

**DESENVOLVIMENTO DE COMPÓSITO PARTICULADO  
PORCELANATO/EPÓXI PARA REVESTIMENTO ANTI-EROSIVO EM  
DUTOS**

**POLYANA BORGES DIAS**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE – UENF  
CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ  
OUTUBRO - 2007**

**DESENVOLVIMENTO DE COMPÓSITO PARTICULADO  
PORCELANATO/EPÓXI PARA REVESTIMENTO ANTI-EROSIVO EM  
DUTOS**

**POLYANA BORGES DIAS**

Tese apresentada ao Centro de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense, como parte das exigências para obtenção do título de Doutor em Engenharia e Ciência dos Materiais.

Orientador: Prof. Eduardo Atem de Carvalho

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ  
OUTUBRO-2007

**DESENVOLVIMENTO DE COMPÓSITO PARTICULADO  
PORCELANATO/EPÓXI PARA REVESTIMENTO ANTI-EROSIVO EM  
DUTOS**

**POLYANA BORGES DIAS**

Tese apresentada ao Centro de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense, como parte das exigências para obtenção do título de Doutor em Engenharia e Ciência dos Materiais.

Aprovada em 23 de Outubro de 2007.

Comissão Examinadora:

---

Profa. Marysilvia Ferreira, D.Sc., Química - DEMM – COPPE – UFRJ

---

Elza Maria Senra de Oliveira, D.Sc., Química – CEFET – Campos/RJ

---

Prof. Marcello Filgueira, D.Sc., Engenheiro Mecânico – LAMAV – UENF

---

Prof. Eduardo Atem de Carvalho, Ph.D., Engenheiro Mecânico - LAMAV – UENF  
(orientador)

## **DEDICATÓRIA**

**À minha mãe, por tudo o que  
representa para mim e por ser minha  
fonte de inspiração e modelo de  
superação.**

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, em primeiro lugar, pela força proporcionada para alcançar meus objetivos e por estar sempre ao meu lado em todos os momentos.

A todos os meus familiares, cujo apoio foi fundamental para que as horas difíceis fossem superadas. Agradeço em especial ao meu marido Lessandro pelo incentivo, paciência e disposição em ajudar, estando sempre ao meu lado. E à minha mãe Regina, pela confiança e orgulho que sempre depositou em mim, me dando forças para a conclusão deste trabalho.

Ao professor Eduardo Atem de Carvalho, pela amizade, companheirismo e apoio fundamentais para a realização deste trabalho. Por tudo o que com ele aprendi durante todo o tempo de nossa convivência.

Ao professor Marcello Filgueira, por ter cedido o abrasímetro e também por sua contribuição com conhecimentos.

Ao professor Ângelus Giuseppe Pereira da Silva, pela ajuda na operação do microscópio eletrônico de varredura, e na interpretação das imagens obtidas.

Ao professor Ronaldo Pinheiro da Rocha Paranhos pelo fornecimento da alumina utilizada neste trabalho.

Ao colega Marcílio Nunes Freire, pela amizade e por fornecer as amostras de porcelanato.

Ao bolsista Renan da Silva Guimarães e ao colega doutorando do PPGECM Luciano José de Oliveira pela fundamental ajuda na realização dos ensaios de abrasão.

Ao funcionário do LAMAV/CCT Ronaldo Quintanilha Gomes pelo auxílio na confecção de amostras de abrasão.

À professora Marysilvia Ferreira da COPPE / UFRJ pelo apoio e por ter colocado o equipamento de ensaio de fluência à minha disposição. Agradeço em especial ao seu orientado, Geovanio de Lima Oliveira, cuja ajuda foi fundamental para que ensaios de fluência fossem concluídos e por toda a paciência e disposição em me ajudar.

À FAPERJ, pelo apoio através do benefício E-26/170.569/2004 APQ-1.

## RESUMO

Foi desenvolvido um sistema de proteção contra erosão baseado em misturas contendo porcelanato e alumina na forma de pó fino e uma resina epóxi. Este sistema foi comparado a um revestimento comercial, baseado em alumina em pó e resina epóxi. Inicialmente foi usada uma tinta epóxi visando uma futura redução de custo no produto final, mas com o progresso dos trabalhos, uma resina pura também foi testada como matriz, para maiores demandas de usos. Testes de abrasão, fluência, medição de espessura e rugosidade superficial foram realizados para avaliar o desempenho do novo compósito e possíveis usos. A resina e a tinta receberam teores 0%, 25%, 50% e 75% de partículas sólidas que funcionam como carga particulada nos compósitos. Resultados iniciais apontaram para a resina epóxi com 75% de porcelanato como o mais resistente de todas as misturas (menor perda de massa), e também o que apresentou o maior valor de módulo de fluência e o menor valor de taxa mínima de fluência. Misturas contendo tinta epóxi como matriz mostraram, como era esperado, os menores valores das propriedades medidas, mesmo quando carregadas com alumina finamente particulada, indicando que este compósito deveria ser usado em regiões sub-críticas ou regiões submetidas a processos erosivos de grau leve. A nova barreira de proteção contra erosão proposta revelou-se confiável, apropriado para substituir o revestimento comercial de custo elevado disponível no mercado.

## **ABSTRACT**

An anti-erosion coating system was developed, based on a mixture containing a finely particulated porcelainate and alumina and an epoxy-base resin. This system was compared to a commercially available one, based on alumina powder and an epoxy-based resin. Initially an epoxy-resin-based paint was used, seeking a future cost reduction for the final product, but as the work progressed the pure resin was also tested as composite matrix, for more demanding usages. Abrasion, creep, layer thickness and surface roughness testes were performed to evaluate the new composite performance and possible uses. The resin and paint were loaded with 0%, 25%, 50%, and 75% amounts of solid particles functioning as composite particulate load. Initial results point to a 75% porcelainate mixed with resin as the most resilient of all mixtures (lower mass loss) and also the one showing the largest creep modulus and lowest minimum creep rate. Mixtures containing the epoxy-based paint as matrix showed, as expected, the lowest values for the measured properties, even when loaded with fine powdered alumina. Indicating that this composite should be used in sub-critical regions or regions submitted to mild erosive processes. The proposed new erosion barrier revealed itself reliable, suitable to replace the imported and expensive commercially available equivalent.

## FICHA CATALOGRÁFICA

Preparada pela Biblioteca do **CCT / UENF**

**42/2007**

Dias, Polyana Borges

Desenvolvimento de compósito particulado porcelanato/epóxi para revestimento anti-erosivo em dutos / Polyana Borges Dias. – Campos dos Goytacazes, 2007.

ix, 135 f. : il.

Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais) -- Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de Ciência e Tecnologia. Laboratório de Materiais Avançados. Campos dos Goytacazes, 2007.

Orientador: Eduardo Atem de Carvalho.

Área de concentração: Materiais e meio ambiente

Bibliografia: f. 124-135

1. Erosão 2. Dutos 3. Epóxi 4. Porcelanato 5. Compósito I.  
Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de Ciência e Tecnologia. Laboratório de Materiais Avançados I. Título

CDD 620.118

## SUMÁRIO

|   | Página    |
|---|-----------|
| <b>1 – INTRODUÇÃO</b>   | <b>01</b> |
| <b>2 – OBJETIVOS E JUSTIFICATIVAS</b>                               | <b>04</b> |
| <b>3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>                                    | <b>05</b> |
| 3.1 – Materiais Compósitos  | 05        |
| 3.1.1 – Compósitos Particulados de Matriz Polimérica                | 07        |
| 3.1.1.1 - Fatores que Influenciam no Desenvolvimento dos Compósitos | 10        |
| i) Custo  | 10        |
| ii) Natureza Química, Composição e Impurezas                        | 10        |
| iii) Densidade ou Gravidade Específica                              | 10        |
| iv) Dureza  | 11        |
| v) Abrasão  | 11        |
| vi) Propriedades Óticas   | 12        |
| vii) Propriedades Térmicas  | 12        |
| viii) Forma e Tamanho de Partícula                                  | 13        |
| 3.1.1.2 – Modificação da Superfície                                 | 14        |
| 3.2 – Tintas  | 14        |
| 3.2.1 – Composição das Tintas                                       | 15        |
| 3.2.1.1 – Solventes   | 15        |
| 3.2.1.2 – Resinas   | 16        |
| 3.2.1.3 – Pigmentos   | 19        |
| 3.2.1.4 – Aditivos  | 20        |
| 3.2.2 – Tipos de Tintas, Propriedades e Usos                        | 22        |
| 3.2.2.1 – Tintas Epoxídicas   | 23        |
| i) Tintas Epóxi Curadas com Poliamidas                              | 24        |
| ii) Tintas Epóxi Curadas com Poliaminas                             | 24        |
| iii) Tintas Epóxi Modificadas                                       | 25        |
| iv) Tintas Epóxi Curadas com Isocianatos                            | 25        |
| v) Tintas Epóxi Hidrossolúveis                                      | 25        |
| vi) Massas Epóxi  | 25        |
| vii) Tintas Epóxi Betuminosas                                       | 26        |
| 3.2.3 – Preparo de Superfície e Espessura em Função do Meio         | 26        |
| 3.3 – Porcelanato   | 27        |

|   |           |
|---|-----------|
| 3.4 – A Alumina   | 30        |
| 3.4.1 – Propriedades da Alumina   | 30        |
| 3.4.1.1 - Propriedades Térmicas e Mecânicas                                 | 30        |
| 3.4.1.2 - Propriedades Elétricas  | 33        |
| 3.4.1.3 - Propriedades Óticas   | 34        |
| 3.4.1.4 - Propriedades Químicas   | 34        |
| 3.4.2 – Aplicações  | 34        |
| 3.5 – Erosão  | 37        |
| 3.5.1 - Erosão Associada ao Movimento de Fluidos                            | 40        |
| 3.5.2 - Regimes de Escoamento   | 40        |
| 3.5.3 – Métodos de Prevenção  | 43        |
| 3.6 - Desgaste e Abrasão  | 44        |
| 3.7 – Revestimentos Protetores  | 45        |
| 3.7.1 - Revestimentos Não-Metálicos Orgânicos                               | 47        |
| 3.7.2 - Película de Tinta – Características                                 | 48        |
| 3.8 - Fluência  | 49        |
| 3.8.1 – Parâmetros Característicos do Ensaio de Fluência                    | 50        |
| 3.8.2 – Extrapolação de Características de Fluência para Longos<br>Períodos | 52        |
| 3.9 - Rugosidade superficial  | 57        |
| 3.9.1 – Sistemas de Medição da Rugosidade Superficial                       | 58        |
| 3.9.1.1 – O Sistema M   | 58        |
| 3.9.2 – Parâmetros de Rugosidade Baseados na Profundidade<br>da Rugosidade  | 59        |
| 3.9.2.1 – Rugosidade Média (Ra)   | 59        |
| 3.9.2.2 – Rugosidade Máxima (Ry)  | 61        |
| 3.9.2.3 – Rugosidade Total (Rt)   | 62        |
| 3.9.2.4 – Rugosidade Média (Rz)   | 62        |
| 3.9.2.5 – Rugosidade Média do Terceiro Pico e Vale ( $R_{3z}$ )             | 63        |
| <b>4 – MATERIAIS E MÉTODOS</b>  | <b>65</b> |
| 4.1 – Materiais Utilizados  | 65        |
| 4.1.1 – Porcelanato em pó   | 65        |
| 4.1.2 – Alumina em pó   | 66        |
| 4.1.3 - Proteção Pintável contra Abrasão (PPA)                              | 67        |

|   |           |
|---|-----------|
| 4.1.4 - Tinta epóxi comercial                                     | 67        |
| 4.1.5 – Tinta epóxi com porcelanato em pó                         | 68        |
| 4.1.6 – Tinta epóxi com alumina em pó                             | 68        |
| 4.1.7 - Resina epóxi comercial                                    | 68        |
| 4.1.8 – Resina epóxi com porcelanato                              | 68        |
| 4.1.9 – Resina epóxi com alumina                                  | 69        |
| 4.2 – Microscopia Eletrônica de Varredura dos Pós                 | 69        |
| 4.3 – Preparação das Misturas                                     | 70        |
| 4.4 – Obtenção das Amostras                                       | 71        |
| 4.5 – Ensaio de Abrasão   | 75        |
| 4.6 – Ensaio de Fluência  | 78        |
| 4.7 – Medição de Espessura de Camada e da Rugosidade Superficial  | 82        |
| 4.7.1 – Medição da Rugosidade Superficial                         | 82        |
| 4.7.2 – Medição da Espessura de Camada dos Revestimentos          | 83        |
| 4.7.3 – Cálculo do Fator de Atrito                                | 85        |
| <b>5 – RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>                                 | <b>86</b> |
| 5.1 – Ensaio de Abrasão   | 86        |
| 5.1.1 – Força Tangencial  | 88        |
| 5.2 – Ensaio de Fluência  | 93        |
| 5.2.1 – Ensaio Prévios de Tração                                  | 93        |
| 5.2.2 – Ensaio de Fluência: Obtenção das Deformações versus Tempo | 94        |
| i) Resina Epóxi Pura – Carga de 263,0 N                           | 95        |
| ii) Resina Epóxi com 25% de Alumina - Carga de 457,2 N            | 96        |
| iii) Resina Epóxi com 50% de Alumina - Carga de 440,0 N           | 97        |
| iv) Resina Epóxi com 75% de Alumina - Carga de 422,8 N            | 97        |
| v) Resina Epóxi com 25% de Porcelanato - Carga de 530,0 N         | 98        |
| vi) Resina Epóxi com 50% de Porcelanato - Carga de 365,6 N        | 99        |
| vii) Resina Epóxi com 75% de Porcelanato - Carga de 382,0 N       | 100       |
| viii) Tinta Epóxi Pura - Carga de 33,0 N                          | 101       |
| ix) Tinta Epóxi com 25% de Alumina - Carga de 43,4 N              | 102       |
| x) Tinta Epóxi com 50% de Alumina - Carga de 34,4 N               | 102       |
| xi) Tinta Epóxi com 75% de Alumina - Carga de 74,6 N              | 103       |
| xii) Tinta Epóxi com 25% de Porcelanato - Carga de 74,0 N         | 104       |
| xiii) Tinta Epóxi com 50% de Porcelanato - Carga de 81,2 N        | 105       |

|   |            |
|---|------------|
| xiv) Tinta Epóxi com 75% de Porcelanato - Carga de 58,0 N | 106        |
| xv) PPA - Carga de 164,0 N                                | 107        |
| 5.2.3 – Valores Médios e Máximos do Módulo de Fluência    | 108        |
| 5.2.4 – Taxa Mínima de Fluência                           | 110        |
| 5.2.5 – Deformação Inicial Total                          | 113        |
| 5.3 - Medição da Rugosidade Superficial                   | 115        |
| 5.4 – Medição da Espessura de Camada                      | 119        |
| <b>6 – CONCLUSÕES</b>                                     | <b>121</b> |
| 6.1 - Perda por Abrasão                                   | 121        |
| 6.2 – Fluência  | 121        |
| 6.3 - Rugosidade e Espessura de Camada                    | 122        |
| 6.4 – Sugestões para Trabalhos Futuros                    | 123        |
| <b>7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>                     | <b>124</b> |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|  | Página |
|--|--------|
| Figura 3.1.1 – Alguns tipos de partículas encontradas em compósitos  | 13     |
| Figura 3.2.1 – Obtenção da resina epoxídica  | 17     |
| Figura 3.2.2 – Processo de obtenção da resina epóxi  | 18     |
| Figura 3.2.3 – Valores típicos de participação dos grupos de matérias-primas nos três tipos de tecnologias (para efeitos ilustrativos) | 23     |
| Figura 3.2.4 – Tintas epóxis   | 24     |
| Figura 3.5.1 – Representação esquemática dos defeitos causados por corrosão-erosão na parede de um tubo                                | 37     |
| Figura 3.5.2 – (a) Erosão por impacto e (b) abrasão deslizante   | 39     |
| Figura 3.5.3 - Diagrama de Moody   | 42     |
| Figura 3.8.1 – Curva típica de fluência mostrando os três estágios do ensaio   | 49     |
| Figura 3.8.2 – Tensão x Tempo de ruptura para uma liga de níquel com baixo teor de carbono para três diferentes temperaturas           | 51     |
| Figura 3.8.3 – Efeito da tensão nas curvas de fluência à temperatura constante   | 53     |
| Figura 3.8.4 – Curva típica obtida de um ensaio de fluência  | 54     |
| Figura 3.8.5 – Deformação de um sólido elástico (a) e deformação de um sólido linear viscoelástico (b)                                 | 55     |
| Figura 3.8.6 – Recíproco do módulo de elasticidade $J(t)$ em função do tempo $t$ ; $t'$ é o tempo característico (tempo de retardo)    | 56     |
| Figura 3.9.1 – Comprimentos para Avaliação de Rugosidade   | 58     |
| Figura 3.9.2 – O Sistema da Linha Média  | 59     |
| Figura 3.9.3 – Ilustração do Parâmetro da Rugosidade Média $R_a$   | 60     |
| Figura 3.9.4 - Ilustração do Parâmetro da Rugosidade Máxima $R_y$  | 61     |
| Figura 3.9.5 - Ilustração do Parâmetro da Rugosidade Total $R_t$   | 62     |
| Figura 3.9.6 - Ilustração do Parâmetro da Rugosidade Média $R_z$   | 63     |
| Figura 3.9.7 - Ilustração do Parâmetro da Rugosidade Média do Terceiro Pico e Vale ( $R_{3z}$ )  | 64     |
| Figura 4.1 – Pó de alumina – aumento de 3000 x   | 69     |
| Figura 4.2 – Pó de porcelanato – aumento de 1000 x   | 70     |
| Figura 4.3 – Amostra para ensaio de abrasão  | 72     |
| Figura 4.4 – Molde utilizado para confecção das amostras para ensaio de fluência   | 73     |
| Figura 4.5 – Amostra para ensaio de fluência   | 73     |

