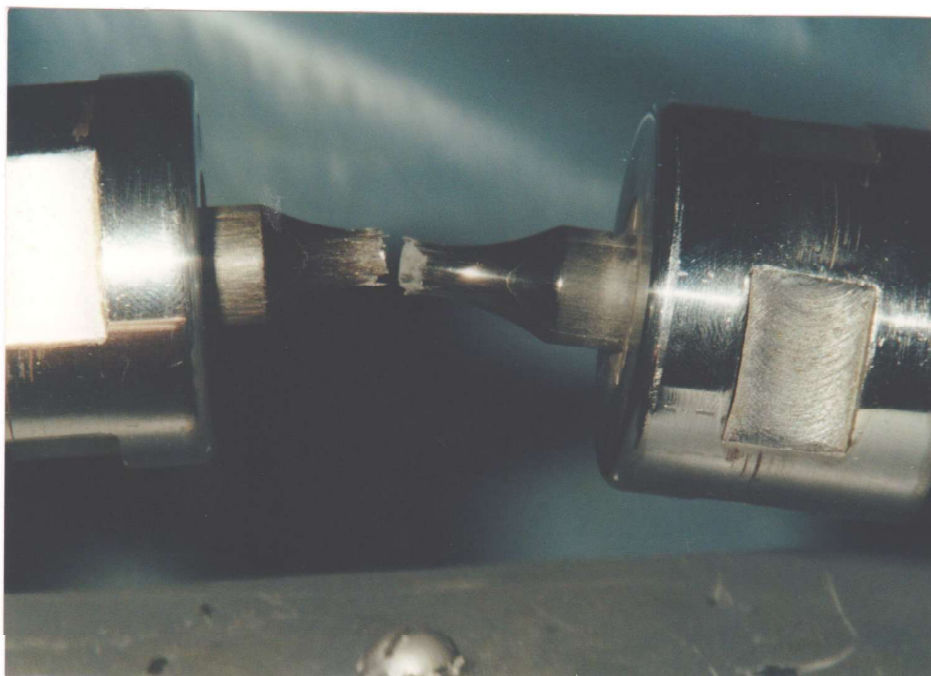


Figura 36: Esta fotografia mostra o corpo de prova polido, ensaiado sob 1800 rpm de frequência e sob 800 MPa de tensão de flexão dinâmica. Este corpo de prova rompeu em 3×10^5 ciclos.

A superfície fraturada do corpo de prova polido foi observada no microscópio eletrônico de varredura, e as imagens podem ser vistas através das figuras 37 a 45.

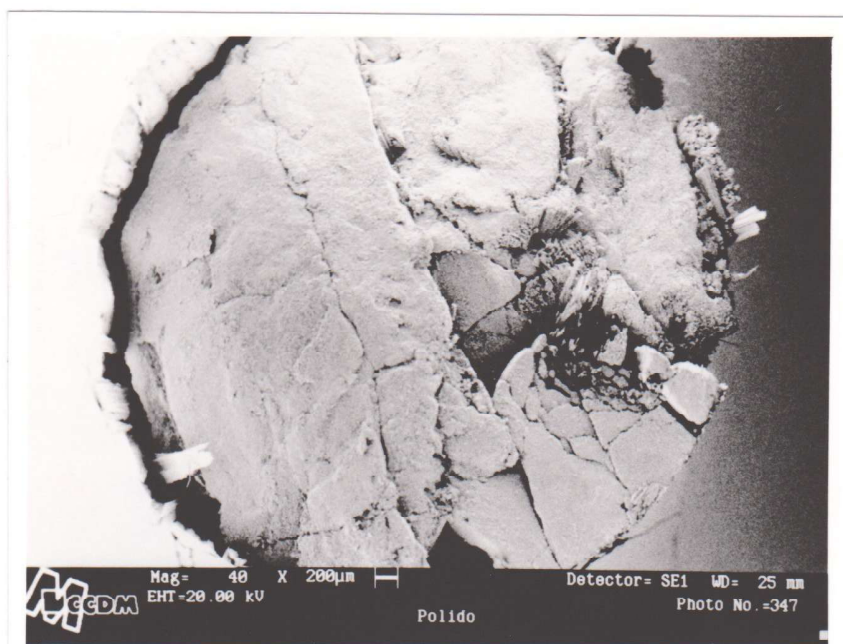


Figura 37: Esta figura mostra a superfície plana da fratura do corpo de prova polido, ensaiado sob 800 MPa de tensão de flexão dinâmica e 1800 rpm de frequência.

Vista de topo. Esta superfície de fratura tem aspecto plano.

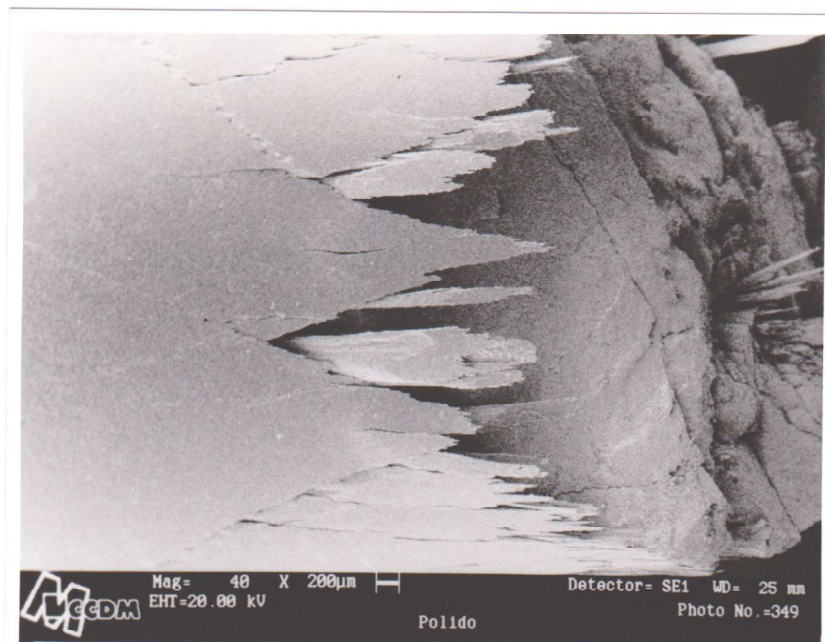


Figura 38: Micrografia mostrando que a secção onde surgiram as esfoliações coincidiu com a secção da fratura.

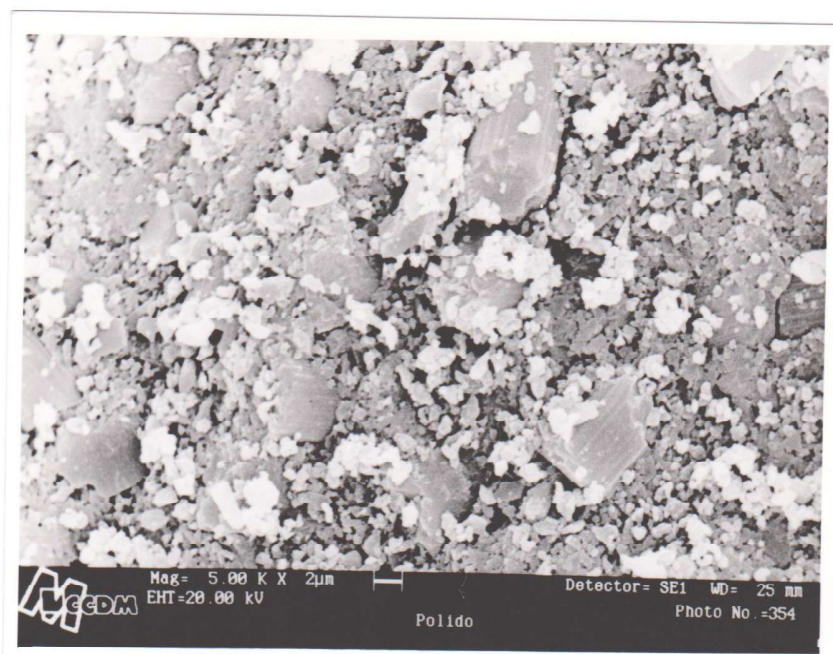


Figura 39: Micrografia mostrando fibras de carbono contínuas que foram rompidas na fratura do corpo de prova polido.