|   |    |
|---|----|
| Figura 4.6 - Amostra de aço revestida apenas com tinta epóxi  | 74 |
| Figura 4.7 - Amostra de aço revestida com a PPA   | 74 |
| Figura 4.8 - Amostra de aço revestida com epóxi + 30% porcelanato   | 74 |
| Figura 4.9 - Amostra de aço revestida com epóxi + 50% porcelanato   | 74 |
| Figura 4.10 - Amostra de aço revestida com epóxi + 30% Alumina  | 75 |
| Figura 4.11 - Amostra de aço revestida com epóxi + 50% Alumina  | 75 |
| Figura 4.12 – Abrasímetro AB800-E   | 76 |
| Figura 4.13 - Amostra fixa pelo suporte sobre o disco de granito  | 76 |
| Figura 4.14 – Máquina de Fluência   | 79 |
| Figura 4.15 – Rugosímetro   | 83 |
| Figura 4.16 – Calibração do medidor de espessura  | 84 |
| Figura 5.1 – Gráficos de Força Tangencial x Linha Perimetral Percorrida para as amostras de Resina Pura e RE25P                                     | 88 |
| Figura 5.2 – Gráficos de Força Tangencial x Linha Perimetral Percorrida para as amostras RE50P, RE75P, TE25P, TE50P, TE75P, RE25AL, RE50AL e RE75AL | 89 |
| Figura 5.3 – Gráfico de Força Tangencial x Linha Perimetral Percorrida para as amostras de Tinta Pura, TE25AL, TE50AL, TE75AL e PPA                 | 90 |
| Figura 5.4 – Gráfico dos Valores Médio (pontos azuis) e Máximo (pontos vermelhos) da Força Tangencial Para Todas as Amostras                        | 91 |
| Figura 5.5 – Gráfico de tensão x deformação para uma amostra de resina epóxi Epoxtec 8003 com endurecedor 21Z, ensaiada a 1,5 mm/min                | 93 |
| Figura 5.6 – Gráfico de tensão x deformação para uma amostra de tinta epóxi Brasilux, ensaiada a 50 mm/min  | 94 |
| Figura 5.7 – Deformação x Tempo - Resina Pura   | 95 |
| Figura 5.8 – Módulo de Fluência x t - Resina Pura   | 95 |
| Figura 5.9 – Módulo de Fluência x t – Resina Epóxi Pura – escala logarítmica  | 95 |
| Figura 5.10 – Deformação x Tempo - RE25AL   | 96 |
| Figura 5.11 – Módulo de Fluência x t - RE25AL   | 96 |
| Figura 5.12 – Módulo de Fluência x t - RE25AL – escala logarítmica  | 96 |
| Figura 5.13 – Deformação x Tempo - RE50AL   | 97 |
| Figura 5.14 – Módulo de Fluência x t - RE50AL   | 97 |
| Figura 5.15 – Módulo de Fluência x t - RE50AL – escala logarítmica  | 97 |
| Figura 5.16 – Deformação x Tempo - RE75AL   | 97 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 5.17 – Módulo de Fluência x t - RE75AL                          | 97  |
| Figura 5.18 – Módulo de Fluência x t - RE75AL – escala logarítmica     | 98  |
| Figura 5.19 – Deformação x Tempo - RE25P                               | 98  |
| Figura 5.20 – Módulo de Fluência x t - RE25P                           | 98  |
| Figura 5.21 – Módulo de Fluência x t - RE25P – escala logarítmica      | 99  |
| Figura 5.22 – Deformação x Tempo - RE50P                               | 99  |
| Figura 5.23 – Módulo de Fluência x t - RE50P                           | 99  |
| Figura 5.24 – Módulo de Fluência x t - RE50P – escala logarítmica      | 99  |
| Figura 5.25 – Deformação x Tempo - RE75P                               | 100 |
| Figura 5.26 – Módulo de Fluência x t - RE75P                           | 100 |
| Figura 5.27 – Módulo de Fluência x t - RE75P – escala logarítmica      | 100 |
| Figura 5.28 – Deformação x Tempo - Tinta Pura                          | 101 |
| Figura 5.29 – Módulo de Fluência x t - Tinta Pura                      | 101 |
| Figura 5.30 – Módulo de Fluência x t - Tinta Pura – escala logarítmica | 101 |
| Figura 5.31 – Deformação x Tempo - TE25AL                              | 102 |
| Figura 5.32 – Módulo de Fluência x t - TE25AL                          | 102 |
| Figura 5.33 – Módulo de Fluência x t - TE25AL – escala logarítmica     | 102 |
| Figura 5.34 – Deformação x Tempo - TE50AL                              | 102 |
| Figura 5.35 – Módulo de Fluência x t TE50AL                            | 102 |
| Figura 5.36 – Módulo de Fluência x t - TE50AL – escala logarítmica     | 103 |
| Figura 5.37 – Deformação x Tempo - TE75AL                              | 103 |
| Figura 5.38 – Módulo de Fluência x t - TE75AL                          | 103 |
| Figura 5.39 – Módulo de Fluência x t - TE75AL – escala logarítmica     | 103 |
| Figura 5.40 – Deformação x Tempo - TE25P                               | 104 |
| Figura 5.41 – Módulo de Fluência x t - TE25P                           | 104 |
| Figura 5.42 – Módulo de Fluência x t - TE25P – escala logarítmica      | 104 |
| Figura 5.43 – Deformação x Tempo - TE50P                               | 105 |
| Figura 5.44 – Módulo de Fluência x t - TE50P                           | 105 |
| Figura 5.45 – Módulo de Fluência x t - TE50P – escala logarítmica      | 105 |
| Figura 5.46 – Deformação x Tempo - TE75P                               | 106 |
| Figura 5.47 – Módulo de Fluência x t - TE75P                           | 106 |
| Figura 5.48 – Módulo de Fluência x t - TE75P – escala logarítmica      | 106 |
| Figura 5.49 – Deformação x Tempo - PPA                                 | 107 |
| Figura 5.50 – Módulo de Fluência x t - PPA                             | 107 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 5.51 – Módulo de Fluência x t - PPA – escala logarítmica   | 107 |
| Figura 5.52 – Valores médios (pontos azuis) e máximos (pontos vermelhos)<br>dos módulos de fluência de cada amostra | 109 |
| Figura 5.53 – Taxa mínima de fluência de cada mistura   | 111 |
| Figura 5.54 – Taxa mínima de fluência para todas as misturas, exceto a TE25AL                                       | 112 |
| Figura 5.55 – Gráfico dos valores de deformação inicial total de todas as<br>amostras                               | 114 |
| Figura 5.56 - Comparação da rugosidade adimensional com o aumento de carga  | 116 |

## ÍNDICE DE TABELAS

|  | Página |
|--|--------|
| Tabela 3.2.1 – Tipos de resinas e solventes apropriados  | 16     |
| Tabela 3.2.2 – Propriedades da resina epóxi  | 19     |
| Tabela 3.2.3 – Preparo de superfície e espessura da película recomendadas para jateamento abrasivo | 27     |
| Tabela 3.2.4 – Preparo de superfície e espessura da película recomendadas para Limpeza mecânica    | 27     |
| Tabela 3.4.1 – Dados de fluência da alumina  | 31     |
| Tabela 3.4.2 – Propriedades da alumina   | 32     |
| Tabela 3.4.3 – Algumas propriedades da alumina   | 35     |
| Tabela 3.9.1 – Classe de rugosidade  | 61     |
| Tabela 4.1 – Composição da alumina   | 66     |
| Tabela 4.2 – Algumas propriedades do plasteel  | 67     |
| Tabela 4.3 – Área das amostras para ensaio de fluência   | 80     |
| Tabela 4.4 – Valores de carga utilizada no ensaio de fluência                                      | 81     |
| Tabela 5.1 – Resultados do ensaio de abrasão   | 86     |
| Tabela 5.2 – Valores Médios e Máximos do Módulo de Fluência  | 109    |
| Tabela 5.3 – Taxa mínima de fluência de cada amostra   | 111    |
| Tabela 5.4 – Deformação Inicial Total das Amostras   | 113    |
| Tabela 5.5 – Rugosidade Superficial antes e depois das amostras serem revestidas                   | 115    |
| Tabela 5.6 - Valor da Rugosidade Relativa Média de cada lote de amostras                           | 117    |
| Tabela 5.7 – Rugosidade Relativa das Amostras Antes e Após Revestimento Para Diâmetro de 48”       | 118    |
| Tabela 5.8 - Rugosidade Relativa das Amostras Antes e Após Revestimento Para Diâmetro de 4”        | 119    |
| Tabela 5.9 – Medida da Espessura de Camada Média após o revestimento                               | 120    |

## CAPÍTULO 1

### 1 – INTRODUÇÃO

A existência de interações de origem física e/ou química entre um material e o seu meio de operação conduz a alguma espécie de deterioração, o que impreterivelmente representará alterações indesejáveis, reduzindo tanto a durabilidade quanto o desempenho dos mesmos para aquele fim ao qual havia sido destinado originalmente (Silva, 2007).

Problemas de deterioração são muito freqüentes, ocorrendo nas mais variadas atividades, e acarretam imensas perdas econômicas, sejam estas devido à substituição de peças ou equipamentos, manutenção de processos de proteção, paralisações acidentais, perda de eficiência, contaminação de produtos, questões de segurança ou até ao super dimensionamento nos projetos.

Dentro deste cenário prejudicial é crescente o desenvolvimento de novas tecnologias de proteção e a disseminação do uso das técnicas já existentes. A aplicação de tintas ou de sistemas de pintura é uma das técnicas de proteção mais empregadas, apresentando uma série de propriedades importantes, tais como facilidade de aplicação e de manutenção, relação custo-benefício atraente, redução da rugosidade superficial (redução da perda de carga), impedimento da incrustação de microorganismos e prevenção anticorrosiva.

Os dutos são tubulações especialmente desenvolvidas e construídas de acordo com normas internacionais de segurança, para transportar petróleo e seus derivados, álcool, gás e produtos químicos diversos, por distâncias especialmente longas, sendo então denominados oleodutos, gasodutos ou polidutos. Eles devem permitir que grandes quantidades de produtos sejam deslocados de maneira segura ([www.cetesb.sp.gov.br/Emergencia/acidentes/dutos.asp](http://www.cetesb.sp.gov.br/Emergencia/acidentes/dutos.asp), 11/04/06).

Mesmo construídos e operados dentro dos padrões máximos de segurança internacional, os dutos empregados na indústria do petróleo estão sujeitos, entre outros fatores, à corrosão, erosão, e/ou à sua ação conjunta, os quais podem ocasionar os vazamentos e, em função da alta pressão com que os produtos são bombeados e da periculosidade das substâncias transportadas, os danos ambientais

e sócio-econômicos raramente são pequenos. Apesar disso, o transporte por dutos é o modo mais barato de se conduzir óleo e gás (Agência USP de Notícias - <<http://www.usp.br/agen/rede813.htm>>, 11/04/06).

O petróleo é um produto cuja composição varia devido a sua origem natural e às condições do transporte e de armazenamento. No Brasil, o petróleo cru, em particular, vem de uma variedade dos campos de óleo muito diferentes que produzem o petróleo predominantemente pesado, mais denso, viscoso e escuro, carregado com partículas, sendo de extrema importância a proteção efetiva dos dutos através dos quais este óleo é transportado (Falla et al, 2005).

A presença de partículas, junto à velocidade com que este fluido viscoso é bombeado desde longas profundidades, acelera o processo de erosão do revestimento protetor anticorrosão, removendo-o antes do tempo previsto em comparação a um fluido sem partículas, desta forma expondo o substrato à ação corrosiva do fluido e caracterizando o fluxo do petróleo como um escoamento em regime turbulento e multifásico.

Para evitar esse tipo de problema, foi desenvolvido um material compósito, cuja matriz é tinta epóxi e a carga consiste de alumina em pó, sendo também utilizado um porcelanato em pó, desenvolvido no Laboratório de Materiais Avançados da UENF, ainda em processo de patenteamento, com o intuito de revestir internamente esses dutos, protegendo o substrato contra a corrosão-erosão, possibilitando a diminuição do desgaste, o aumento da sua produtividade, a diminuição dos custos e dos riscos de acidentes. Para fins de comparação, também foi estudada uma proteção pintável contra abrasão (comercial), utilizada atualmente no mercado para proteção contra corrosão-abrasão em superfícies metálicas, composta de resina epóxi e partículas cerâmicas.

As amostras foram preparadas através da mistura da tinta epóxi com os 2 tipos diferentes de pós cerâmicos (alumina e porcelanato) nas proporções de 0%, 25%, 50% e 75% em peso de carga, seguida da deposição das misturas em matrizes plásticas e secagem das mesmas por cerca de 5 dias. Após isso, foram cortadas 4 amostras no formato retangular para cada porcentagem de carga. Também foi utilizada uma resina epóxi, que foi misturada aos pós citados acima, nas mesmas proporções.

Foram realizados ensaios de abrasão nas amostras, com a finalidade de se obter a perda de massa das mesmas, e com isso determinar sua resistência ao desgaste. O mesmo foi feito com as amostras da tinta comercial, e os resultados foram comparados.

Para se obter informações a respeito da previsão do comportamento deste material sob uma tensão constante em função do tempo, foram realizados ensaios de fluência em amostras moldadas em matrizes cujo formato é o mesmo utilizado para ensaios de tração, ou seja, segundo a norma ASTM D638.

Por fim, para se ter uma noção da aplicação desse revestimento, de uma chapa de aço carbono foram cortadas diversas amostras que receberam uma camada de todos os tipos de revestimento acima citado. Tais amostras foram submetidas a ensaios de medição de espessura e também da rugosidade superficial, que foi medida antes e após a aplicação do revestimento.

## **CAPÍTULO 2**

### **2 – OBJETIVOS E JUSTIFICATIVAS**

O objetivo principal deste trabalho é avaliar, através de uma série de testes disponíveis, as propriedades mecânicas de um compósito particulado que se pretende usar como barreira mecânica contra erosão.

O objetivo específico a ser atingido é a avaliação da viabilidade do emprego de um porcelanato, desenvolvido com matérias-primas locais, em substituição à alumina, como uma carga adicionada em uma tinta de base epóxi, obtendo-se dessa forma um revestimento de proteção contra erosão, que contribuirá para a qualidade das pesquisas a eles relacionadas.

O setor de Materiais e Meio Ambiente (SEMMA) do LAMAV/CCT tem como uma de suas metas divulgar e apresentar alternativas que permitam o uso correto dos procedimentos científicos na determinação das propriedades mecânicas em materiais. Em especial, neste trabalho será dada toda a atenção aos materiais compósitos, pois esta classe de materiais vem sendo muito estudada, e sua aplicação como revestimento interno de tubulações aparentemente é uma solução para casos de vazamentos que freqüentemente ocorrem na indústria petrolífera devido à ação erosiva provocada pelos fluidos que por elas passam.

O fato de se utilizar um revestimento de material compósito que consiste de um porcelanato em pó misturado a uma matriz epoxídica como barreira mecânica de proteção contra erosão é inédito, ou seja, nunca se estudou o comportamento desses materiais para fins de proteção anti-erosão. Além disso, o Estado do Rio de Janeiro tem como uma de suas prioridades o apoio à indústria do petróleo, e como no LAMAV, laboratório do CCT da UENF, estão freqüentemente sendo realizados novos trabalhos que envolvem a determinação de materiais alternativos que possam substituir os já existentes com uma diminuição no custo, justifica-se então esta presente tese de Doutorado.

## CAPÍTULO 3

### 3 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 – Materiais Compósitos

Também conhecidos como materiais conjugados ou compostos, são fabricados pela união de dois ou mais tipos de materiais, formando uma estrutura com propriedades mais vantajosas do que as de cada material isoladamente, para determinados usos tecnológicos (Monteiro, 1990).

Segundo Mano (1991), os compósitos representam um caso de especial importância dentro do grupo de misturas poliméricas imiscíveis. Eles constituem uma classe de materiais heterogêneos, multifásicos, podendo ser ou não poliméricos, em que um dos componentes, descontínuo, dá a principal resistência ao esforço (componente estrutural), e o outro, contínuo, é o meio de transferência desse esforço (componente matricial). Esses componentes não se dissolvem, mas atuam consertadamente, sendo as propriedades do conjunto superiores às de cada componente individual. São formados por elementos de reforço em grau variável de ordenação, que se distribuem em uma matriz flexível.

O componente estrutural pode ser um material orgânico ou inorgânico, de forma regular ou irregular, fibroso ou pulverulento (esférico ou cristalino), com os fragmentos achatados (como flocos) ou como fibras muito curtas de material monocristalino. Quando combinados com polímeros de alta resistência ao calor, as temperaturas de aplicação desse compósito podem chegar a 900 °C, enquanto que, com materiais termoplásticos comum essas temperaturas não ultrapassam 100 °C, e com os termorrígidos, 300 °C (Mano, 1991).

A função dos materiais estruturais é suportar as cargas máximas e impedir que as deformações ultrapassem limites aceitáveis. Quando associados a componentes resinosos, resultam materiais que apresentam resistência mecânica muito elevada.

O componente matricial é quase sempre um polímero orgânico macio ou duro, termoplástico (aquele que amolece quando aquecido e endurece quando

resfriado) ou termorrígido (aquele que permanece endurecido quando aquecido, e somente a temperaturas excessivas se degrada). Seu papel é manter a orientação das fibras e seu espaçamento, transmitir as forças de cisalhamento entre as camadas de fibras e protegê-las de danos superficiais.

Seif et al. (2006) apresentam uma técnica para avaliar tensões residuais em compósitos de componentes cilíndricos de mísseis. A técnica proposta é uma combinação da técnica da fenda (slitting) acompanhada de análise de processamento de imagem para medir deslocamentos causados pela liberação de tensões residuais. Resultados mostraram que as tensões tangenciais são mais de uma ordem de grandeza maiores que na direção radial. As tensões residuais tangenciais têm valores máximos na fronteiras sob compressão no diâmetro externo e tração no diâmetro interno.

Khashaba et al. (2006) investigaram a influência de certos fatores na resistência de juntas parafusadas de compósito de epóxi reforçado com fibra de vidro. Esses fatores incluem torque de aperto e o tamanho do diâmetro externo da arruela. Resultados indicaram que sob o mesmo torque, a inclinação dos diagramas carregamento x deslocamento de juntas trancadas (rigidez) aumenta com o decréscimo no tamanho da arruela.

Morais e D'Almeida (2003) fizeram ensaios de flexão em placas finas de compósitos de matriz epoxídica reforçada por fibra de vidro, carbono e aramida. Os compósitos reforçados por fibras de carbono apresentaram maiores valores de força máxima, porém apresentaram os menores valores de deflexão.

Gonçalves et al. (2001) determinaram as tensões de falha, os módulos de elasticidade e o módulo de falha de cilindros fabricados em carbono/epóxi, submetidos a cargas compressivas uniaxiais. Observou-se que para um mesmo raio e uma mesma espessura, a variação do comprimento do cilindro não mudou os valores das tensões de falha e módulos de elasticidade. Este módulo tende a aumentar quando a orientação das camadas se alinha à direção do carregamento, mas torna o material mais suscetível à flambagem.

Tarpani et al. (2006) determinaram propriedades de tração quase estática em quatro compósitos laminados de carbono-epóxi, nos estados como recebido e pré-fadigado. Em geral, um desempenho máximo foi obtido pelos compósitos de fibra de

carbono impregnados com resina epóxi padrão e com resina epóxi de borracha endurecida.

Quatro famílias de compósitos reforçados com fibra de carbono usados na indústria aeronáutica foram avaliadas por Paiva et al. (2005) através de testes de cisalhamento interlaminar e de flexão. Também foram realizados testes de compressão em três famílias de compósitos reforçados com fibra de carbono condicionados e não condicionados. Os compósitos de matriz epoxídica F584 apresentaram propriedades mecânicas superiores quando comparados ao F155. Os resultados de compressão mostraram que o condicionamento higrotérmico causou diminuição da resistência à compressão.

Kuo et al. (2004) investigaram três tipos de compósitos cerâmicos com matriz epóxi. Os cerâmicos utilizados são  $BaTiO_3$  sintetizado e comercial e  $Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O_3$ . Foram discutidos efeitos do raio das fibras, temperatura e frequência do teste nas propriedades dielétricas dos três compósitos. As melhores propriedades dielétricas foram obtidas pelo  $BaTiO_3/Epóxi$ .

Hussaim et al. (1996) apresentaram três rotas de fabricação de compósitos de epóxi com partículas cerâmicas, e a técnica do moinho de bolas a úmido foi a mais efetiva, além de ser a que apresentou melhores resultados de propriedades mecânicas.

Tubos de fibra de vidro de parede fina reforçados com epóxi foram estudados em termos de seu comportamento de flambagem. Estes materiais têm considerável potencial de absorção de energia, comparável ou em alguns casos superior a estruturas de metais. Amostras de diversos diâmetros e espessuras foram sujeitas a esmagamento lateral e foram apresentadas curvas de compressão. Os tubos de GFRE exibiram um fenômeno de absorção de energia estável e efetivo (Gupta e Abbas, 2000).

### **3.1.1 – Compósitos Particulados de Matriz Polimérica**

Para se desenvolver um compósito particulado, é preciso responder às seguintes questões (Rothon, 1995):

- 1 – Quais os benefícios de propriedades são procurados?
- 2 – Quais as mudanças maléficas podem ocorrer? Elas podem ser toleradas?
- 3 – Qual a facilidade de se manipular as partículas e como isso pode afetar o processo?
- 4 – São necessários aditivos especiais?
- 5 – Qual é o custo real do uso das partículas? Ele é justificável? Há alternativas de custo mais efetivo?

Callister (2000) define duas subclassificações para compósitos particulados: de partículas grandes e fortalecidos por dispersão. Para os compósitos particulados de partículas grandes, as interações partícula-matriz não podem ser tratadas em nível atômico ou molecular. Para a maioria deles, a fase particulada é mais dura e forte do que a matriz. Elas tendem a restringir o movimento da matriz nas suas vizinhanças. A matriz transfere parte da tensão aplicada às partículas, que suporta uma fração do carregamento.

Para os compósitos fortalecidos por dispersão, as partículas são normalmente muito menores. As interações partícula-matriz levam ao fortalecimento ocorrer em nível atômico ou molecular. Uma vez que a matriz suporta a maior parte do carregamento aplicado, as pequenas partículas dispersas retardam ou impedem o movimento de discordâncias.

Salazar et al. (2006) estudaram compósitos de cerâmicos celulares de diferentes tamanhos de célula combinados com uma resina epóxi vinil-éster, onde os poros interconectados (células abertas) no cerâmico permitiram o fluxo do polímero através deles. Como a distribuição do polímero através dessa estrutura é contínua, houve uma boa transmissão de tensões entre as fases, resultando em propriedades mecânicas superiores. Foi observado que o polímero sofreu deformação plástica enquanto que a fase cerâmica foi submetida a forças cisalhantes resultando em fratura isolada.

Rousseau e Tippur (2002) avaliaram experimentalmente vigas de epóxi preenchido com microesferas de vidro classificado sob condições de carregamento estático e dinâmico. Deformações na ponta da trinca foram medidas antes do início

da trinca através de métodos óticos. Sob condições de carregamento estático, os gradientes elásticos ofereceram proteção à ponta da trinca.

Kubernach e Miller (1997) estudaram um revestimento que consiste de um sistema resina epóxi modificada, carregada com um pó cerâmico, que apresenta resistência à adesão, flexão, corrosão, abrasão e erosão. Observaram-se melhores resultados quando o revestimento é aplicado por um spray. Foi observado que esse revestimento tem um potencial significativo na indústria aeroespacial e pode reduzir custos com manutenção de rotina.

Wetzel et al. (2003) apresentaram um trabalho onde diversas partículas (micro e nano escalas) de silicato de cálcio e alumina foram introduzidas a um polímero a base de epóxi para fins de reforço. Foi investigada a influência dessas partículas na energia de impacto, resistência à flexão, propriedades termodinâmicas-mecânicas e desgaste. A adição de alumina à resina epóxi melhorou a rigidez, a energia de impacto e a deformação de fratura para pequenas concentrações de alumina (1-2 %vol). Uma pequena melhora na resistência ao desgaste foi observada para 2 %vol de alumina. A introdução de micropartículas de silicato de cálcio à matriz, numa proporção otimizada de 2 %vol aumenta o módulo de flexão e aumenta a resistência ao desgaste.

Muraki et al. (2002) apresentaram um método de medição de tensões residuais e aplicadas em um sistema polimérico que utiliza o efeito da piezo-espectroscopia de fluorescência ótica das partículas de alumina que preenchem a matriz epoxídica. A correlação linear entre o pico de deslocamento de frequência e tensões trativas sugere que as tensões aplicadas se transferem para a alumina através da matriz. Os valores de tensão medida através da técnica de fluorescência e pelos componentes de tensão trativa calculados por FEM tiveram uma boa coincidência.

Hanemann (2007) estudou a influencia de diferentes partículas de alumina dispersas em matriz de poliéster. Foi encontrado que a viscosidade do compósito depende fortemente das propriedades das partículas, como tamanho, distribuição de tamanho, carga sólida e especialmente a área superficial específica.

Mendonça et al. (2007) estudaram propriedades Mecânicas, módulo de elasticidade e limite de resistência à compressão de compósitos particulados de resina epóxi com pó de granito, além de sua densidade e coeficiente de expansão

térmica linear. O melhor desempenho estrutural foi apresentado pelos compósitos com 20%p de resina epóxi.

### 3.1.1.1 - Fatores que Influenciam no Desenvolvimento dos Compósitos

#### i) Custo

É de conhecimento geral que os polímeros são caros e as partículas são baratas, e muitos artigos sobre polímeros carregados com partículas começam com a afirmação que essas partículas são usadas para diminuir o custo. Mas não é bem isso que acontece, já que, muitas vezes, os custos do composto podem ser maiores do que o do polímero não modificado.

Isso ocorre, em primeiro lugar, devido ao fato do processo de preenchimento ser custoso, em relação a capital de investimento, trabalho humano e energia (é requerida mais energia para processar o material preenchido do que o polímero virgem). E em segundo lugar, os preços das partículas e dos polímeros são fornecidos por peso, e assim muitas partículas não fornecerão uma economia significativa (Rothon, 1995).

#### ii) Natureza Química, Composição e Impurezas

A natureza química das partículas é de pequena importância no seu uso em compósitos, mas tem um papel de determinar a estrutura do material e também a natureza da interação entre o polímero e a partícula. Dessa forma, somente partículas quimicamente reativos afetam as propriedades do compósito.

#### iii) Densidade ou Gravidade Específica

A densidade é determinada pelo tamanho dos átomos que formam o material, pela proximidade deles e pelas impurezas presentes na rede cristalina: quanto mais

pesados forem os átomos e quanto mais eles estiverem empacotados, maior será a densidade.

A gravidade específica é o peso da substância em relação ao peso de um volume equivalente de água, A maioria das partículas possui gravidade específica na faixa de 1.6 a 2.8, enquanto que a dos polímeros fica na faixa de 0.9 a 1.2.

A densidade dos pós é de importância comercial, pois indicam a facilidade de manuseio e sua incorporação ao polímero. A densidade volumétrica da partícula é determinada pela densidade real, pelo formato da partícula e pelo seu tamanho, mas o processo de produção tem um papel importante. Um pó com uma baixa densidade volumétrica em relação à sua densidade real irá conter grande quantidade de ar. Isso o fará fluir com facilidade, mas tornará a sua incorporação ao polímero difícil.

#### iv) Dureza

É a resistência que o material oferece ao risco. Está relacionada à estrutura do material, à resistência das ligações químicas e à densidade de empacotamento dos átomos.

Quando uma mistura de partículas é usada, se um for mais duro que o outro, pode ocorrer diminuição do mais macio. Partículas macias podem se fraturar quando compósitos poliméricos são deformados, limitando suas propriedades de reforço.

#### v) Abrasão

A abrasividade de um compósito devido às suas partículas adicionadas se origina de algumas propriedades importantes. A dureza é um fator importante, assim como o fato destas partículas serem grandes e angulares (com ângulos agudos). O ataque químico pode ser causado por partículas reativas, levando à erosão progressiva.

Dias et al. (2000) mostraram que a adição de cristais de elevada dureza a matrizes vítreas resultou na obtenção de compósitos de elevada resistência ao

desgaste, ou seja, baixa perda volumétrica de material quando submetidos ao desgaste abrasivo. Quanto maior a dureza, maior a resistência ao desgaste dos materiais. Para que os cristais sejam considerados elementos de reforço, devem possuir maior dureza que as matrizes.

#### vi) Propriedades Óticas

A cor, a opacidade e o brilho do compósito são fortemente afetados pelas partículas a ele adicionadas. Essas partículas adicionadas, geralmente, possuem tamanhos da ordem de um comprimento de onda de luz visível. Portanto, grandes superfícies vão refletir e transmitir a luz, mas as partículas vão espalhá-la.

As propriedades óticas podem também ser afetadas pelo fato que as partículas podem afetar a morfologia do plástico por nuclearem sua cristalização na interface. Assim, um compósito com diferente espalhamento de luz (e conseqüentemente diferentes propriedades óticas) pode ser obtido.

#### vii) Propriedades Térmicas

As principais propriedades térmicas de interesse são calor específico, condutividade térmica e coeficiente de expansão.

Os calores específicos da maioria das partículas inorgânicas são similares aos dos polímeros comuns, e a regra das misturas fornece uma boa aproximação dos valores encontrados nos compósitos.

As partículas possuem condutividades térmicas de uma ordem de grandeza a mais que a maioria dos polímeros. Em geral, os compósitos são mais condutores que seus polímeros de base.

A maioria dos polímeros possui coeficientes de expansão de no mínimo uma ordem de grandeza maior que os das partículas. Algumas partículas possuem coeficiente de expansão térmica negativos, e são usadas para se obter compósitos com zero de expansão. As diferenças na expansão entre partícula e matriz resultam

em um contato íntimo entre eles em um compósito, e conseqüentemente tensões consideráveis ocorrem.

#### viii) Forma e Tamanho de Partícula

Esses fatores podem influenciar no fluxo do pó, na viscosidade e nas suas propriedades mecânicas, térmicas e óticas.

A forma da partícula é importante na determinação da rigidez do compósito, na reologia de um líquido, na resistência ao impacto e à tração e na suavidade da superfície. A Figura 3.1.1 mostra algumas formas de partícula típicas. Existem problemas na distinção entre partículas primárias, aglomerados e agregados (Rothon, 1995).



Figura 3.1.1 – Alguns tipos de partículas encontradas em compósitos (Rothon, 1995)

Muitas partículas são extraídas do solo ou rochas, processadas, e assim exibirão a mesma forma original. Outras, entretanto, podem ser extraídas por rotas mais complicadas envolvendo intensiva cominuição, o que altera sua forma. Isto é determinado pela natureza química e resistência das ligações entre átomos.

O tamanho da partícula é uma variável que pode ser controlada por cada partícula (pelo menos teoricamente) e sua importância é sentida em todos os estágios da produção e uso dos compósitos. Por isso há um considerável interesse em medi-las, especialmente a distribuição de tamanho de partícula. Isto é uma

propriedade fácil de se medir com acurácia usando uma variedade de técnicas, incluindo peneiramento, sedimentação, espalhamento ótico e difração das partículas em suspensão. Porém, existem problemas devido ao fato da maioria das partículas possuírem forma irregular e apresentarem uma ampla faixa de tamanhos, algumas sendo partículas individuais e outras sendo um aglomerado delas. Dessa forma, não é possível descrever completamente o tamanho das partículas. Comercialmente, os fabricantes cotam dois ou três valores para indicar o tamanho das partículas.

### 3.1.1.2 – Modificação da Superfície

Melhoras nas propriedades mecânicas, dispersão das partículas, melhor reologia e carregamentos maiores das partículas estão associados a uma superfície mais hidrofóbica e compatível com o polímero.

A modificação de superfície mais usada é o tratamento com ácido esteárico, que reagem com o material de base para fornecer uma superfície que é coberta com íons orgânicos fortemente ligados.

Também estão disponíveis tratamentos de superfície com aditivos bifuncionais, que formam ligações fortemente covalentes para as partículas, que se ligam ao polímero por uma variedade de mecanismos.

## 3.2 - Tintas

Segundo a norma ISO 4618, tinta é um produto líquido ou em pó que quando aplicado sobre um substrato, forma uma película opaca, com características protetoras decorativas ou técnicas particulares. Uma outra definição clássica de tintas é: tinta é uma composição líquida que depois de aplicada sobre uma superfície, passa por um processo de secagem ou cura e se transforma em um filme sólido, fino, aderente, impermeável e flexível (Gnecco et al., 2003). Para o aço, a tinta é um produto que tem tanto a função protetora como decorativa.

Filho, O.A. (2003) fez um estudo que trata sobre tintas cerâmicas com ênfase aos produtos utilizados em revestimentos cerâmicos. Foi relatado que os grupos de tinta mais utilizados na indústria cerâmica são: tintas para terceira queima (para

queimas a temperaturas ao redor de 800°C, mais utilizadas atualmente na produção de louça de mesa), tintas à base de metais preciosos (também utilizadas a cerca de 800 °C, fornecidas em pastas ou líquidos), tintas para vidro (para decoração de vidros em geral, usadas para queima em temperaturas de 480 °C a 750 °C), tintas para decoração de revestimentos (aplicadas por serigrafia e através de rolos), tintas para serigrafia (compostas de fluxo mais corante, aplicadas em telas) e tintas para aplicação por rolo (maior concentração de corantes que as tintas de serigrafia).

### 3.2.1 – Composição das Tintas

As tintas são compostas por 4 grupos de matérias-primas: solventes, resinas, pigmentos e aditivos (Gnecco et al., 2003).

#### 3.2.1.1 - Solventes

Podem ser de diferentes naturezas químicas: hidrocarbonetos alifáticos (aguarrás e naftas leves), hidrocarbonetos aromáticos (xileno e tolueno), glicóis (etil glicol, acetato de etil glicol, acetato de butil glicol), acetatos (acetato de etila, acetato de butila, acetato de isopropila), cetonas (metil etil cetona - MEK, metil isobutil cetona - MIBK e ciclohexanona) e álcoois (álcool isopropílico e álcool butílico).

Todos são compostos orgânicos 100% voláteis e têm a função de diluir a resina, diminuindo sua viscosidade para facilitar a aplicação, além de homogeneizar a película, melhorar a aderência e atuar sobre a secagem. Sua origem é o petróleo.

Além de sua volatilidade e seu poder de solvência, os solventes apresentam inflamabilidade e toxicidade. Eles apresentam um cheiro característico, mas já foram lançadas algumas tintas com solventes de baixo odor, como o aguarrás de baixo odor.

### 3.2.1.2 – Resinas

São componentes que fornecem resistência às tintas e melhoram seu comportamento frente ao meio agressivo. As resinas são conhecidas como ligante ou veículo fixo, e são responsáveis pelas propriedades de aderência, impermeabilidade e flexibilidade. Hoje em dia, as resinas são todas orgânicas, de natureza polimérica, exceto o silicato inorgânico de zinco, que se trata de um veículo inorgânico à base de silicatos de sódio, potássio ou lítio.

As resinas mais importantes das tintas para pintura em aço são: alquídicas, acrílicas, epoxídicas, poliuretânicas, etil silicato de zinco e silicone.