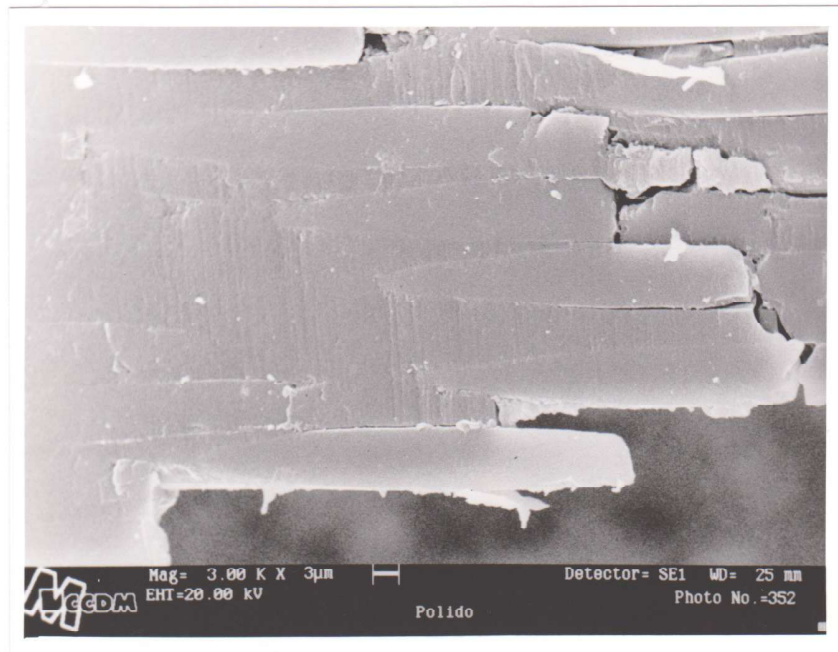


Figura 40: Micrografia mostrando as trincas se propagando entre pontas de fibras de carbono cortadas, na secção de surgimento de esfoliações.

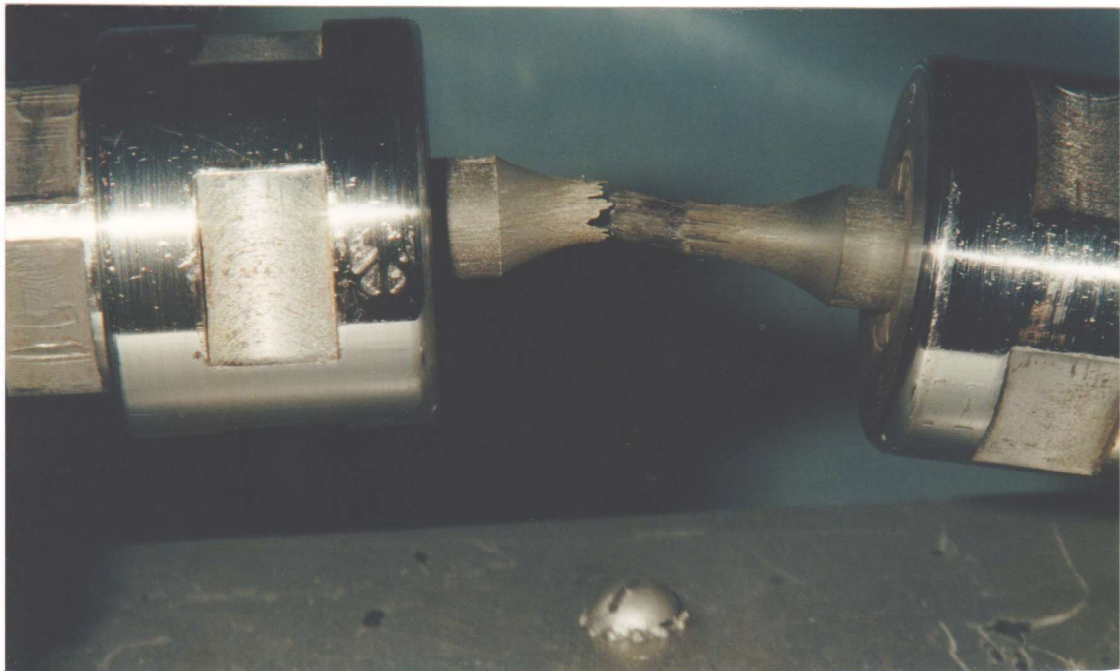


Figura 41: Esta fotografia mostra o corpo de prova usinado com PCD, ensaiado sob 700 MPa de tensão de flexão dinâmica e 3600 rpm de frequência. Esta fratura foi chamada de "Efeito Lápis".

Observou-se também que fibras rompidas da secção mínima caíram durante o ensaio e ficaram na base da máquina. As figuras de 42 a 45 mostram fotografias destes ensaios.

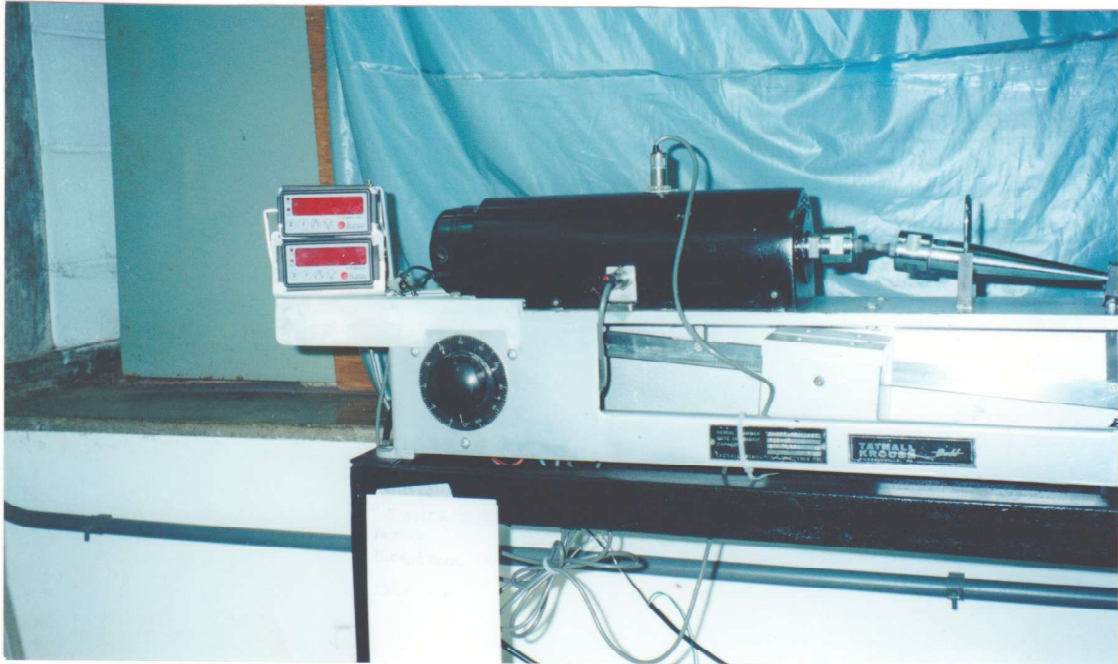


Figura 42: Esta figura mostra o corpo de prova usinado com diamante monocristalino, submetido ao ensaio de fadiga por flexão rotativa, nas condições de 800 MPa e 1800 rpm. O número de ciclos até a falha foi $n = 1,5 \times 10^6$ ciclos.

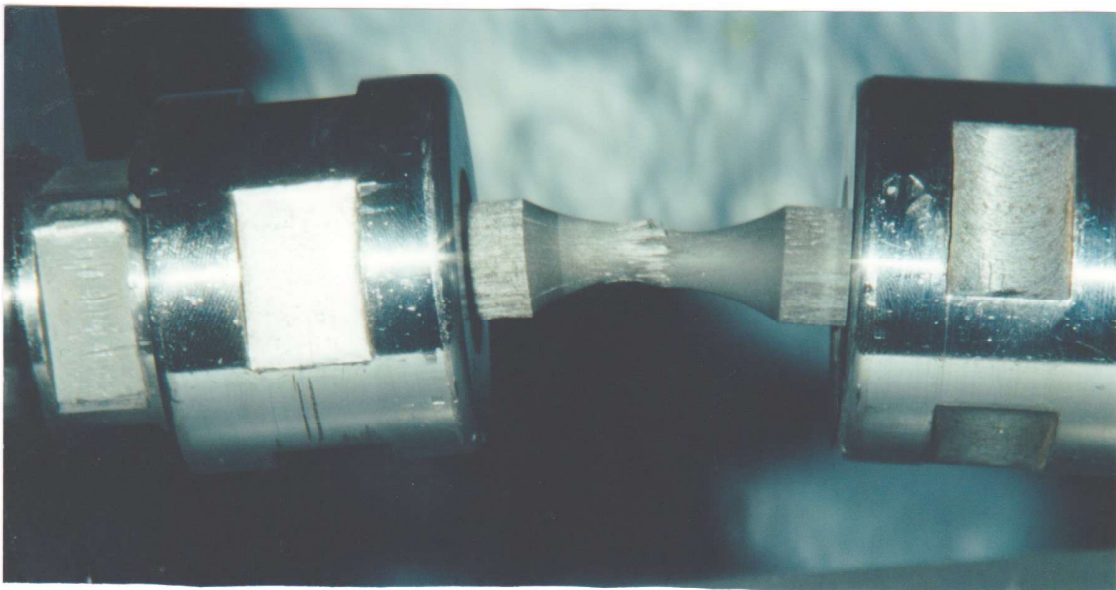


Figura 43: Esta figura destaca o corpo de prova da figura 42.

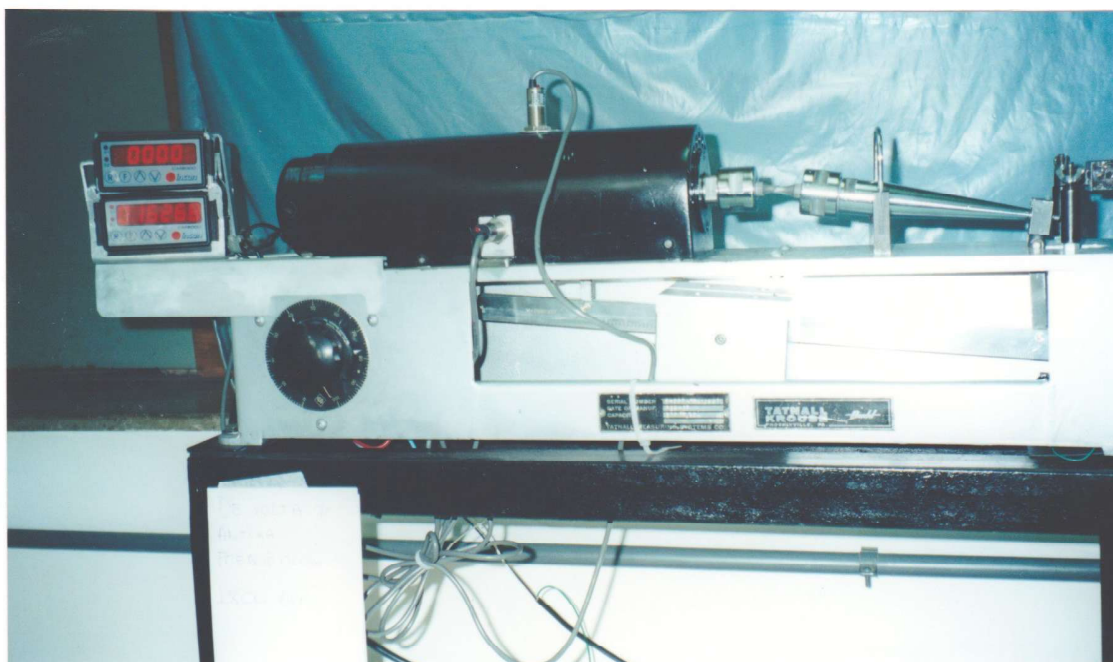


Figura 44: Esta figura mostra o corpo de prova usinado com diamante monocristalino, submetido ao ensaio de fadiga por flexão rotativa, nas condições de 800 MPa e 1800 rpm. O número de ciclos até a falha foi $n = 1,6 \times 10^6$ ciclos.

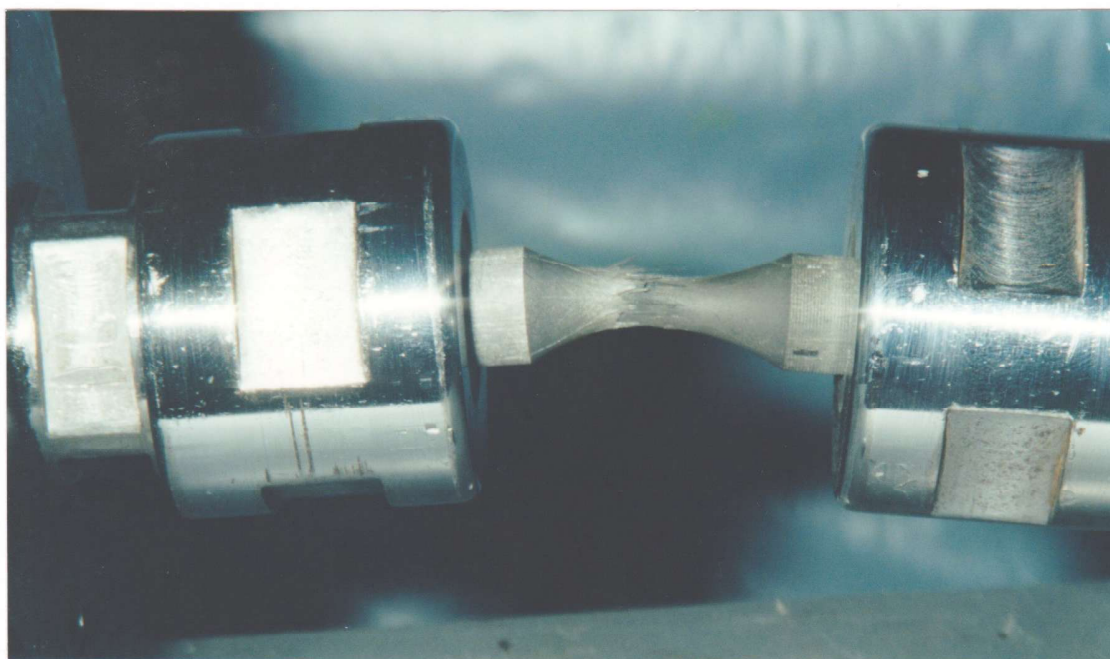


Figura 45: Esta figura destaca o corpo de prova da figura 44.

7.3 Análise da fratura por microscopia eletrônica de varredura, e tentativa de mapear o mecanismo da fratura observado nos ensaios de fadiga sob tensão de flexão dinâmica (800 MPa) para frequências de 1800 rpm e 3600 rpm.

Fez-se a análise da fratura dos corpos de prova usinados com diamante monocristalino, que foram ensaiados sob tensão de flexão dinâmica de 800 MPa, em frequências de 1800 e 3600 rpm.

Primeiramente, partiu-se para analisar o tipo de fratura observada nos dois tipos de usinagem, sob tensão de flexão cíclica de 800 MPa e 3600 rpm, chamada de "Efeito Lápis". Trata-se do mecanismo de fratura dos corpos de prova que romperam em duas partes, com uma das partes parecendo um lápis. E, mais um detalhe importante, a secção de fratura não ocorreu na secção mínima do corpo de prova, encontrou-se deslocada para a região de maior momento fletor.