De acordo com o tipo de resina, deve-se selecionar o solvente apropriado para dissolvê-la. A tabela 3.2.1 apresenta alguns tipos de resinas e seus solventes.

Tabela 3.2.1 – Tipos de resinas e solventes apropriados (Gnecco et al., 2003)

| <b>Tipo de resina</b>  | <b>Tipo de solvente mais usado</b>   |
|------------------------|--|
| Alquídica              | Aguarrás ou xileno ou misturas destes  |
| Acrílica               | Misturas de acetatos, xileno, cetonas e álcoois cíclicos   |
| Epóxi                  | Misturas de MEK (metil etil cetona) e MIBK (metil isobutil cetona) com xileno e álcool butílico          |
| Poliuretano            | Acetato de etila, acetato de butila e misturas de MEK (metil etil cetona) e MIBK (metil isobutil cetona) |
| Etil silicato de zinco | Álcool isopropílico e álcool butílico  |
| Silicone               | Xileno e tolueno   |

Neste trabalho, será utilizada a resina epoxídica, que será abordada a seguir.

#### - Resina Epoxídica

É constituída de éter de glicidil e bisfenol A (EDGBA), sendo catalisada com poliaminas, poliamidas e isocianato alifático.

## - Resina Epóxi

É obtida a partir da salmoura e do petróleo, como ilustra o esquema ilustrado na Figura 3.2.1.

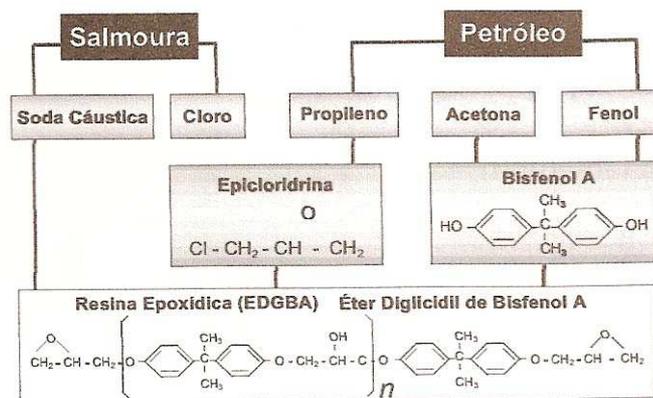


Figura 3.2.1 – Obtenção da resina epoxídica (Gnecco et al., 2003)

Os grupos C-C-O das extremidades são os grupos epóxi que dão nome à resina. A letra  $n$  indica o número de repetições do grupo entre parênteses. Quanto maior for  $n$ , mais flexível, mais impermeável e mais aderente é a resina. Além disso, um valor grande de  $n$  indica que a resina é sólida, e um valor pequeno de  $n$  indica que a resina é líquida.

Segundo Fazenda (2005), as resinas epóxi são polímeros caracterizados pela presença de grupos glicídila em sua molécula, além de outros grupos funcionais. Elas têm aplicações importantes nos campos de tintas, adesivos, laminados, eletrônica (encapsulamento), etc.

Na maioria das vezes, a resina epoxídica é obtida pela reação do bisfenol A [2,2 bis (4'-hidroxi-fenil) propano] com a epícloridrina (1-cloro-2,3-epóxi-propano) na presença de hidróxido de sódio. A Figura 3.2.2 ilustra esse processo. Nela, a estrutura (1) representa a resina epoxídica de menor peso molecular, sendo conhecida como o éter diglicídil do bisfenol A (DGEBA). A estrutura (2) representa a fórmula das resinas epoxídicas comerciais. Quando  $n = 0$ , a estrutura (2) coincide com a estrutura (1) (Fazenda, 2005).

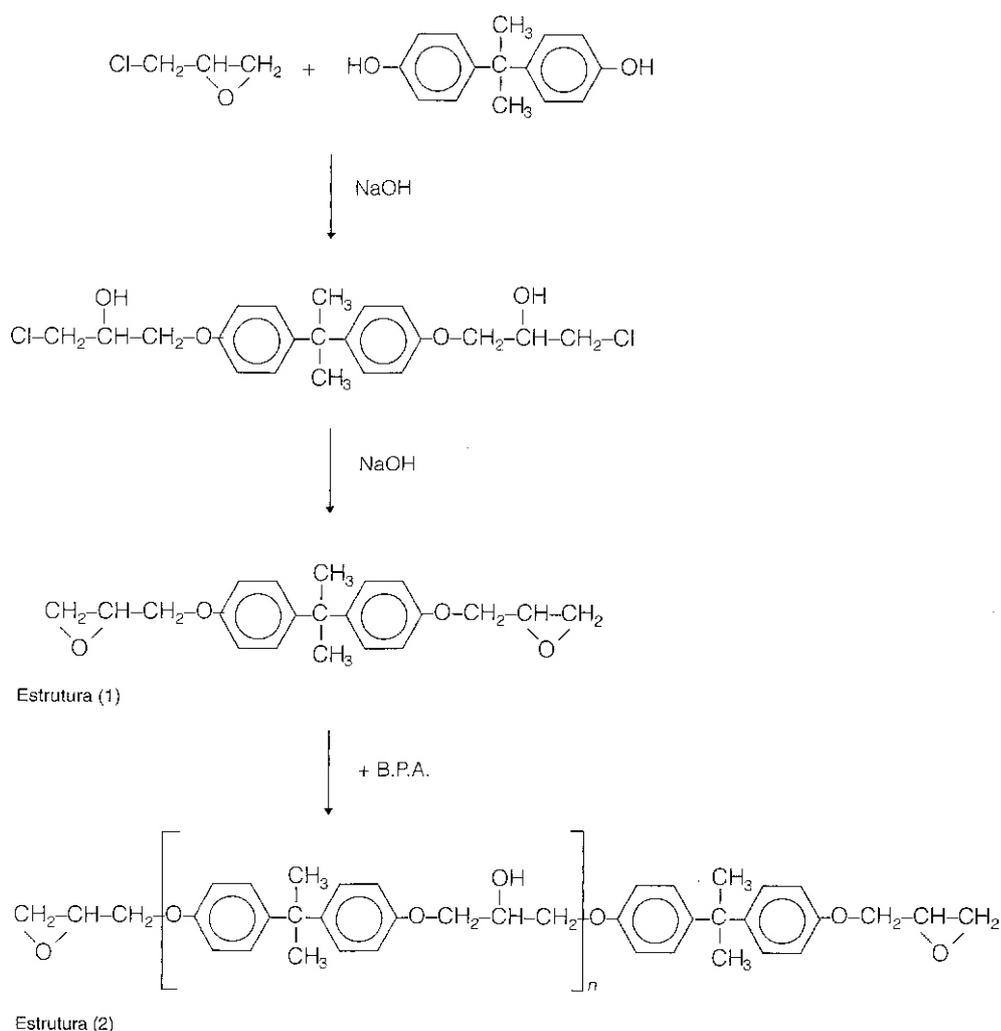


Figura 3.2.2 – Processo de obtenção da resina epóxi (Fazenda, 2005)

A resina epóxi sozinha não tem propriedades interessantes para a tinta. Ela precisa reagir com outra resina chamada catalisador, agente de cura ou endurecedor, e dependendo da sua natureza química teremos propriedades diferentes (Gnecco et al., 2003).

O'Brien et al. (2001) investigaram o módulo de relaxação dependente da cura de uma resina epóxi. Foi utilizado o teste de fluência em flexão a 3 pontos e também reometria de placas paralelas. Os dados foram convertidos para módulo de relaxação de tensão para comparação do comportamento do material entre os vários estados de cura. Os resultados indicaram que pequenas mudanças no estado de cura têm um efeito profundo na relaxação, especialmente próximos à transição vítrea.

As resinas mais utilizadas para reagirem com a resina epóxi são a poliamina, a poliamida e o isocianato. A poliamina produz polímeros com excelente dureza, aderência, resistência química e física e resistência a solventes, combustíveis e lubrificantes. A poliamida produz polímeros com excelente dureza, flexibilidade, aderência e excelente resistência à água e à umidade. E o isocianato produz polímeros com excelente aderência sobre metais não ferrosos (Gnecco et al., 2003).

Os sistemas epóxi bicomponentes são usados na formulação de tintas protetivas de alto desempenho para manutenção industrial, revestimentos de alta resistência química, de alta aderência, de excelente resistência à abrasão, etc. Porém, as resinas epóxi apresentam um comportamento insatisfatório ao intemperismo natural, pois os produtos nela baseados apresentam calcinação quando usados no revestimento de superfícies que estejam expostas às intempéries. Além da calcinação, apresentam também um forte amarelecimento (Fazenda, 2005).

Algumas propriedades da resina epóxi são apresentadas na tabela 3.2.2 a seguir.

Tabela 3.2.2 – Propriedades da resina epóxi (Ashby e Jones, 1994)

| E (GPa) | $\sigma_c$ (MPa) | $\alpha$ (M°C <sup>-1</sup> ) | $\rho$ (Mg/m <sup>3</sup> ) |
|---------|------------------|-------------------------------|-----------------------------|
| 2,1-5,5 | 45-85            | 55-90                         | 1,3                         |

### 3.2.1.3 – Pigmentos

São pós muito finos, podendo ser brancos, pretos, coloridos, incolores, metálicos, anticorrosivos e inertes.

Os pigmentos coloridos dão cor às tintas. As cores primárias mais importantes são: branca, preta, vermelha, laranja, amarela, verde, azul, púrpura, alumínio e dourada. As combinações de cores primárias dão origem a inúmeras outras cores.

Os pigmentos anticorrosivos produzem modificações no agente agressivo atenuando sua agressividade quando este permeia as camadas das tintas. A maioria dos gases no meio industrial é ácida, e os pigmentos anticorrosivos agem para neutralizá-los ou até mesmo alcaliniza-los, fazendo com que não haja corrosão. Há

outros pigmentos que se dissolvem formando uma camada protetora que isola o substrato metálico do meio agressivo. Os pigmentos anticorrosivos mais usados em superfícies de aço carbono são: cromato de zinco, zarcão, fosfato de zinco, silicato de cálcio, zinco metálico, óxido de ferro, pigmentos lamelares e óxido de ferro micáceo.

Os pigmentos inertes, também chamados de cargas, não têm cor, não são opacos e nem sempre têm mecanismos de proteção anticorrosiva, mas proporcionam propriedades específicas às tintas. Os mais importantes são: mica, talco, caulim, óxido de ferro micáceo, sílicas, quartzo e óxido de alumínio. São várias as funções destes pigmentos nas tintas, a lembrar: proporcionar estabilidade da tinta na estocagem, melhorar sua lixabilidade, diminuir o custo das tintas, melhorar a resistência ao desgaste, aumentar a espessura por demão da tinta, evitar escorrimento e melhorar a resistência à abrasão.

Existem pigmentos inorgânicos e orgânicos. Os pigmentos inorgânicos são os pigmentos brancos, cargas, e uma grande faixa de pigmentos coloridos, sintéticos ou naturais. Um exemplo é o dióxido de titânio, um dos mais importantes pigmentos brancos produzidos, sendo sua produção mundial em torno de 2,5 milhões de ton/ano. Sua aplicação varia desde em tintas arquitetônicas e industriais, até em plásticos, borrachas e papel. Sua propriedade mais importante é sua habilidade de opacificar e branquear o meio no qual é disperso. Já os pigmentos orgânicos são substâncias orgânicas corantes insolúveis no meio em que estão sendo utilizados e normalmente não têm características ou funções anticorrosivas. Apresentam-se na forma de pequenos cristais de formas variadas. Suas aplicações são diversas, tais como em tintas imobiliárias, industriais e automotivas (Fazenda, 2005).

#### 3.2.1.4 – Aditivos

São adicionados para melhorar o processo de fabricação, de estocagem e de aplicação das tintas. As quantidades de adição são pequenas, da ordem de 0,1 a 1,0 %. Os principais tipos são: dispersantes ou tensoativos ou umectantes, que facilitam a introdução dos pigmentos durante a fabricação, estabilizam a suspensão dos pigmentos durante a estocagem e aumentam a aderência das tintas enquanto elas estão líquidas; espessantes, que propiciam maior estabilidade à tinta na estocagem

e possibilitam maiores espessuras por demão nas aplicações em superfícies verticais; secantes, que são catalisadores metálicos que aceleram a secagem de tintas alquídicas agindo nos óleos vegetais que as compõem, fazendo com que o oxigênio reaja mais rápido; antibolhas, que são componentes à base de silicone, que não impedem a formação de bolhas de ar, mas possibilitam a eliminação rápida destas, que são introduzidas nas tintas durante a agitação e principalmente durante a aplicação a rolo; por fim, antinata, que são compostos voláteis, adicionados às tintas durante a sua fabricação, impedindo a reação do oxigênio do ar com os óleos das tintas alquídicas, enquanto elas estão fechadas na embalagem (Gnecco et al., 2003).

Segundo Fazenda (2005), os aditivos são componentes que, mesmo adicionados em pequena quantidade às tintas, influem significativamente na manufatura, estabilidade, aplicabilidade, qualidade e aspecto do filme aplicado. O total de aditivos raramente excede 5% da composição de uma formulação. Quanto ao mecanismo de atuação, os aditivos podem ser divididos em quatro grupos:

a) Aditivos de Cinética

- Secantes
- Catalisadores
- Antipeles

b) Aditivos de Reologia

- Espessantes
- Antiescorrimento

c) Aditivos de Processo

- Surfactantes
- Umectantes e dispersantes
- Antiespumantes
- Nivelantes

#### d) Aditivos de Preservação

- Biocidas
- Estabilizantes de ultravioleta

### 3.2.2 – Tipos de Tintas, Propriedades e Usos

Devido à evolução da tecnologia, as tintas podem ser classificadas pelo seu conteúdo de solventes nos seguintes tipos, alto VOC e baixo VOC. A sigla VOC é inglesa e significa “volatile organic compounds”, ou seja, conteúdo de compostos orgânicos voláteis.

As resinas, em geral, possuem alta viscosidade, e para serem afinadas (ou diminuir sua viscosidade) são adicionados os solventes que têm poder de solvência sobre a resina. A água, apesar de não ser um solvente da resina, pode afiná-la, pois é um meio de dispersão. Dessa forma, quanto mais água é adicionada, menos viscosa fica a tinta.

As novas tecnologias possibilitaram a fabricação de tintas com menor quantidade de solventes, mas que podem ser aplicadas como tintas convencionais. São as tintas de altos sólidos (HS) e de baixo VOC.

Em paralelo, também foram desenvolvidas as tintas à base de água (WB), e hoje existem tintas WB tão boas e até melhores do que aquelas à base de solventes. São tintas com VOC baixíssimos. Existe uma tendência de se produzir tintas com VOC zero, chamadas de “No VOC”.

As resinas à base de água são muito parecidas com aquelas à base de solventes, porém, a tecnologia para emulsionar ou dispersar estas resinas em água exigiu pesquisa e desenvolvimento em aditivos e técnicas de fabricação. Não é o caso de simplesmente substituir solventes orgânicos por água, e sim um novo conceito de matérias-primas empregadas para que as tintas pudessem conter menos solventes, ou até não contê-los. Estas tintas são chamadas ecologicamente corretas, e suas vantagens são enormes: o pintor fica menos exposto aos efeitos dos solventes, a empresa corre menos risco de explosões e incêndios e o meio ambiente é menos poluído.

A Figura 3.2.3 ilustra os valores típicos de misturas de matérias-primas nos três tipos de tecnologias.

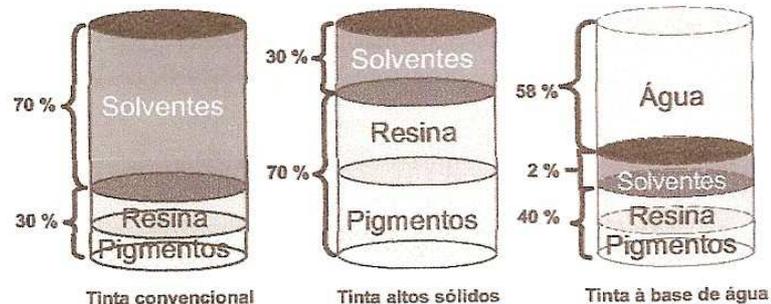


Figura 3.2.3 – Valores típicos de participação dos grupos de matérias-primas nos três tipos de tecnologias (para efeitos ilustrativos) (Gnecco et al., 2003)

As tintas podem ser classificadas pelo tipo de resina que elas usam. As principais classes são: tintas alquídicas, tintas acrílicas e tintas epoxídicas.

### 3.2.2.1 - Tintas Epoxídicas

São tintas bicomponentes de secagem ao ar. As tintas fabricadas com resinas epóxi para uso com agentes de cura são fornecidas em duas embalagens separadas, uma contendo a tinta e outra contendo o agente de cura que pode ser à base de aminas, amidas ou isocianatos. A mistura dos dois componentes é feita segundo uma proporção estequiométrica, assegurando um balanço tal que, cada grupo amínico se combine na razão adequada com os grupos epóxi presentes, e para que a reação entre ambos se faça de maneira completa. Logo após a mistura, dá-se início à reação entre as resinas. Recomenda-se de 15 a 20 minutos de espera antes da utilização do produto para que ocorra uma interação entre os componentes. Este período é chamado de *tempo de indução*. Os componentes continuarão reagindo até a solidificação desta mistura ou estado no qual tornar-se-á impossível sua utilização (Jordano e Maluf, 2005). A Figura 3.2.4 ilustra esse tipo de tinta.