Quando analisou-se este tipo de fratura, pela técnica de microscopia eletrônica de varredura, pode-se observar 4 etapas importantes que contribuíram para esquematizar um modelo do mecanismo de fratura:

1^a : Surgimento de esfoliações na região das proximidades da mínima secção;

2^a: As esfoliações surgem e provocam delaminações transferindo a secção de máxima tensão para a região de maior momento fletor;

3^a : Ruptura das fibras contínuas do "lápis" interno;

4^a: Ruptura, por tração, do centro da secção transversal, onde as tensões de flexão são muito pequenas.

Estas etapas do processo de fratura podem ser vistas através da figura 46.

As imagens de microscopia eletrônica de varredura da fratura tipo "Efeito Lápis" podem ser vistas nas figuras de 47 a 49.

Então, partiu-se para analisar a fratura dos corpos de prova usinados com diamante monocristalino, que foram ensaiados sob tensão de flexão cíclica de 800 MPa e 1800 rpm. As figuras de 50 a 56 mostram imagens destes corpos de prova.

É fato experimental que, a falha ocorreu não na secção mínima dos corpos de prova. Houve um deslocamento para outra secção, na região sob maior momento fletor. Esta secção encontrou-se com dano localizado em sua volta, e a concentração de tensão tornou-se suficientemente intensa para provocar a fratura. O dano localizado em torno desta secção provém das trincas e delaminações que se originaram nas esfoliações, na região do corpo de prova que está ao lado da secção mínima.

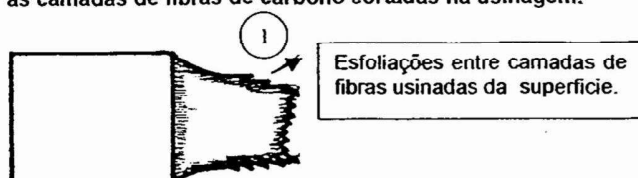
O diâmetro da secção de fratura é maior que o diâmetro da secção mínima, como pode ser observado através da figura 51. Foram realizadas medidas deste diâmetro, empregando o analisador de imagens Quantimet 600 - Leica do CCDM-UFSCar, resultando em 5,50 mm, enquanto que o diâmetro da secção mínima foi de 5,1 mm.

Outra questão importante a ser considerada, é que as fibras unidirecionais não estão evitando a propagação das delaminações, que se iniciaram nas esfoliações.

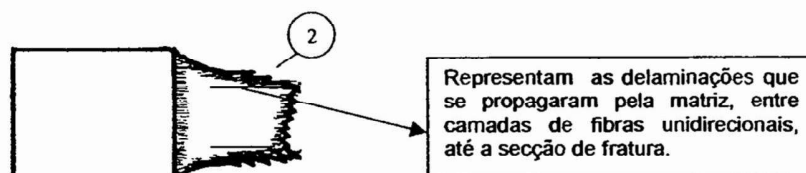
Fazendo referência à revisão bibliográfica, Pardini [5] concluiu em seu trabalho que os compósitos estruturais obtiveram um ganho significativo na resistência à delaminação e na tenacidade à fratura interlaminar, quando empregou-se preformas multidirecionais. Estas configurações podem ser

montadas para conferir isotropia de propriedades, melhorar a resistência à delaminação e obter resistência mecânica em direções determinadas.

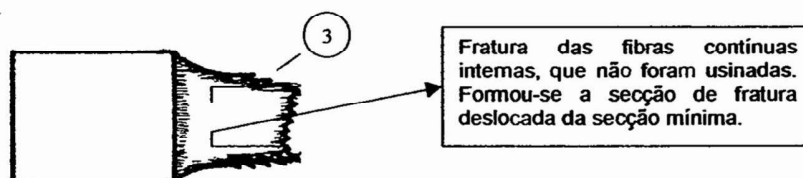
1ª Etapa: Surgimento das esfoliações devido as tensões de cisalhamento entre as camadas de fibras de carbono cortadas na usinagem.



2ª Etapa: Propagação de delaminações para a região do corpo de prova sob maior momento fletor, paralelamente às fibras de carbono. Propagam-se até a secção de fratura deslocada, pois a falha não ocorre na secção mínima do corpo de prova.



3ª Etapa: Fratura das fibras de carbono contínuas internas do corpo de prova na secção de fratura deslocada para a parte solicitada com maior momento fletor, chamamos de fratura das fibras do "lápiz interno".



4ª Etapa: Fratura da secção residual. Fratura semelhante à do ensaio de tração.

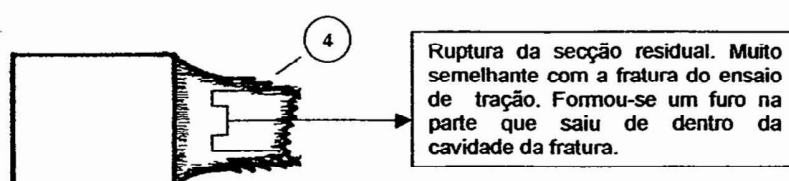


Figura 46: Mapeamento do mecanismo de fratura, observado para os corpos de prova ensaiados sob tensão de flexão dinâmica de 800 MPa e 3600 rpm de frequência.

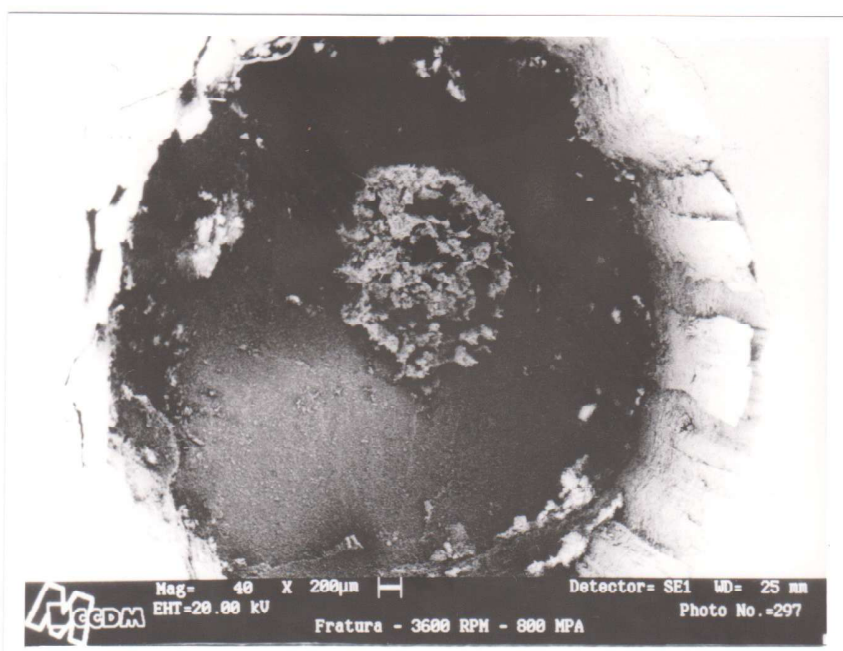


Figura 47: Micrografia mostrando a superfície de fratura de um corpo de prova usinado com a ferramenta de diamante monocristalino, submetido a 3600 rpm e 800 MPa de tensão de flexão dinâmica.

Pode-se ver que a secção de fratura foi deslocada da secção mínima do corpo de prova para uma secção na região de maior momento fletor. Esta superfície de fratura foi vista de topo.

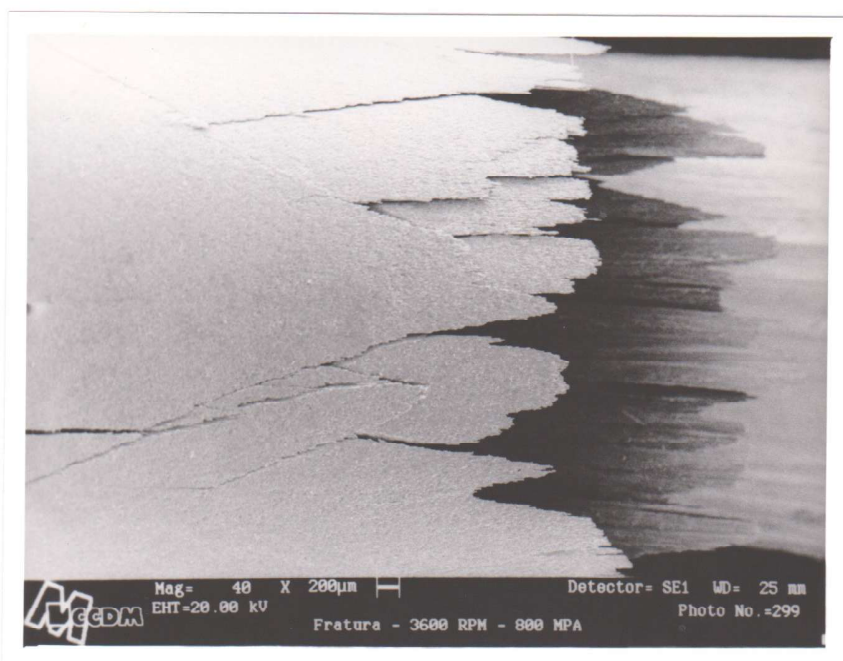


Figura 48: Micrografia mostrando as esfoliações, que surgiram na região adjacente à secção mínima do corpo de prova, usinado com diamante monocristalino, ensaiado sob 800 MPa de tensão de flexão dinâmica e 3600 de frequência.

Estas esfoliações foram observadas com vista lateral. Através desta figura pode-se ver que as esfoliações são delaminações que ocorrem começando da camada usinada da superfície para as camadas subsuperficiais.

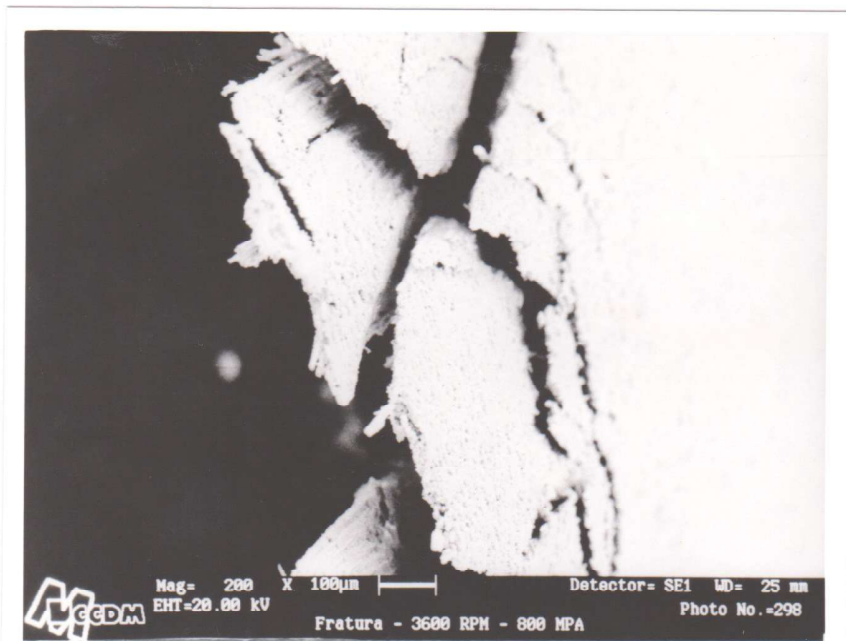
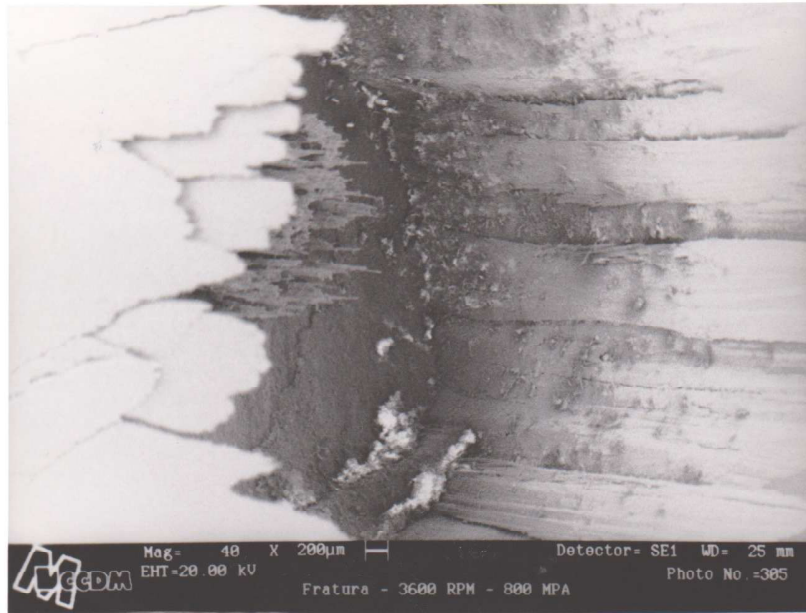


Figura 49: Micrografia mostrando as esfoliações, com vista de frente, observadas no corpo de prova usinado com diamante monocristalino, ensaiado sob 800 MPa de tensão de flexão dinâmica e 3600 rpm de frequência.

Pode-se ver que estas esfoliações são delaminações que surgiram entre as camadas usinadas da superfície.

(a)



(b)

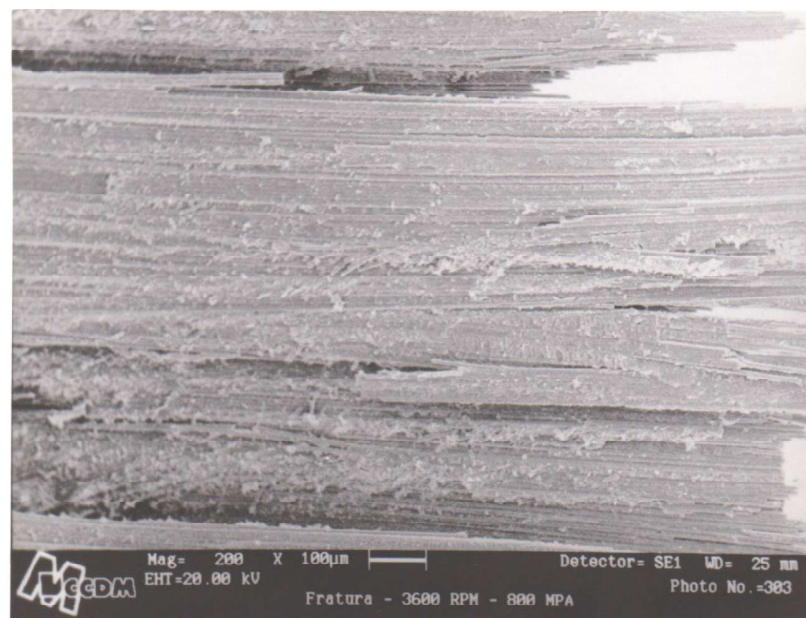


Figura 50: Micrografias (a) e (b) mostrando a superfície interna lateral, por onde se propagaram as delaminações, chegando até a secção transversal da fratura.