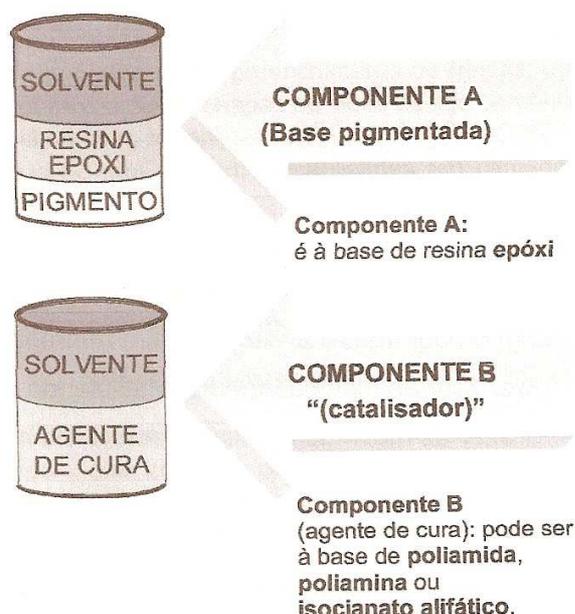


Figura 3.2.4 – Tintas epóxis (Gnecco et al., 2003)

D’Almeida et al. (2003) investigaram o envelhecimento a temperatura ambiente de formulações a base de epóxi. Resultados obtidos mostraram que misturas ricas em epóxi tiveram sua fragilidade aumentada pelo envelhecimento devido a recristalização dos monômeros de epóxi não reagentes.

#### i) Tintas Epóxi Curadas com Poliamidas

Possuem ótima resistência à umidade, imersão em água doce ou salgada, flexibilidade e aderência em aço carbono ou concreto, conferidas pelo agente de cura à base de resina poliamida. São usadas para pintura interna de reservatórios de água potável em temperaturas até 55 °C.

#### ii) Tintas Epóxi Curadas com Poliaminas

São tintas que apresentam excelente resistência à imersão em soluções ou vapores de produtos químicos. São usadas para pintura interna de tanques, tubulações, equipamentos e estruturas sujeitas a imersões, derrames ou respingos de produtos químicos e/ou solventes.

### iii) Tintas Epóxi Modificadas

Possuem tecnologia moderna, com características das poliaminas, porém muito próximas das poliamidas. Por isto podem substituir os dois tipos de tintas. Quando formuladas com pigmentos lamelares, inibidores de corrosão ou aditivos tensoativos, conferem proteção anticorrosiva a superfícies que não podem receber jateamento abrasivo.

### iv) Tintas Epóxi Curadas com Isocianatos

São utilizadas como primer de aderência sobre superfícies de aço galvanizado, alumínio, aço inoxidável ou outros metais não ferrosos e sobre poliéster reforçado com fibras de vidro.

### v) Tintas Epóxi Hidrossolúveis

São as tintas à base de água (WB). Possuem facilidade de diluição, baixo nível de odor e emissão de solventes próximo de zero. São recomendadas para superfícies de concreto ou de aço carbono em ambientes de baixa e média agressividades. Apesar de todo o desenvolvimento tecnológico, essas tintas não são recomendáveis para trabalhos de imersão.

### vi) Massas Epóxi

São composições com alto teor de sólidos em volume, utilizadas para nivelamento de superfícies pintadas ou a serem pintadas com tintas epóxi ou poliuretanos. Além disso, podem ser usadas para proteção de porcas e parafusos e no preenchimento de juntas em pisos cerâmicos. Devem ser aplicadas em uma única camada, porém não maior que 50 mm.

## vii) Tintas Epóxi Betuminosas

São fornecidas em duas embalagens, uma contendo resina poliamida ou poliamina mais alcatrão de hulha, e a outra contendo resina epóxi. Apresentam a alta inércia química do alcatrão de hulha associada com a impermeabilidade da resina epóxi. Resistem a diversos ambientes corrosivos, têm boa flexibilidade, boa aderência e boa resistência ao impacto. São altamente resistentes à abrasão quando formuladas com cargas de alta dureza. São aplicadas com espessuras de 125 a 400  $\mu\text{m}$  em uma única demão. Recomendadas para pintura de reservatórios de água industrial, peças imersas, submersas ou enterradas e para pintura interna de tubulações e tanques das estações de tratamento de efluentes. Não são recomendadas para pintura interna de reservatórios de água potável. São apresentadas nas cores marrom ou preta somente.

### 3.2.3 – Preparo de Superfície e Espessura em Função do Meio

Cabe ao fabricante especificar o grau de limpeza da superfície, a tinta e a espessura da película da pintura em função da agressividade do ambiente.

Quanto melhor o preparo da superfície e quanto maior a espessura, mais duradoura será a proteção que o sistema de pintura oferecerá ao aço. Porém, deve-se levar em conta a relação custo/benefício. Um bom preparo de superfície custa caro, mas a pintura terá maior durabilidade. As Tabelas 3.2.2 e 3.2.3 mostram o preparo de superfície e espessuras de películas para diferentes meios, para jateamento abrasivo e limpeza mecânica. Nelas, o termo Sa 2 ½ significa que o tipo de preparação da superfície é por jato ao metal quase branco; o termo Sa 3 significa jato ao metal branco; e o termo St 3 significa limpeza mecânica.

Tabela 3.2.3 – Preparo de superfície e espessuras da película recomendadas para jateamento abrasivo (Gnecco et al., 2003)

| Ambiente                             | Rural    | Urbano    | Industrial ou Marítimo | Peças Enterradas | Imersão   |
|--------------------------------------|----------|-----------|------------------------|------------------|-----------|
| Preparo de superfície mínimo         | Sa 2 1/2 | Sa 2 1/2  | Sa 2 1/2               | Sa 2 1/2         | Sa 3      |
| Faixa de espessura ( $\mu\text{m}$ ) | 80 a 125 | 100 a 200 | 240 a 300              | 400 a 500        | 375 a 500 |

Tabela 3.2.4 – Preparo de superfície e espessuras da película recomendadas para limpeza mecânica (Gnecco et al., 2003)

| Ambiente                             | Rural     | Urbano    | Industrial ou Marítimo | Peças Enterradas | Imersão |
|--------------------------------------|-----------|-----------|------------------------|------------------|---------|
| Preparo de superfície mínimo         | St 3      | St 3      | St 3                   | -                | -       |
| Faixa de espessura ( $\mu\text{m}$ ) | 125 a 175 | 150 a 250 | 250 a 375              | -                | -       |

### 3.3 – Porcelanato

O grês porcelanato é um produto fundamentalmente composto de argila, feldspato e quartzo, tratado termicamente para formar uma mistura de vidro e fases cristalinas. O termo grês é definido como qualquer produto esmaltado “o qual, embora denso, impermeável e resistente o suficiente para resistir a arranhões com uma ponta de aço, difere-se da porcelana por ser mais opaco e, geralmente, parcialmente vitrificado. Ele pode ser vítreo ou semivítreo”. Já o termo porcelânico se refere a um produto cerâmico totalmente vitrificado, impermeável, branco ou artificialmente colorido, translúcido (exceto quando é muito espesso) e ressonante (Freire, 2007).

As principais características do grês porcelanato são: altíssima resistência à abrasão, resistência ao gelo, resistência a ácidos e álcalis, uniformidade de cores, impermeabilidade, facilidade de manutenção e amplas possibilidades de composições. O grês porcelanato tem características que superam o desempenho do mármore, granito, pedra ao Tomé etc. Sua absorção de água é baixíssima. Segundo a norma ISO 13006, deve ser inferior a 0,5%. Sua carga de ruptura, segundo esta norma, deve ser superior a 1300 N, e sua resistência à abrasão deve ser de no máximo  $175 \text{ mm}^2$ . No seu processo de fabricação, a moagem é uma etapa importante, já que o controle sobre a granulometria deve ser mantido para a garantia

das condições de compactação. Já na prensagem ocorre redução da porosidade interna, e a pressão de compactação varia de 400 a 500 kg/cm<sup>2</sup>. E a sinterização é feita a temperaturas de 1200 a 1250 °C (Heck, 1996) .

De acordo com a norma NBR 13818 (NBR 13818, 1997), o grês porcelanato é classificado como pertencente ao grupo dos revestimentos gresificados Ia, com absorção d'água inferior a 0,5% do seu volume, e é fabricado por prensagem. Esta mesma norma estabelece que o grês porcelanato deve apresentar as seguintes características físicas: tensão de ruptura à flexão igual ou superior a 35 MPa para espessura superior a 7,0 mm, coeficiente de dilatação térmica linear igual ou inferior a  $9 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ , e dureza superficial igual ou superior a 5 Mohs, dentre outras.

Na literatura são encontradas diversas definições para o grês porcelanato. Rincón e Romero (2001) o definem como “aquele formulado com critérios de composição muito semelhantes ao da porcelana: mistura de areias de quartzo ou feldspáticas, feldspatos e argilas com um alto teor de caulim”. Sua microestrutura é formada por uma rede tridimensional de cristais alongados e extremamente pequenos de uma fase denominada mulita (silicato de alumínio cristalizado), um vidro feldspático que aglomera as cristalizações de mulita e o quartzo residual.

Rincón e Romero (2001) ainda citam que “a obtenção de cristais de mulita bem e uniformemente desenvolvidos, o que se consegue com temperaturas de queima superiores (1200-1300°C) às usuais na fabricação de grês convencional é a chave para obter um produto de grês porcelanato com melhores propriedades tecnológicas face às suas aplicações”.

Sánchez et al. (2001) dizem que “o grês porcelanato é um produto de corpo colorido, podendo ser ou não decorado superficialmente, que tem uma absorção de água muito baixa (tipicamente abaixo de 0,1%). Trata-se de um revestimento cerâmico de excelentes características técnicas, destacando-se sua elevada resistência mecânica, ao risco e ao ataque químico”.

Segundo Llorenz (2000), o termo GP (grês porcelanato) tem sido utilizado para designar um pavimento não esmaltado e homogêneo; embora, nos últimos anos, este termo tem sido aplicado a produtos vidrados com muito baixa absorção de água, os quais levam o qualificativo de esmaltados.

Segundo Zanelli et al. (2003), “peças de GP são produtos de baixa porosidade com excelente performance técnica, particularmente com respeito às propriedades mecânica e tribológica, tanto quanto à resistência química e ao gelo”.

Oliveira (1998), em seu trabalho, cita “o grês porcelanato, sem dúvida, é atualmente a cerâmica de revestimento que apresenta as melhores características técnicas e estéticas, em confronto com as demais categorias de cerâmicas tradicionais encontradas no mercado. Tal sucesso se deve a um longo processo de desenvolvimento e amadurecimento tecnológico, o qual permitiu a elaboração de um material constituído por fases cristalinas de elevada dureza e muito denso. Do ponto de vista técnico, o grês porcelanato é um material polifásico contendo cerca de 40% de fase vítrea e porosidade residual”.

Riella et al. (2002), relatam que “o grês porcelanato é, dentre os materiais cerâmicos para pavimentação, aquele que melhor se presta a solicitações de desgaste, em consequência da sua elevada dureza superficial. Além disso, apresenta ótimas propriedades de anticongelamento, de resistência mecânica à flexão e compressão”.

Por último, Cavalcante et al. (2003), estabelecem a resistência à abrasão do grês porcelanato como um dos requisitos técnicos mais importantes, pelo fato deste material ser freqüentemente colocado em ambiente sujeito a alto tráfego. A resposta do gres porcelanato à solicitação mecânica é prevalementemente frágil. A quantidade de massa  $Q$  que pode ser retirada por abrasão de um material frágil é diretamente proporcional à carga aplicada  $W$  e inversamente proporcional à dureza  $H$  e à tenacidade à fratura  $K_c$ :  $Q \approx W / H.K_c$ .

Como se pode verificar, cada um dos diversos autores citados enfatiza sua definição de grês porcelanato em um ponto de vista diferente. Devido ao elevado percentual de fase vítrea, a absorção d'água desse material é muito baixa, e isso é o que melhor o caracteriza. Quanto mais próxima de zero, melhor é a absorção d'água, e isso leva ao aumento de algumas propriedades como resistência mecânica, resistência ao gelo, resistência química e dureza (Freire, 2007).

### 3.4 – A Alumina

A alumina é um termo químico específico para definir o óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Ela pode ser usada em aplicações sem a solicitação de tração, que sejam sujeitas a alta temperatura e alto desgaste.

Além das suas propriedades favoráveis para ser utilizada como carga, a alumina foi escolhida para fins comparativos neste trabalho, pois ela também é usada como carga no revestimento comercial (PPA).

#### 3.4.1 – Propriedades da Alumina

A alumina é produzida pelo aquecimento de hidratos de alumina. Diversas estruturas de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  podem se formar inicialmente com o aumento da temperatura, mas todas as estruturas são transformadas irreversivelmente em  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ , com a estrutura do corundum (sistema hexagonal). A  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  é geralmente usada para aplicações estruturais e elétricas (Engineered Materials Handbook, 1991).

##### 3.4.1.1 - Propriedades Térmicas e Mecânicas

Devido à forte ligação química entre íons de Al e O, a alumina possui estabilidade física proeminente, tal como elevado ponto de fusão (2050 °C), a maior dureza de todos os óxidos e elevada resistência mecânica.

A resistência mecânica é elevada à temperatura ambiente, mas diminui bastante acima dos 1100 °C.

Zhao e Li (2007) incorporaram nanoesferas de alumina à resina epóxi e observaram o efeito da absorção de água nas propriedades mecânicas e dielétricas deste compósito. Resultados mostraram que a incorporação de nanopartículas de alumina à resina epóxi pode melhorar a rigidez da matriz, e que estas partículas podem promover o aumento da constante dielétrica da resina epóxi, devido ao aumento na área interfacial total. Sob absorção de água, as propriedades mecânicas do nanocompósito diminuem evidentemente, devido ao dano que a água provoca na

resina. Porém, a ductilidade pode melhorar com o processo de absorção de água, e há um aumento na constante dielétrica e na perda dielétrica.

A condutividade térmica da alumina é relativamente grande entre os óxidos. Entretanto, pelo fato do coeficiente de expansão térmica ser alto, a resistência ao choque térmico ( $\Delta T$  de 110 a 270 °C) é menor do que os valores do  $\text{Si}_3\text{N}_4$  e  $\text{SiC}$ .

Xin et al. (2006) depositaram um revestimento cerâmico em uma liga de alumínio e observaram a composição e a estrutura por difração de Raio X e microscopia eletrônica. A densidade, porosidade, propriedades térmicas e resistência adesiva do revestimento foram investigadas por análise térmica diferencial, dilatométrica térmica e teste de estiramento. Resultados mostraram que a densidade do revestimento é de  $2,88 \text{ g.cm}^{-3}$  e sua porosidade é de 13 a 16%. O coeficiente de expansão térmica foi de  $6,6 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ .

A tenacidade à fratura à temperatura ambiente é de  $3,85$  a  $3,95 \text{ MPa}\sqrt{m}$  na alumina sinterizada (densidade relativa de 95% e tamanho médio de grãos de  $2 \mu\text{m}$ ), e de  $4,18$  a  $5,9 \text{ MPa}\sqrt{m}$  na alumina prensada a quente (densidade relativa de 99,5% e tamanho médio de grãos de  $2 \mu\text{m}$ ). A tabela a seguir resume alguns dados de fluência da alumina com densidade superior a 99,5%.

Tabela 3.4.1 – Dados de fluência da alumina (Engineered Materials Handbook, 1991).

| T (°C) | Tensão (MPa) | Taxa de Fluência (cm/cm.h) |
|--------|--------------|----------------------------|
| 1300   | 21           | $18,5 \times 10^{-6}$      |

Outras propriedades da alumina 99% são resumidas na tabela 3.4.2 a seguir.

Tabela 3.4.2 – Propriedades da alumina (Bagnato, 2002)

| Material                             | Resistividade Volumétrica ( $\Omega \cdot \text{cm}$ ) a 25°C | Coefficiente Linear de Expansão Térmica ( $10^{-6}/^\circ\text{C}$ ) a 25-200 °C | Resistência à Flexão (MPa) | Módulo de Elasticidade (GPa) |
|--------------------------------------|---|--|----------------------------|------------------------------|
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 90%   | > 10 <sup>14</sup>  | 6,8  | 359                        | 288                          |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 95%   | > 10 <sup>14</sup>  | 6,0  | 366                        | 310                          |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 99,5% | > 10 <sup>14</sup>  | 8,8  | 323                        | 366                          |

Soriano e Almeida (2003) usaram equações constitutivas de viscoelasticidade não linear para representarem o comportamento dependente do tempo de um compósito carbono/epóxi durante o crescimento de dano. Um procedimento foi proposto para separar viscoelasticidade e efeitos de danos. Um programa experimental que consiste de fluência de múltiplos ciclos e testes de recuperação foi desenvolvido para determinar a dependência da submissão ao cisalhamento com o tempo. Os resultados indicaram uma excelente concordância com a teoria.

Wilshire e Bache (2007) documentaram propriedades de fluência trativa e de fratura para dois compósitos de matriz cerâmica reforçados com fibra. Resultados confirmaram que fibras longitudinais governam as taxas de acumulação de deformação e crescimento de trinca, mas as características de fratura são determinadas por falha das fibras causada pela penetração de oxigênio com o desenvolvimento de trincas na matriz frágil.

A fluência em filtros cerâmicos de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sob compressão a diferentes temperaturas foi avaliada por Salvini et al. (2001). De acordo com os resultados, supõe-se que o modo de deformação por flambagem dos filamentos paralelos, a carga aplicada é um dos principais fatores que contribui para o aumento da taxa de deformação do filtro.

Santos et al. (2005) estudaram a anisotropia no comportamento à fluência de cerâmicas de Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> prensadas a quente. Resultados mostraram que amostras confeccionadas no plano perpendicular ao eixo de prensagem a quente sofreram

maiores deformações que as amostras do plano paralelo. Isso ocorre devido à orientação dos grãos alinhados com o eixo de aplicação de carga compressiva durante os ensaios de fluência.