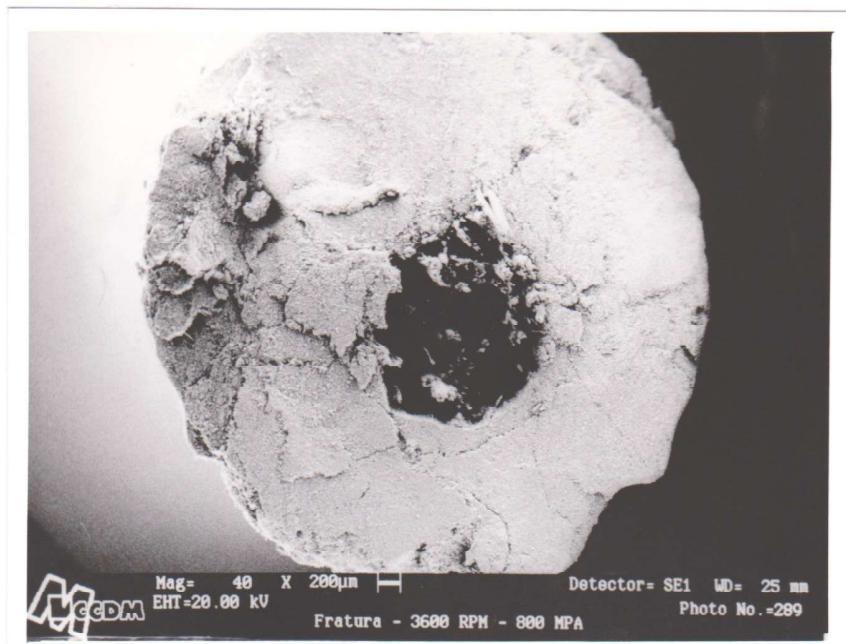


Figura 51: Micrografia mostrando a superfície de fratura do "lápis" interno de fibras contínuas, do corpo de prova submetido a 800 MPa de tensão de flexão dinâmica e 3600 rpm de frequência.

Esta região é compreendida pelo "anel claro" desta micrografia. Esta fratura foi vista de topo. Esta parte do copo de prova é aquela que saiu de dentro da cavidade de fratura. Inclusive, o diâmetro desta secção foi medido através do analisador de imagens Quantimet 600 Leica do CCDM/UFSCar, resultando em 5,5 mm. Logo, esse diâmetro é maior que o da secção mínima do corpo de prova de 5,1 mm.

Dessa forma, a fratura ocorreu nesta secção, devido a maior concentração de tensão em torno de muitos defeitos provocados pelas delaminações.

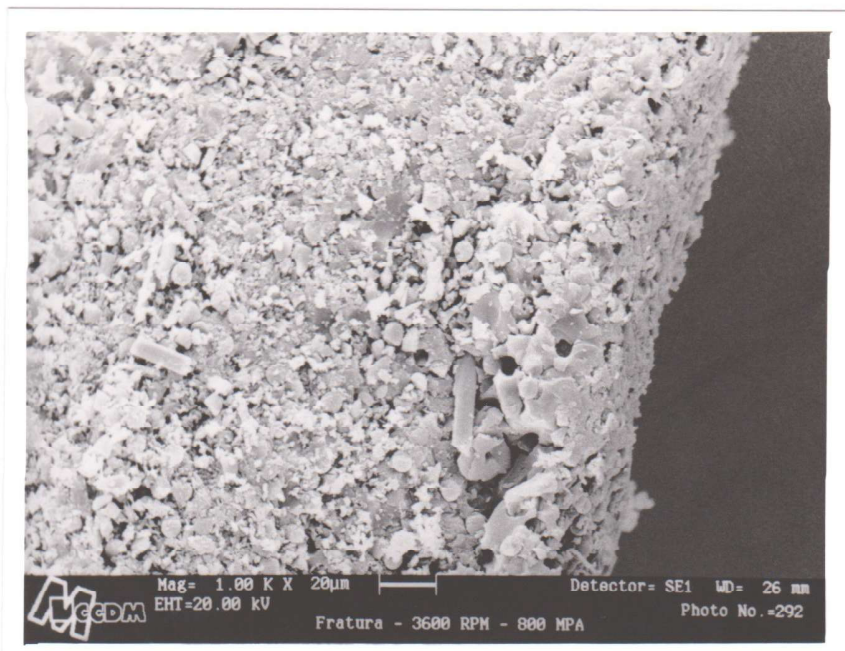
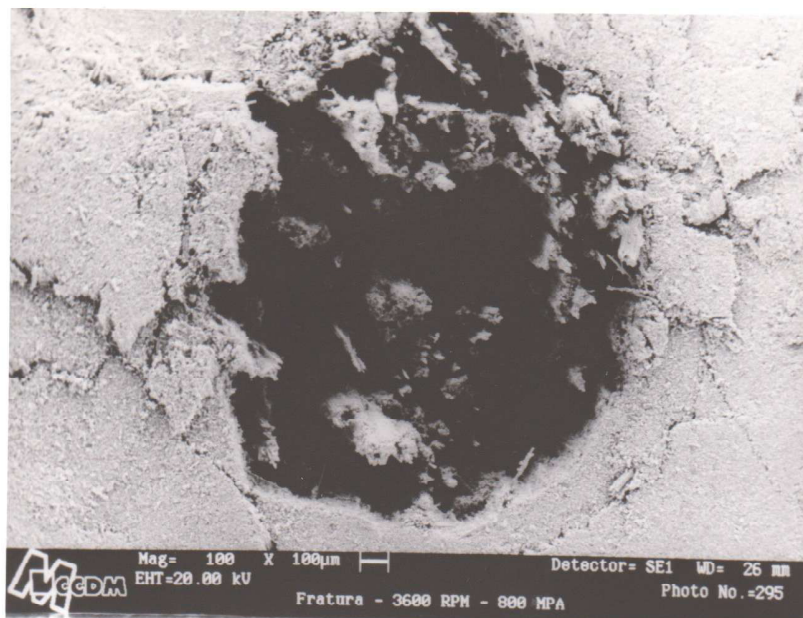


Figura 52: Esta figura mostra a superfície de fratura das fibras contínuas, que foram rompidas sob tensão de flexão dinâmica de 800 MPa e frequência de 3600 rpm.

Pode-se ver que esta fratura ocorre em um mesmo plano, é uma fratura lisa.

Através da micrografia da figura 52, pode-se dizer que o arrancamento de fibras foi mínimo, e a região de maior ocorrência destes arrancamentos de fibras foi na extremidade da secção de fratura.

(a)



(b)

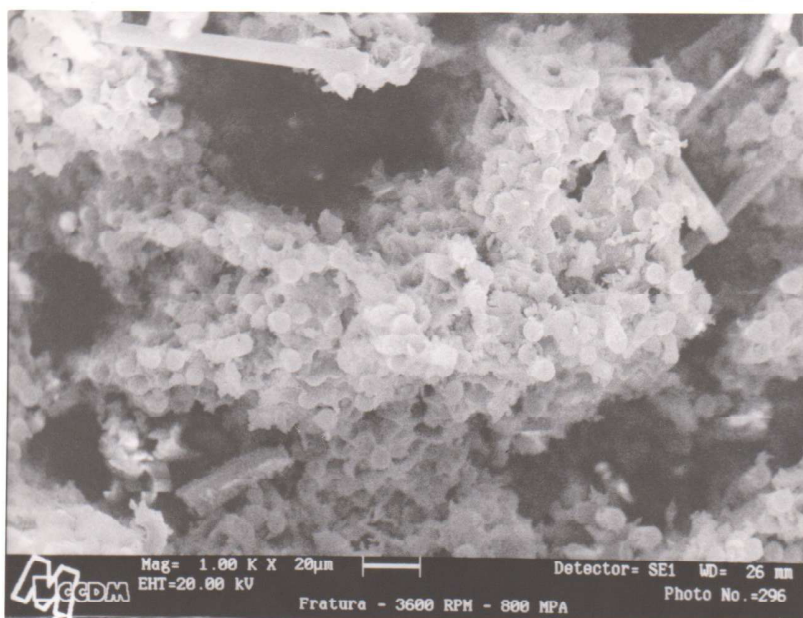


Figura 53: Micrografias (a) e (b) mostrando detalhes do furo central, característico em todas as fraturas nos corpos de prova ensaiados sob tensão de flexão dinâmica de 800 MPa e 3600 rpm de frequência.