Guedes (2007) revisou modelos aplicados para prever o tempo de vida de materiais compósitos em casos especiais de carregamento constante (ruptura de fluência) e taxas de tensão constantes de fratura. Por fim, uma nova formulação foi proposta para prever o carregamento arbitrário. Esta formulação apresentou uma boa concordância com dados experimentais.

Kang e Mercer (2007) mediram propriedades de fluência da alumina crescida termicamente, em diferentes espessuras, e em diferentes proporções de Y e Ti. Resultados apontaram que a porcentagem de Y pode influenciar a deformação de crescimento e a taxa de fluência.

Sánchez-González et al. (2007) avaliaram as propriedades mecânicas da alumina policristalina comercial como uma função da temperatura através de ensaios de fluência. Resultados revelaram um forte declínio no módulo de Young e na tensão de escoamento do material a uma temperatura de 600 °C, devido à degradação dos contornos de grãos.

#### 3.4.1.2 - Propriedades Elétricas

A alumina é um típico material isolante. A resistividade de cerâmicas de alta pureza com uma baixa concentração de álcalis é mais de  $10^{15}$  Ω.cm à temperatura ambiente.

Os valores de módulo de elasticidade, condutividade térmica e resistividade elétrica aumentam muito com o decréscimo do grau de pureza, mas são mais dependentes da densidade e da microestrutura.

M'Peko et al. (2003) estudaram diversas composições de compósitos zircônia-alumina em termos de sua resposta elétrica. A condutividade dos grãos e a constante dielétrica apresentaram as características típicas previstas pela teoria da percolação. Observou-se também que a zircônia inibe o crescimento de grãos da alumina.

### 3.4.1.3 - Propriedades Óticas

A alumina possui um índice de refração de 1,760. Quando a ela são adicionados MgO e Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, os poros são efetivamente eliminados e ocorre proteção contra o crescimento anormal dos grãos.

Li e Huang (2007) investigaram a propriedade de luminescência de membranas de alumina. Verificou-se que uma banda de emissão de fotoluminescência azul ocorre na faixa de comprimentos de onda de 300 a 600 nm. Também concluiu-se que a intensidade da emissão de fotoluminescência e a posição dos picos das membranas de alumina dependem do comprimento de onda da excitação.

Kortov et al. (2007) estudaram o espectro de foto e catodoluminescência de uma alumina nanoestruturada. Foi determinado que as características de luminescência desta cerâmica estão relacionadas à presença de fases de não-equilíbrio e processos de relaxação.

### 3.4.1.4 - Propriedades Químicas

A alumina é muito estável quimicamente e possui uma alta resistência à corrosão. Ela é insolúvel em água e levemente solúvel em ácido forte e solução alcalina. A pressão de vapor é pequena, mesmo a temperaturas elevadas.

### 3.4.2 - Aplicações

A alumina é considerada um óxido refratário básico. Dependendo da aplicação, os refratários devem resistir ao ataque químico, ao metal fundido e à erosão pela escória, a choque térmico, ao impacto físico, ao calor e a condições adversas similares, geralmente em ambientes de elevada temperatura.

As estruturas que utilizam produtos refratários são fornos, vasos de pressão e vasos de processos de refino de aço.

A alumina é aplicada em revestimento interno de tubos ou calhas, moinhos de bolas e operações de manuseio de materiais. Ela é geralmente de baixo custo e fornecida por uma grande variedade de empresas. Algumas de suas propriedades são:

Tabela 3.4.3 – Algumas propriedades da alumina (Engineered Materials Handbook, 1991)

|  |        |
|--|--------|
| Densidade (g/cm <sup>3</sup> )                                       | 3,72   |
| Módulo de Ruptura (MPa)  | 358    |
| Tenacidade à Fratura (MPa)   | 3 a 4  |
| Dureza Knoop (kg/mm <sup>2</sup> )                                   | 1088   |
| Módulo de elasticidade (GPa)   | 303    |
| Choque térmico máximo (Δ°C)  | 250    |
| Perda volumétrica (resistência à erosão a seco) (cm <sup>3</sup> /h) | 0,50   |
| Abrasão deslizante (mm <sup>3</sup> /h)                              | 14.000 |

- Aplicação em oleodutos

Oleodutos de cerâmica têm sido usados com sucesso tanto em sistemas hidráulicos quanto pneumáticos.

- Aplicação em bombas e válvulas

Bombas de cerâmica são usadas para fluidos agressivos onde a abrasão elevada, a corrosão e/ou temperatura degradam o metal ou polímero.

Materiais cerâmicos também têm sido usados com sucesso em válvulas de controle de fluxo, válvulas de bobinas e válvulas de diafragma.

- Aplicação em ferramentas de corte

Cerâmicas baseadas em óxido de alumínio são utilizadas na fabricação de ferramentas de corte desde a década de 20. Embora tenham elevada dureza e resistência química, elas possuem uma fragilidade inerente que limita seu uso. Porém, na década de 60, cientistas melhoraram este material pelo refino e adição de elementos de liga, dando a ele elevada tenacidade e confiabilidade. Mesmo melhorados, estes materiais continuavam com aplicação limitada em cortes ininterruptos de profundidade leve a moderada.

Nas décadas de 70 e 80, melhorias de processos e adições de óxido de zircônia e outros agentes de liga melhoraram a resistência e a tenacidade à fratura desses materiais, levando a uma ampla utilização do óxido de alumínio em ferramentas de corte (Engineered Materials Handbook, 1991).

- Biocerâmicas de alumina

Alumina de alta pureza é usada em próteses de bacia e implantes dentários, devido à combinação de excelente resistência à corrosão, boa biocompatibilidade, alta resistência ao desgaste e alta resistência mecânica.

Outras aplicações seriam em próteses de joelho, parafusos para ossos, reconstrução facial, etc.

- Revestimentos cerâmicos

São usados efetivamente em diversas aplicações de elevada temperatura, fornecendo economia de energia, prolongando a vida útil de componentes e aumentando a produção.

Os cerâmicos apresentam propriedades desejáveis para o uso em revestimentos. Cerâmicas cristalinas, por exemplo, fornecem ao revestimento uma proteção térmica, altos níveis de resistência à abrasão e ao desgaste e resistência à corrosão e oxidação (Engineered Materials Handbook, 1991).

### 3.5 - Erosão

A corrosão-erosão surge da ação combinada do ataque químico com a abrasão ou desgaste mecânico, como uma consequência do movimento de um fluido. Essa ação conjunta começa com a erosão provocada por partículas abrasivas em uma superfície metálica de uma liga que é passivada pela formação de uma película protetora, por exemplo. Com a erosão dessa película ou filme protetor, deixando exposta a superfície de metal nu. Se o revestimento não for capaz de se refazer continuamente, como uma barreira protetora, a corrosão pode ser severa, devido ao ataque localizado nesta região desprotegida (Callister, 2000).

A ação abrasiva pode ser causada pelas partículas sólidas, tais como produtos de corrosão, sais insolúveis, pós e outros sólidos contidos no meio em escoamento. A corrosão-erosão é caracterizada morfologicamente por sulcos, superfície ondulada, buracos arredondados e valas que mostram um padrão direcional. A Figura 3.5.1 mostra um esquema dos danos causados por corrosão-erosão na parede de um tubo (Ramanathan, 1992).

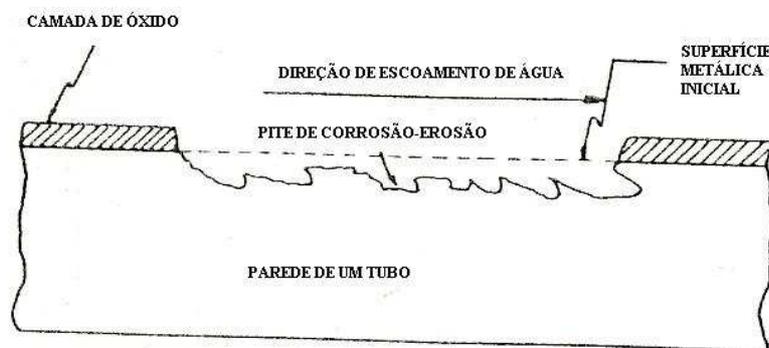


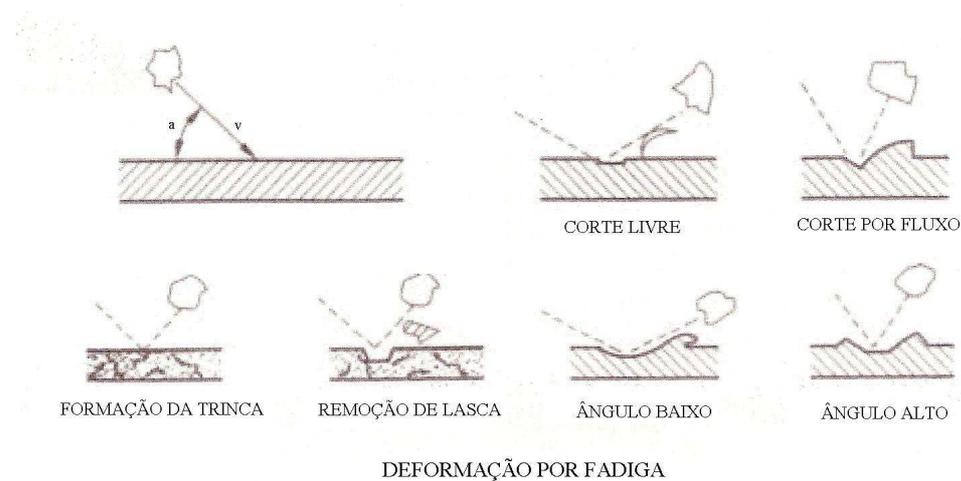
Figura 3.5.1 – Representação esquemática dos defeitos causados por corrosão-erosão na parede de um tubo (Ramanathan, 1992)

A abrasão hidráulica pode ser considerada como um processo mecânico-abrasivo. O processo se desenvolve em resposta à ação de partículas sólidas abrasivas em suspensão na água ou em outro fluido de trabalho e também devido à influência do próprio fluxo. As partículas abrasivas presentes no fluido agem mecanicamente nas superfícies, enquanto que o efeito da água nas superfícies é tanto mecânico quanto químico (ação corrosiva).

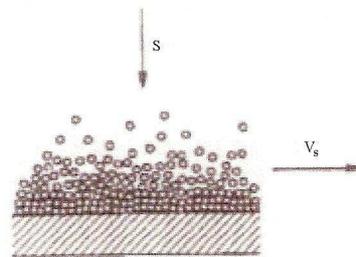
A velocidade do fluido aumenta a taxa de corrosão, e a erosão se torna mais acentuada se houver bolhas e partículas sólidas suspensas no fluido em questão. O processo de corrosão-erosão é comumente encontrado em tubulações, principalmente em dobras, cotovelos e locais de mudança abrupta de diâmetro, que são posições em que o fluido muda de direção, se tornando repentinamente turbulento.

Existem duas categorias principais de mecanismos de erosão: impacto e abrasão deslizante (Karelin et al., 2007).

A erosão por impacto é caracterizada por partículas individuais entrando em contato com a superfície a uma velocidade “V” e um ângulo de impacto “a”, como mostra a Figura 3.5.2-a. A remoção de material através do tempo ocorre por deformação de pequena escala, corte, trinca de fadiga ou uma combinação destes, dependendo das propriedades da superfície de desgaste e da partícula erosiva.



(a)



(b)

Figura 3.5.2 – (a) Erosão por impacto e (b) abrasão deslizante (Karelin et al., 2007)

A erosão por abrasão deslizante é caracterizada por um grupo de partículas atingindo a superfície de desgaste com uma carga “s” e se movendo tangente a ela a uma velocidade  $v_s$ , como mostra a figura 3.5.2-b. As forças centrífugas que agem no fluxo numa superfície curvada provocam a formação de um gradiente de concentração e o carregamento resultante. A remoção de material através do tempo ocorre por um “arranhão” de pequena escala, similar ao modo de corte livre na erosão por impacto.

No momento de colisão da partícula na superfície, a energia cinética da partícula é convertida em trabalho realizado pela deformação do material da superfície. Durante a deformação residual, uma parte volumétrica da camada de superfície irá se separar de seu volume total, deixando um vazio que é caracterizado por uma rugosidade significativa (Karelin et al., 2007).

### 3.5.1 - Erosão Associada ao Movimento de Fluidos

A erosão está presente sob efeito de impactos de partículas, ou da ação de escoamento turbulento (Gemelli, 2001).

No caso de líquidos e gases, a ação erosiva ocorre normalmente em tubulações, em permutadores e em pás de turbinas. A erosão provoca o desgaste superficial capaz de remover as películas protetoras constituídas de produtos de corrosão. Desta forma o processo corrosivo torna-se mais intenso quando combinado com erosão. A corrosão produz a película de produto de corrosão, e o processo erosivo a remove, expondo a superfície a novo desgaste corrosivo. O resultado final será de um desgaste muito maior do que se apenas o processo corrosivo ou erosivo agisse isoladamente ([www.abraco.org.br/corros17.htm](http://www.abraco.org.br/corros17.htm), 14/05/2006).

### 3.5.2 - Regimes de Escoamento

Os escoamentos completamente limitados por superfícies sólidas são denominados internos. Assim os escoamentos internos incluem escoamentos em tubos, dutos, bocais, difusores, contrações súbitas e expansões, válvulas e acessórios (Fox e McDonald, 2001).

Os diversos ramos da engenharia que estudam o escoamento de fluidos se referem a dois tipos de fluxo: laminar e turbulento. A existência destes foi demonstrada por Reynolds, que mostrou que um fluido escoando em um tubo circular de diâmetro pequeno e com baixa velocidade o faz em escoamento laminar, enquanto em altas velocidades, mesmo através de um tubo de grande diâmetro, o escoamento se torna turbulento.

Para escoamentos internos, o regime de escoamento (laminar ou turbulento) em um tubo é determinado pelo número de Reynolds (Re) (Fox e McDonald, 2001):

$$Re = \frac{\rho VD}{\mu} \quad (3.5.1)$$

onde:

$\rho$  = massa específica do fluido;

D = diâmetro do tubo;

$V$  = velocidade média do fluido;

$\mu$  = viscosidade do fluido.

Apesar de experiências mostrarem que, cuidando para manter o escoamento isento de perturbações e com superfícies lisas, o escoamento laminar dentro de um tubo pode ser mantido até números de Reynolds de cerca de 100.000, a maioria das situações de engenharia não é controlada com tanto cuidado. Sob condições normais, a transição laminar – turbulento ocorre em  $Re \approx 2300$  para escoamento em tubos (Fox e McDonald, 2001).

No escoamento laminar as camadas do fluido se deslocam através de linhas de corrente, paralelas à direção do escoamento, sem que ocorra mistura macroscópica entre as partículas do fluido, enquanto o regime turbulento é caracterizado por movimentos tridimensionais, com as partículas do fluido se movendo ao acaso em todas as direções. (Giles et al, 1998). Neste regime o coeficiente de atrito deve ser determinado experimentalmente. Ele é dependente do número de Reynolds e da rugosidade relativa, e pode ser observado no “diagrama de Moody” (Fox e McDonald, 2001).

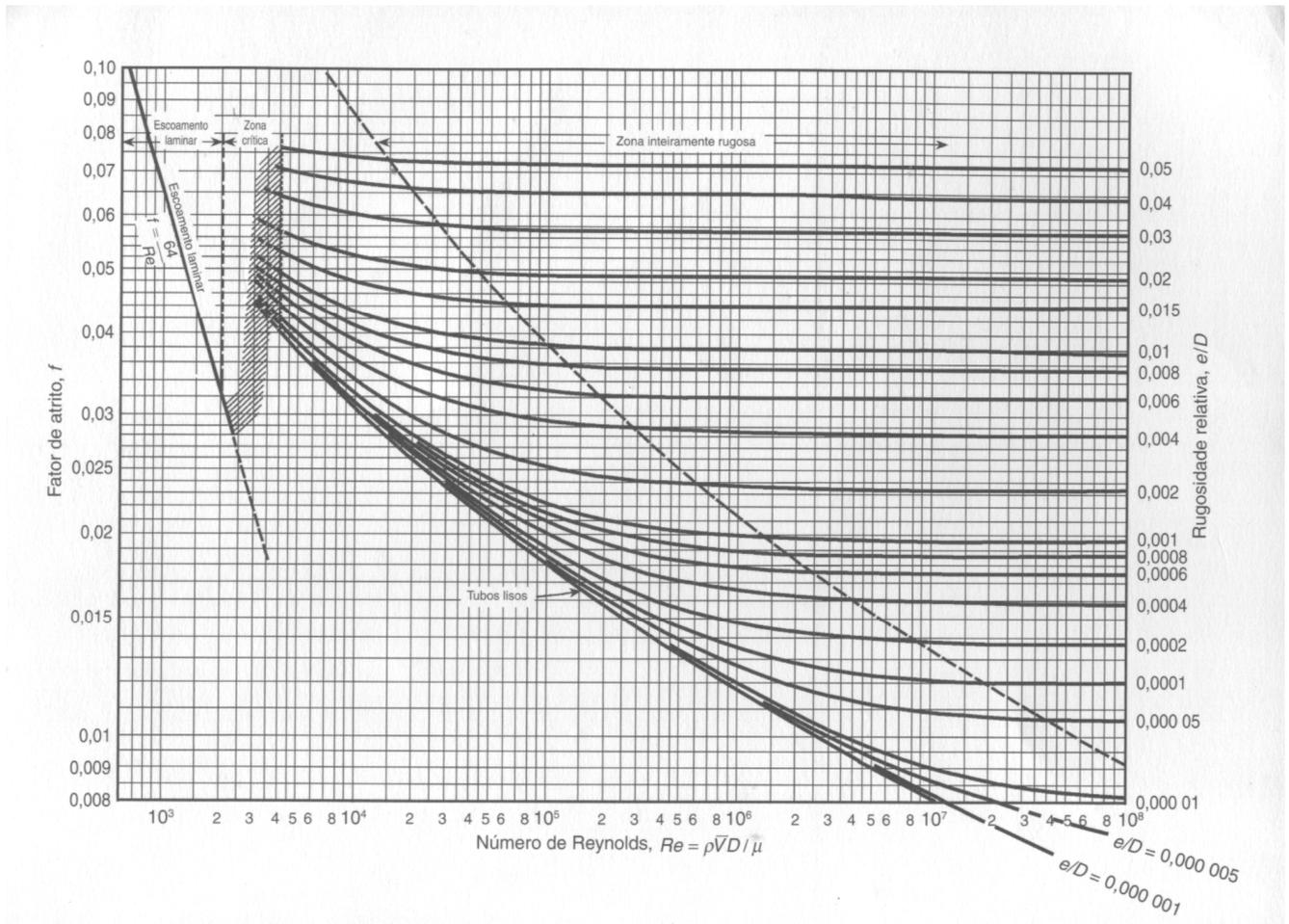


Figura 3.5.3 - Diagrama de Moody (Fox e McDonald, 2001)

O “diagrama de Moody” tem precisão de até 5% e é composto de dados experimentais que relacionam o fator de atrito ao número de Reynolds para escoamentos totalmente desenvolvidos em dutos sobre uma ampla faixa de rugosidades de paredes. Há várias características neste diagrama que devem ser observadas (Potter e Wiggert, 2004):

- A rugosidade relativa neste diagrama é definida como sendo:

$$R_r = \frac{Ra}{D} \quad (3.5.2)$$

onde:

Ra = rugosidade média do tubo;

D = diâmetro do tubo.

- Para uma determinada rugosidade de parede, medida pela rugosidade relativa, há um valor relativamente grande de  $Re$  (número de Reynolds), acima do qual o fator de atrito é constante, definindo assim o regime completamente turbulento.
- Para valores de rugosidade relativa menores, observa-se que, conforme  $Re$  decresce, o fator de atrito aumenta na zona de transição e, eventualmente, torna-se o mesmo que em um tubo liso, e os elementos de rugosidade produzem pouco efeito no escoamento principal.
- O fator de atrito do escoamento laminar é apresentado para números de Reynolds menores que 2000.

### 3.5.3 – Métodos de Prevenção

A corrosão-erosão pode ser controlada utilizando-se materiais mais resistentes a esta forma de ataque. Os fatores que controlam a corrosão-erosão são muitos e dependem do caso específico.

O controle pode ser realizado variando-se a geometria do sistema de forma a reduzir a velocidade e assegurar um escoamento laminar. Inibidores podem também ser adicionados ao fluido para controlar a corrosão-erosão.

Luo et al. (2003) concluíram que o aumento do tamanho e da quantidade de reforço em revestimentos à base de epóxi em pó faz aumentar sua resistência à erosão. A temperatura e o tempo de cura dos revestimentos também influenciam a resistência à erosão.

A pintura é um método de proteção de estruturas e equipamentos de aço contra a corrosão-erosão, sendo o método mais viável devido à facilidade de aplicação e manutenção. No entanto, é necessário escolher a tinta correta para executar essa tarefa de proteção. Ela deve apresentar propriedades como aderência, impermeabilidade e flexibilidade. A aderência deve existir devido ao fato de que, e houver qualquer falha na película ou danos durante a sua vida útil, onde o metal base fica exposto, a corrosão que se inicia nessa região não avança, pois a aderência restringe seu movimento. A impermeabilidade também é fundamental, pois os agentes corrosivos devem ser mantidos afastados do metal, e quanto mais impermeável, maior a durabilidade da tinta. A tinta também deve ser de alta

espessura, para retardar o caminho do meio agressivo até o metal base (Gnecco, 2003).

Com base nessas afirmações, pode-se dizer que as tintas epoxídicas são as que mais atendem às exigências das tintas anticorrosivas para determinados meios. As resinas epoxídicas são flexíveis, muito impermeáveis e aderem firmemente ao substrato metálico.

### **3.6 - Desgaste e Abrasão**

Desgaste é a remoção de material da superfície e transformações severas na aparência dessa superfície, que podem ocorrer devido a diversos processos, que podem ser a oxidação e o ataque químico da superfície. O desgaste é independente da área de contato, dependendo apenas da distância de deslizamento e da carga normal aplicada (Szeri, 1980).

Os mecanismos de desgaste dependem da tensão de contato, das velocidades relativas na interface de desgaste, da temperatura e das propriedades físicas e químicas dos contatos entre esses materiais.

O desgaste de um compósito de matriz polimérica e reforço abrasivo inicia-se através do desgaste da partícula abrasiva, causando o seu abaulamento ou planificação. Em seguida a matriz polimérica também sofre um desgaste, diminuindo a área na qual a partícula abrasiva se sustenta sobre tal matriz. Com o aumento deste desgaste até um ponto crítico, a partícula abrasiva se desprende e uma nova camada de partículas abrasivas começa a surgir. Esse desprendimento de partículas abrasivas para o surgimento de uma nova camada é chamado de “pull-out” (Luo, 2001).

A resistência ao desgaste é a habilidade do material de ter uma vida útil relativamente elevada quando submetido aos vários tipos de mecanismos de desgaste: ataque (contato físico direto), desgaste por fusão, oxidação/difusão e plasticidade (Brooks, 1987).

A abrasão é a operação de arrancar partículas superficiais de um material pelo atrito contra outro material, o qual será sempre mais duro que o primeiro (Aigueira e Filgueira, 2006).

De acordo com Rossi et al (2004) para avaliar a resistência à abrasão de revestimentos orgânicos o teste de Abrasão é usado freqüentemente, onde os danos mecânicos são determinados medindo a perda de massa sem considerar o formulário dos danos (morfologia e influência em desempenhos da proteção de corrosão).

El-Tayeb e Gadelrab (1996) apresentam um estudo de propriedades de fricção e desgaste de um compósito GFRE, além de investigação microscópica da superfície de desgaste sob diferentes condições de deslizamento para identificar os mecanismos de desgaste envolvidos. Foi verificado que o aumento do carregamento ou da velocidade diminui o coeficiente de fricção e a taxa de desgaste.

Aigueira e Filgueira (2006) avaliaram a possibilidade da aplicação de compósitos à base do sistema poliéster-SiC nas coroas de polimento de rochas ornamentais. Os compósitos foram obtidos em concentrações variáveis de SiC e submetidos a testes de desgaste. Os melhores resultados foram apresentados pelas amostras com 50%p de SiC, que superaram em 5 vezes as amostras de SOREL-SiC, normalmente utilizado no mercado, no desempenho de abrasão, porém apresentaram uma perda de massa de 4,6 vezes maior.

Zhang et al. (2007) mediram as resistências ao desgaste da alumina, do compósito alumina/carbeto de silício e do compósito alumina/mulita através de desgaste abrasivo. Foi determinado que os principais mecanismos de desgaste abrasivo para a alumina foi desgaste por fratura, para o compósito alumina/carbeto de silício foi desgaste plástico, e para o compósito alumina/mulita, os mecanismos de desgaste por fratura e desgaste plástico atuaram simultaneamente. A resistência ao desgaste dos dois tipos de compósitos estudados foi melhor que a da alumina monolítica por um fator de 1 a 3 vezes.

### **3.7 – Revestimentos Protetores**

Os métodos baseados na aplicação de revestimentos protetores consistem na aplicação de revestimentos metálicos (aço inoxidável com alto teor de Cr e Ni), revestimentos não metálicos orgânicos (tintas e resinas) ou inorgânicos (silicato de alumínio fundido), nas partes susceptíveis a ação da erosão.

A maioria dos métodos de controle da corrosão-erosão consiste em intercalar uma camada protetora entre o metal e o meio corrosivo. Essas camadas podem ser de formação natural ou artificial e, em alguns casos simultânea.

Entretanto, o sucesso do emprego de revestimentos protetores dependerá do preparo do substrato receptor, sendo a preparação da superfície uma etapa importantíssima na execução de uma pintura industrial.

A preparação da superfície metálica é definida pelo esquema de pintura, uma vez que varia em função da natureza das tintas que se vai aplicar e do desempenho esperado pelo sistema de pintura. Ela é realizada com dois grandes objetivos (Nunes e Lobo, 1998):

- Remover da superfície materiais que possam impedir o contato direto da tinta com a mesma. A aplicação de uma tinta sobre materiais estranhos à superfície acarretaria a remoção da película de tinta quando os mesmos, que normalmente não estão suficientemente aderidos, se desprenderem da superfície. Dificuldades de adesão das camadas de tintas também ocorrem quando aplicadas sobre resíduos de óleos, graxas, sais e poeiras.
- Criar-se um determinado perfil de rugosidade, capaz de permitir a ancoragem mecânica da primeira demão da tinta de fundo à superfície metálica que se quer proteger. Em relação a espessura da camada de tintas, o perfil de rugosidade deve variar entre 1/3 e 1/4.

Logo, para o sucesso de qualquer esquema de pintura de proteção, é essencial uma preparação adequada da superfície. Não é demais realçar a importância da remoção de óleo, gordura, tintas velhas e contaminantes da superfície. Deste modo, o desempenho de qualquer demão de tinta está diretamente dependente da preparação correta e minuciosa da superfície, antes da sua aplicação. Se a preparação da superfície for incorreta ou incompleta, até mesmo o sistema de revestimento tecnologicamente mais avançado falhará ([www.international-pc.com/pc/pds/pre\\_pt.pdf](http://www.international-pc.com/pc/pds/pre_pt.pdf), 09/05/06).

Ferreira et al. (2002) avaliaram propriedades mecânicas de recobrimentos a base de epóxi para aplicação em dutos de transporte na indústria petrolífera. Foi avaliada a influência de dois tipos de tratamento superficial (St 3 e Sa 2 1/2) na adesão, impacto, dureza e desgaste do material. Observou-se que a adesão e o

desgaste dependem do padrão de tratamento da superfície, e que a microdureza é uma propriedade inerente do material, e não é afetada pelo padrão de limpeza da superfície.

### 3.7.1 - Revestimentos Não-Metálicos Orgânicos

Consiste em intercalar uma camada de natureza orgânica entre a superfície metálica e o meio corrosivo.

Revestimentos orgânicos são uns dos mais comuns sistemas de proteção de metais contra corrosão. Em diversas aplicações eles devem mostrar, junto com as propriedades protetoras uma boa aparência (Rossi et al, 2004). Deve-se enfatizar que danos mecânicos podem diminuir significativamente as propriedades de proteção, até mesmo no caso de um revestimento orgânico extremamente protetor (Cambuzzi et al, 2004).

A pintura como técnica de proteção anticorrosiva apresenta uma série de propriedades importantes, tais como facilidade de aplicação, relação custo-benefício atraente, e pode proporcionar, além disso, outras propriedades em paralelo, como (Gentil, 1996):

- Finalidade estética – tornar o ambiente agradável
- Auxílio na segurança industrial
- Sinalização
- Identificação de fluidos em tubulações ou reservatórios
- Impedir a incrustação de microrganismos marinhos em cascos de embarcações
- Impermeabilização
- Permitir maior ou menor absorção de calor, através do uso correto de cores
- Diminuição da rugosidade superficial

Symonds e Mellor (1999) estudaram os mecanismos e propriedades requeridas para um material polimérico de revestimento a base de epóxi resistir ao desgaste e dano por impacto. Foram investigados os componentes adesivo e

abrasivo do desgaste através de testes. Concluiu-se que os testes abrasivos utilizados não retrataram as taxas de desgaste do revestimento.

Prehn et al. (2005) fizeram um estudo de caso de materiais utilizados em bombas que transportam fluidos agressivos e abrasivos. Um dos materiais estudados foi uma resina epóxi preenchida com partículas cerâmicas. O outro foi uma matriz polimérica (PEEK) reforçada com fibra de carbono. O primeiro apresentou excelente comportamento de desgaste sob condições seco e lubrificado com água. Já o segundo apresentou um fenômeno inesperado, pois a água afetou o comportamento de desgaste das fibras de carbono.

Lazarevic et al. (2005) obtiveram revestimento epoxídico pela eletrodeposição catódica de uma resina epóxi sobre alumínio usando o método potenciostático. Foi investigada a corrosão desses revestimentos por exposição ao NaCl 3%. Verificou-se que esse revestimento constitui uma boa barreira ao transporte de agentes corrosivos.

### **3.7.2 - Película de Tinta – Características**

A película de tinta deve apresentar as seguintes características (Nunes e Evangelista, 1984):

- **Coesão.** Consiste na coesão entre os diversos constituintes do revestimento, de forma a apresentar uma película contínua, isenta o possível de falhas, como poros, trincas, bolhas etc.
- **Adesão ao Substrato.** Consiste na permanente aderência da tinta à superfície a ser protegida. A aderência ao substrato é obtida em maior grau pela ancoragem mecânica da tinta nas irregularidades da superfície, em parte pelas forças de atração de natureza molecular.

Além destas características fundamentais, há outras características que a película pode apresentar como resistência química, a abrasão, ao intemperismo, à ação bacteriana, à temperatura etc.

### 3.8 - Fluência

A fluência é definida como a deformação plástica que ocorre em função do tempo para um material submetido a uma tensão constante. Tal fenômeno é indesejável e é um fator determinante da vida útil de um componente (Garcia et al., 2000).

A aplicação crescente de componentes em condição de serviço a altas temperaturas, como em instalações químicas e petroquímicas, turbinas de motores a jato etc., levou ao desenvolvimento de materiais compostos ou ligas que resistem à deformação plástica sob carregamento estático e temperaturas superiores a 1000 °C.

O ensaio de fluência é feito através da aplicação de uma carga uniaxial constante a um corpo de prova de geometria igual aos utilizados no ensaio de tração, a uma temperatura elevada e constante.

As deformações que ocorrem no corpo de prova são medidas em função do tempo de realização do ensaio e indicadas na forma de uma curva do tipo deformação  $\epsilon$  versus tempo  $t$ . A Figura 3.8.1 ilustra esse gráfico (Garcia et al., 2000). Apesar de ser construído com base em dados referentes a materiais metálicos, ele fornece uma idéia do que aconteceria para o caso de materiais poliméricos e compósitos.

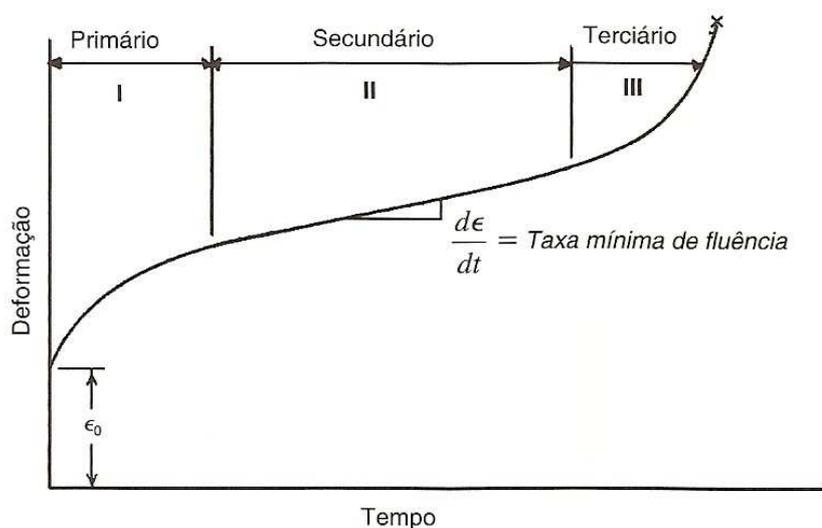


Figura 3.8.1 – Curva típica de fluência mostrando os três estágios do ensaio (Garcia et al., 2000)

Neste gráfico, pode-se observar que a curva é dividida em três estágios: primário, secundário e terciário. No estágio primário, a taxa de fluência ( $\dot{\epsilon} = d\epsilon / dt$ ), diminui continuamente, já que sua inclinação diminui com o tempo. Isso ocorre devido ao aumento da resistência à fluência provocado pelo encruamento, ou seja, a deformação plástica vai se tornando mais difícil.

No estágio secundário, a taxa de fluência é praticamente constante, e a curva tem aspecto linear. Isso ocorre devido ao equilíbrio de dois fenômenos competitivos, o encruamento e a recuperação. O valor médio da taxa de fluência nesse estágio é chamado de taxa mínima de fluência.

Por fim, no estágio terciário, ocorre uma aceleração na taxa de fluência, culminando na ruptura do corpo de prova. Nesse estágio tem início o processo interno de fratura, como separação dos contornos de grão, formação, coalescimento e propagação de trincas, reduzindo a área do corpo de prova em local específico e um conseqüente aumento na taxa de deformação. Em certas condições, alguns materiais podem não apresentar a fase terciária.

### 3.8.1 – Parâmetros Característicos do Ensaio de Fluência

Um dos parâmetros mais importantes no ensaio de fluência é a taxa mínima de fluência ( $\dot{\epsilon}_m$ ), que é a inclinação da curva do estágio secundário de fluência.

Este parâmetro deve ser considerado em projetos de componentes para aplicações de longa duração. Já para componentes de vida relativamente curta, o parâmetro determinante é o tempo de ruptura. Dessa forma, o ensaio de fluência pode ser dividido em ensaio de fluência (resistência à fluência), ensaio de ruptura por fluência e ensaio de relaxação.

No ensaio de ruptura por fluência, segue-se até a ruptura do corpo de prova, enquanto que o ensaio convencional usa artifícios para estimar a vida útil do material. Nesses ensaios, a informação sobre o comportamento do material quando submetido até a ruptura diz respeito à tensão nominal que o corpo de prova suporta em determinada temperatura até a ruptura. Já o ensaio de relaxação fornece informações sobre a redução da tensão aplicada ao corpo de prova quando a deformação em função do tempo é mantida constante a uma certa temperatura.