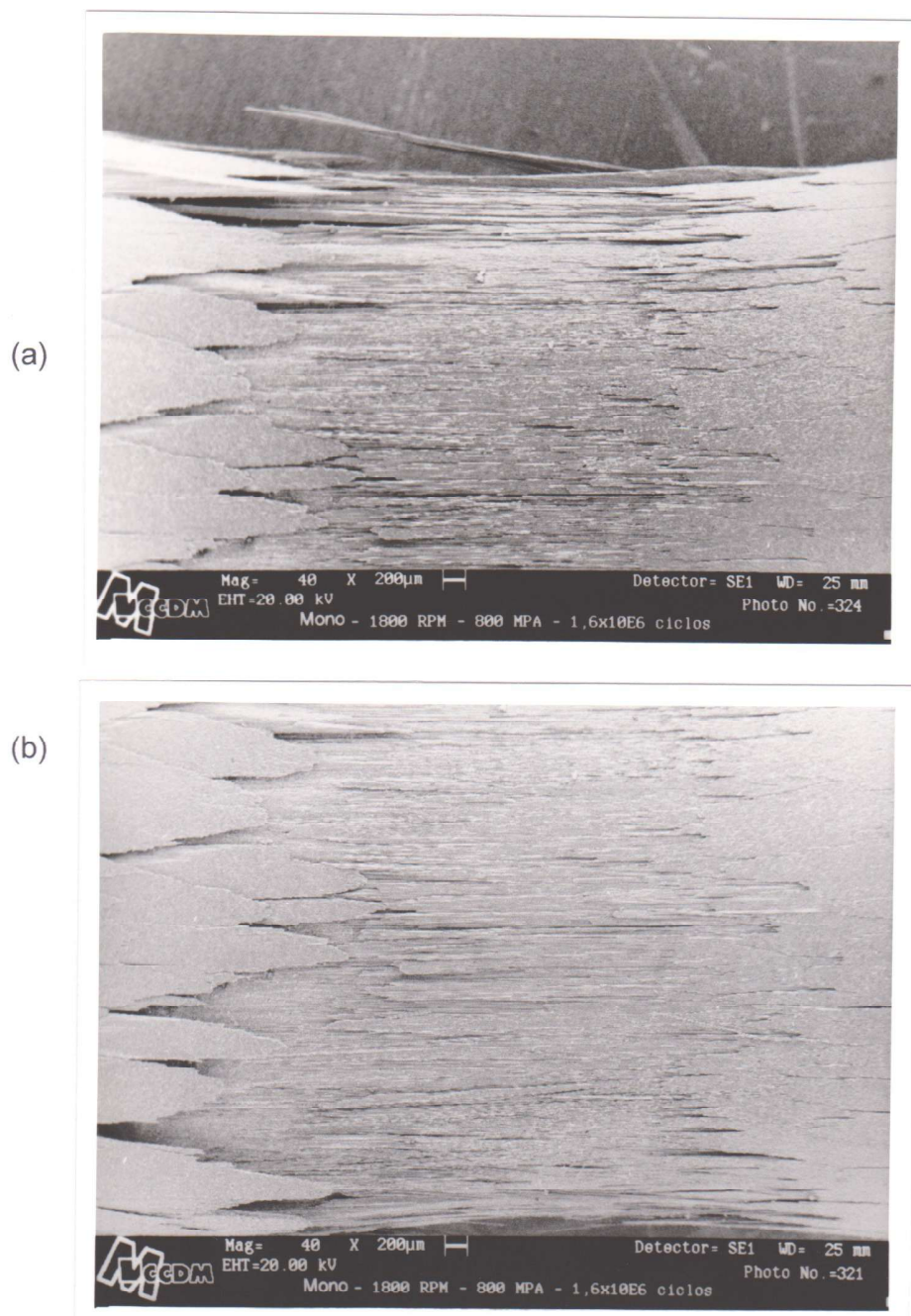


Figura 54: Micrografias (a) e (b) mostrando as esfoliações que surgem em torno da secção mínima, de um corpo de prova usinado com diamante monocristalino, ensaiado sob tensão de flexão dinâmica 800 MPa e 1800 rpm.

Através da figura 54, pode-se ver em (a) a parte superior da secção mínima e em (b) a parte inferior da mesma secção. Este corpo de prova, usinado com diamante monocristalino, apresentou $1,6 \times 10^6$ ciclos até a falha.

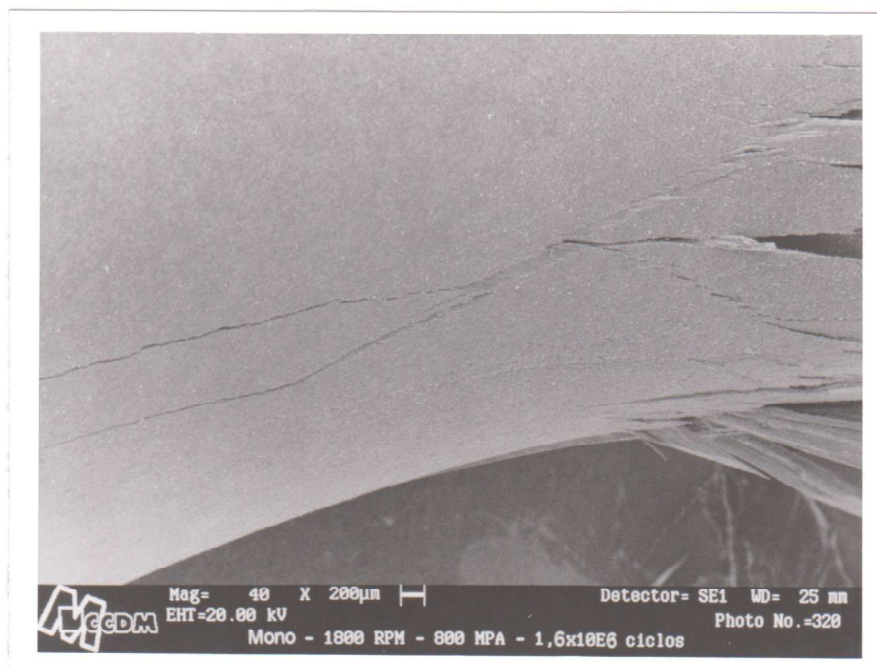


Figura 55: Micrografia mostrando trincas radiais na porção do corpo de prova sob maior momento fletor.

Através da figura 55 pode-se observar trincas radiais que se formaram quando um corpo de prova, usinado com diamante monocristalino, ensaiado sob 800 MPa e 1800 rpm, falhou resistindo $1,6 \times 10^6$ ciclos.

Estas trincas são da região solicitada sob maior momento fletor, e é exatamente nesta região que está deslocada a secção de falha do corpo de prova. A falha não ocorreu na secção mínima do corpo de prova.

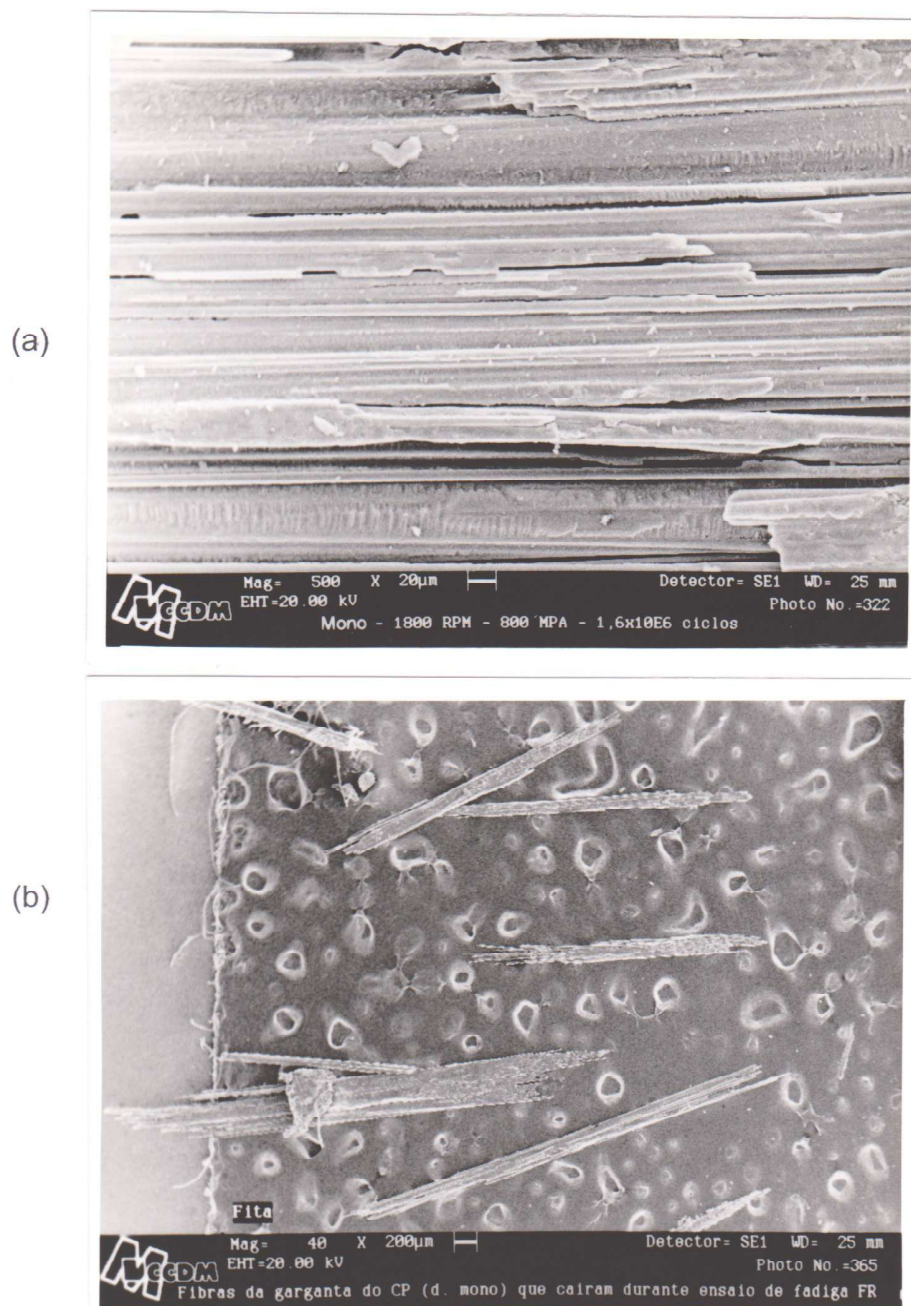


Figura 56: Micrografias (a) e (b) mostrando as fibras das camadas internas da secção mínima de um corpo de prova, usinado com diamante monocristalino, após ter sido ensaiado sob 800 MPa de tensão de flexão dinâmica e 1800 rpm.

Através da figura 56, pode-se observar os pedaços de fibras da superfície da secção mínima do corpo de prova que caíram durante o ensaio de fadiga (flexão rotativa).

8 CONCLUSÕES

Originalmente as peças de compósito fibra de carbono-epoxi unidirecional sendo produzidas na forma de tabletes foram submetidas a usinagem de perfil de forma em torno CNC para se obter a forma final de um corpo de prova conforme a geometria da Figura 1. Conforme os resultados práticos dos ensaios de fadiga (técnica de flexão rotativa), surgiram delaminações entre camadas. Estas delaminações iniciaram na região de transição da usinagem do raio de concordância, e foi observado fratura de alguns corpos de prova (até mesmo corpos de prova polidos apresentaram este comportamento) nas condições em que foram testados;

Foram mapeados o mecanismo de propagação das delaminações e a fratura dos corpos de prova de geometria da Figura 1, este mapeamento foi realizado durante o ensaio de fadiga (técnica de flexão rotativa). Para este mecanismo de propagação de delaminações nos corpos de prova de ensaio de fadiga(técnica de flexão rotativa)foi atribuído o termo “Efeito Lápis”.

Do ponto de vista das condições de teste, podem ter sido agressivas em termos dos valores de tensão de flexão dinâmica e frequência escolhidas, mas de qualquer maneira pode-se apontar que a região de transição da usinagem de perfil de forma do raio de concordância dos corpos de prova (geometria conforme a Figura 1) foi a região dos corpos de prova onde ocorreu o início das delaminações nos ensaios de fadiga.

Do ponto de vista do ensaio de fadiga pela técnica de flexão rotativa, a aplicação da força, que está relacionada ao Momento Fletor da máquina Tatnall Krouse de ensaio de fadiga por flexão rotativa, colocou a secção transversal do corpo de prova em um estado de flexão, de forma que a superfície superior do

corpo de prova fica submetida em tração, enquanto que a superfície inferior fica submetida em compressão. Enquanto o corpo de prova gira na máquina de ensaio, qualquer posição sobre a superfície do corpo de prova experimenta estados alternados, em que existe uma máxima tensão de tração e uma máxima tensão de compressão.

9 REFERÊNCIAS

1- Rezende, M.C. "O uso de Compósitos Estruturais na Indústria Aeroespacial". **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, vol 10, n. 2, 2000, pg. E6-E10.

2- Lucato, D. **Tese de Doutorado pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica pela EESC/USP**, (1992), pg. 4-40, 4-41, 5-13, 5-14.

3- HELIBRAS - HELICÓPTEROS DO BRASIL S/A **Manual de Instrução de Mecânicos (HB 350B Esquilo) - THM (1986)**, pg. 4 - 9.

4- G. Santhanakrishnan, R. Krishnamoorthy, S.K. Malhotra; **Journal of Mechanical Working Technology**, 17, Aug. 1988, 195-204.

5- Pardini, L.C. "Preformas para Compósitos Estruturais", **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, vol 10, n. 2, p 100-109, 2000.

6- G. Santhanakrishnan, R. Krishnamoorthy, S.K. Malhotra; **Journal of Materials Processing Technology**, Vol 30, Apr 1992, 263-275.

7- M. Rahman, S. Ramakrishna, J.R.S. Prakash, D.C.G. Tan; **Journal of Materials Processing Technology** 89-90, MAY 1999, 292-297.

8- J.R. Ferreira, N.L. Coppini, G.W.A. Miranda; **Journal of Materials Processing Technology** 92-93, AUG 1999, 135-140.

9- Lucato, D. **Relatório de Atividades do Departamento de Engenharia Mecânica da EESC/USP** (1996).

10- **Engineered Materials Handbook**. Materials Park, ASM International, 1990, v.3, pg. 49.

11- **ASTM 2584** (Reapproved 1985) - Standard Test Method for Ignition Loss of Cured Reinforced Resins.

12- Smith, W. F. **Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**, 3ª edição, McGRAW-HILL, Portugal, 1998, pg 773-779.

13- **ASTM D 790** - Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials.

14- **ASTM D 3039** (Reapproved 1989) - Standard Test Method for Tensile Properties of Fiber-Resin Composites.

15- Ferrante, M. **Seleção de Materiais**, 1ª edição, Editora da UFSCar, São Carlos, 1996, pg. 245.

16- **ASTM E 466** - Standard Practice for Conducting Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials.

17- **ASTM D 3479** (Reapproved 1990) - Standard Test Methods for Tension-Tension Fatigue of Oriented Fiber, Resin Matrix Composites.

18- Hibbeler, R. C. **Mechanics of Materials**, 2^a ed, Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1994.

19- **Enciclopédia Modern Plastics**.

20- **ASTM D 792**- Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement.

21- Shakelford, J.F. **Introduction to Materials Science for Engineers**, 4^aed, 1996.

10 ANEXO 1

Conversão de unidades:

a) $1\text{MPa} \times 145 \frac{\text{lbf}}{\text{in}^2}$

Para uma determinada tensão em (MPa) selecionada para trabalhar, será necessário multiplicar por 145,0 para ser convertida em $\left(\frac{\text{lbf}}{\text{in}^2}\right)$

b) $1\text{ in} \times 25,4\text{ mm}$