Muitas vezes os resultados dos ensaios de fluência são apresentados em termos do logaritmo da tensão versus o logaritmo do tempo de ruptura, resultando em uma linha reta, como mostra a Figura 3.8.2.

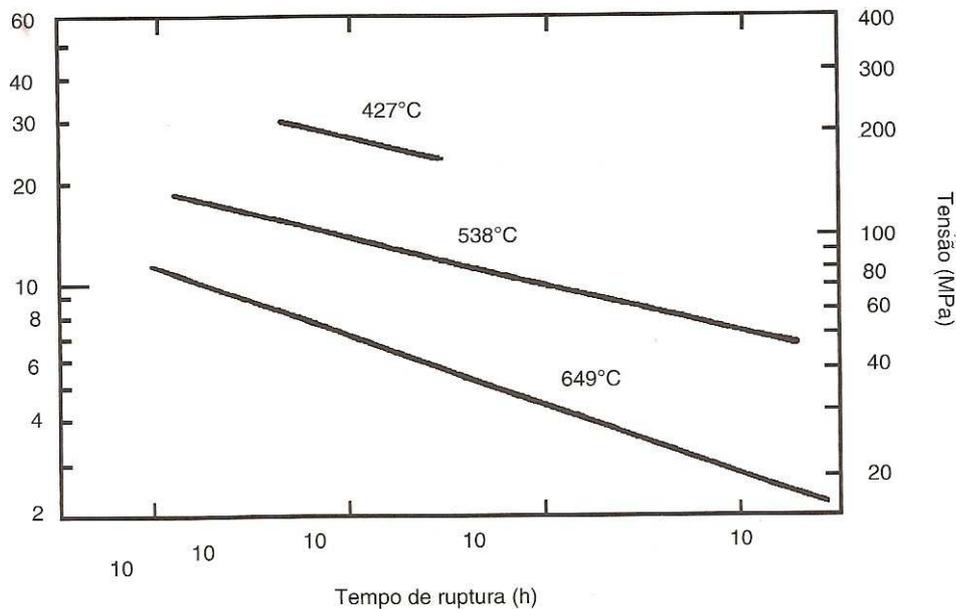


Figura 3.8.2 –Tensão x Tempo de ruptura para uma liga de níquel com baixo teor de carbono para três diferentes temperaturas (Garcia et al., 2000)

Foram desenvolvidas relações experimentais para relacionar a taxa mínima de fluência com a tensão ou a temperatura. Para o caso da dependência da taxa de fluência mínima ( $\dot{\epsilon}_m$ ) com a tensão ( $\sigma$ ), temos:

$$\dot{\epsilon}_m = k_1 \cdot \sigma^{n_1} \quad (3.8.5)$$

onde  $k_1$  e  $n_1$  são constantes para cada material.

A plotagem de  $\sigma$  versus  $\dot{\epsilon}_m$  numa escala logarítmica fornece uma reta cuja inclinação é  $n_1$ .

Define-se resistência à ruptura como sendo a tensão a uma determinada temperatura que produz uma vida até a ruptura de 100, 1000 ou 10.000 horas. Já o

termo resistência à fluência refere-se à tensão a uma determinada temperatura que produz uma taxa mínima de fluência, por exemplo, de 0,0001 %/hora ou 0,001 %/hora.

### 3.8.2 – Extrapolação de Características de Fluência para Longos Períodos

Muitas vezes é necessário utilizar determinados componentes mecânicos em serviço por vários anos, sem apresentarem problemas relacionados com fluência, e isso exige que o projetista leve em consideração dados do comportamento à fluência em longos períodos.

Como os ensaios de longa duração são na maioria das vezes impraticáveis, a solução seria a avaliação do comportamento à fluência em condições de temperatura acima das especificadas, por tempos mais curtos e no mesmo nível de tensão. Com os resultados obtidos, faz-se uma extrapolação para as condições de operação do componente. Porém essa extrapolação apenas é uma operação segura se é assegurado que na região de extrapolação não ocorrerão mudanças estruturais que resultem na variação da inclinação da curva.

O procedimento mais comum de extrapolação de resultados emprega o parâmetro de Larson-Miller, definido como:

$$T \cdot (C + \log t_r) = \text{constante} \quad (3.8.6)$$

onde C é a constante de Larson-Miller (da ordem de 20), T é a temperatura do ensaio (K) e t é o tempo de ruptura (h).

Os principais fatores que afetam as características das propriedades em fluência são a temperatura de fusão, o módulo de elasticidade e o tamanho do grão cristalino. Quanto maiores os valores desses parâmetros, maior será a resistência à fluência.

A Figura 3.8.3 mostra a influência do valor da tensão aplicada no ensaio a uma temperatura constante. Um comportamento semelhante pode ser encontrado mantendo-se a tensão constante e variando-se a temperatura dos ensaios.

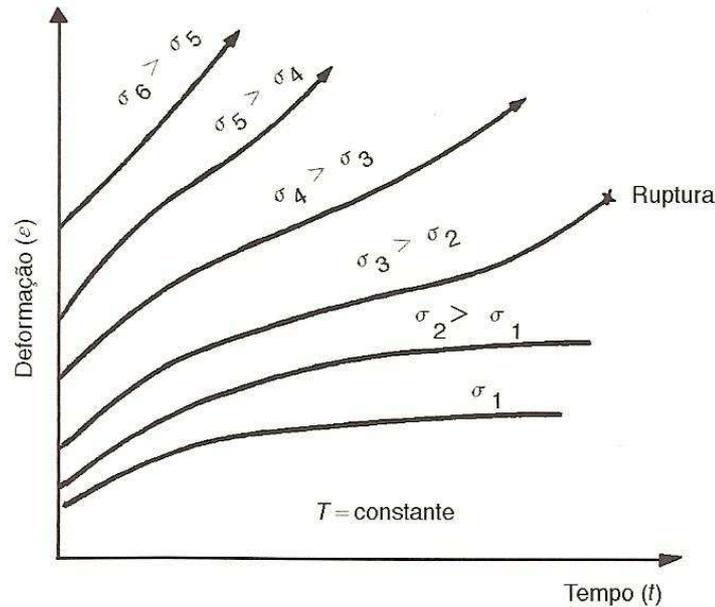


Figura 3.8.3 – Efeito da tensão nas curvas de fluência à temperatura constante (Garcia et al., 2000)

A fluência é a mudança dependente do tempo na deformação devido à mudança gradual na tensão. Também pode ser definida como a deformação plástica que ocorre em um material, sob tensão constante ou quase constante, em função do tempo, sendo que a temperatura tem um papel importante nesse fenômeno.

O ensaio de fluência é importante devido à necessidade de se testar novos materiais expostos a altas temperaturas ao longo do tempo. Porém, no caso de polímeros, isso pode ocorrer até mesmo em baixas temperaturas (Garcia et al., 2000).

Em condições reais de uso, os materiais, em algumas situações, apresentam deformação permanente mesmo sofrendo solicitações abaixo do seu limite elástico. E essas deformações ocorrem mais frequentemente em situações de uso do material que envolvam altas temperaturas.

Na maioria dos casos, a fluência de um material é avaliada através da submissão do mesmo ao esforço de tração. O equipamento utilizado permite aplicar uma carga de tração constante ao corpo de prova, que fica dentro de um forno elétrico de temperatura constante e controlável. Um extensômetro é acoplado ao equipamento para medir a deformação em função do tempo.

No ensaio de fluência, o corpo de prova deve passar por um período de aquecimento, até que se atinja a temperatura estabelecida. O resultado do ensaio é dado por uma curva de deformação (fluência) pelo tempo de duração do ensaio, como mostra a Figura 3.8.4 (Garcia et al., 2000).

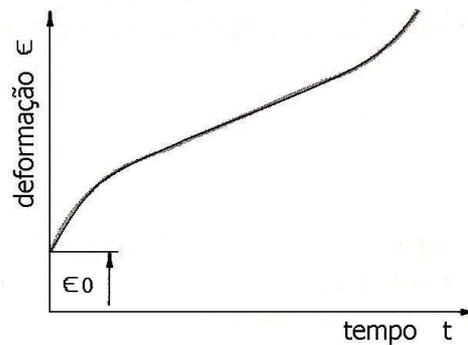


Figura 3.8.4 – Curva típica obtida de um ensaio de fluência (Garcia et al., 2000)

Diferente da fluência discutida por metalurgistas, fluência em polímeros a baixas deformações (1%) é essencialmente recuperada após o descarregamento, sem a necessidade de recozimento a uma temperatura crescente.

A Figura 3.8.5 compara a resposta para dois níveis de tensão em materiais linear elástico e linear viscoelástico (Garcia et al., 2000). No primeiro caso a deformação segue o padrão do programa de carregamento exatamente proporcional à magnitude das tensões aplicadas. Para o caso geral de um sólido viscoelástico linear, a deformação total  $\epsilon$  é a soma de três partes:  $\epsilon_1$ , a deformação elástica imediata,  $\epsilon_2$ , a deformação elástica atrasada, e  $\epsilon_3$ , o fluxo Newtoniano, que é idêntico à deformação de um líquido viscoso obedecendo à Lei de Newton da viscosidade.

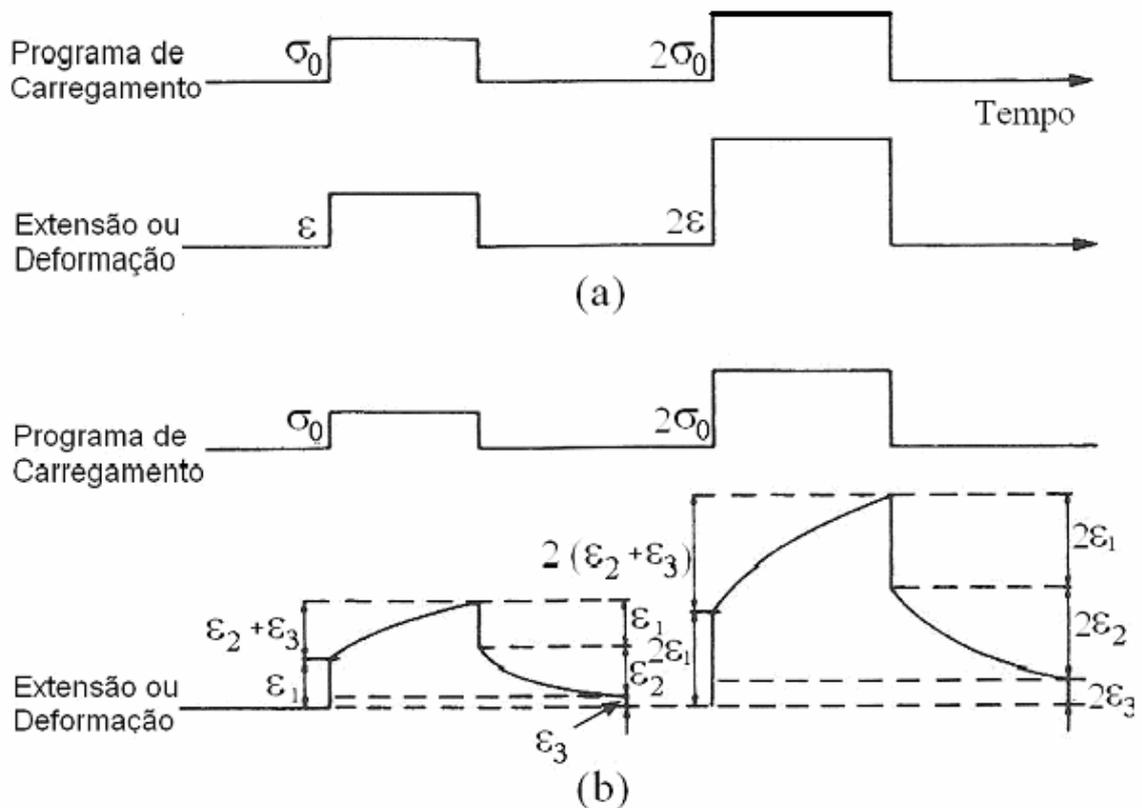


Figura 3.8.5 – Deformação de um sólido elástico (a) e deformação de um sólido linear viscoelástico (b)

Devido ao fato do material apresentar comportamento linear, as magnitudes de  $\epsilon_1$ ,  $\epsilon_2$  e  $\epsilon_3$  são exatamente proporcionais às da tensão aplicada, então o recíproco do módulo de elasticidade  $J(t)$  é definido como sendo uma função apenas do tempo:

$$J(t) = \frac{\epsilon(t)}{\sigma} = J_1 + J_2 + J_3 \quad (3.8.7)$$

onde  $J_1$ ,  $J_2$  e  $J_3$  correspondem a  $\epsilon_1$ ,  $\epsilon_2$  e  $\epsilon_3$ .

Polímeros amorfos lineares apresentam um significativo  $J_3$  acima de suas temperaturas de transição vítrea, quando a fluência pode continuar até a ruptura da amostra, mas a temperaturas mais baixas,  $J_1$  e  $J_2$  dominam.

A natureza da fluência pode ser observada pela plotagem do logaritmo do recíproco do módulo de elasticidade em função do logaritmo do tempo, numa escala de tempo ampla.

O gráfico mostra que a tempos muito curtos, o recíproco do módulo de elasticidade (tipicamente  $10^{-9} \text{ Pa}^{-1}$ ) é apresentado para um sólido vítreo e é independente do tempo. Já para tempos muito longos, o recíproco do módulo de elasticidade (tipicamente  $10^{-5} \text{ Pa}^{-1}$ ) é apresentado para um sólido elastomérico, novamente independente do tempo. Para tempos intermediários, o recíproco do módulo de elasticidade fica entre esses extremos e é dependente do tempo, sendo o comportamento chamado de viscoelástico:

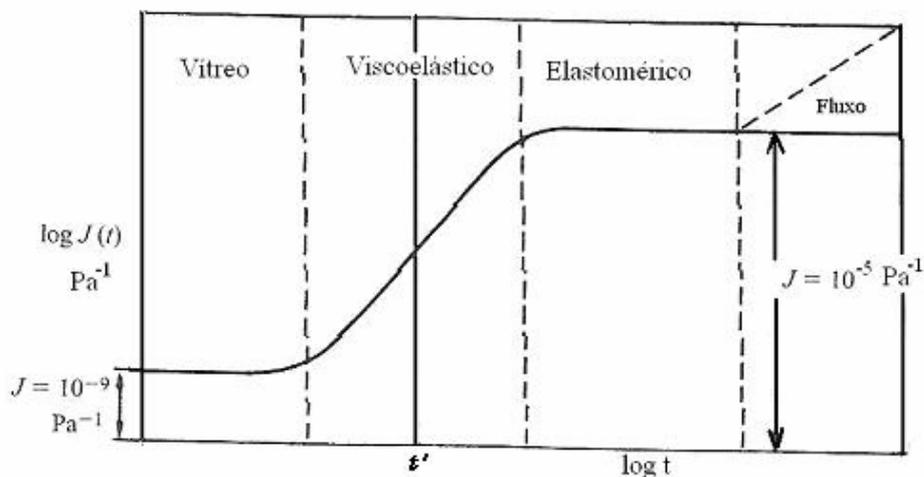


Figura 3.8.6 – Recíproco do módulo de elasticidade  $J(t)$  em função do tempo  $t$ ;  $t'$  e o tempo característico (tempo de retardo)

O tempo de retardo  $t'$  no meio da região viscoelástica caracteriza a escala de tempo para fluência. O fato de um plástico ser vítreo ou borrachoso depende apenas do valor de  $t'$  na temperatura de referência. Para um polímero borrachoso,  $t'$  é muito pequeno (inferior a 1 s) na temperatura ambiente. Inversamente, para um polímero vítreo,  $t'$  é muito grande na mesma temperatura.

Como a temperatura aumenta a frequência de rearranjos moleculares, isso reduz o valor de  $t'$ . Então a temperaturas baixas o suficiente, um polímero borrachoso se comporta com um plástico vítreo, e será despedaçado com o impacto.

Correspondentemente, um plástico vítreo se tornará um plástico borrachoso a uma temperatura suficientemente alta.

Compósitos poliméricos são frequentemente modelados como materiais lineares elásticos. Entretanto, propriedades dominadas pela matriz, tais como módulo cisalhante e módulo transversal, podem apresentar significativa dependência não-linear do tempo, especialmente sob condições de altas tensões e meios agressivos, devido à natureza viscoelástica da matriz. Deformações viscoelásticas são reversíveis e diminuem gradualmente com a remoção do carregamento, alcançando uma recuperação completa se houver tempo suficiente. Somado a esse fato, deformações irreversíveis dependentes do tempo também se desenvolvem em compósitos poliméricos como um resultado da degradação mecânica como aparecimento de trincas na matriz, delaminações, descolamento fibra-matriz, etc. (Soriano e Almeida, 2003).

### 3.9 - Rugosidade superficial

As superfícies dos materiais sempre apresentam irregularidades, por mais especulares que pareçam ser. A rugosidade é um tipo de erro microgeométrico. Trata-se de um conjunto de irregularidades, ou seja, pequenas saliências que caracterizam uma superfície. Para avaliar essas irregularidades são utilizados aparelhos eletrônicos chamados rugosímetros.

Tendo um papel importante no desempenho dos materiais, a rugosidade influencia na sua resistência ao desgaste, na aderência às camadas protetoras, na resistência à corrosão e à fadiga, na vedação, no escoamento de fluidos (paredes de tubos e dutos), dentre outros, e por isso é fundamental a especificação do acabamento das superfícies através da rugosidade superficial.

Existem alguns critérios para avaliar a rugosidade de um material (Scaramboni et al., 2003). O perfil efetivo de uma superfície é estabelecido por um comprimento  $L_m$ , o comprimento total de avaliação. Esse comprimento é subdividido por vários comprimentos de amostragem ( $L_e$ ), como mostra a Figura 3.9.1. O comprimento de amostragem nos aparelhos eletrônicos, chamado de “cut-off”, não deve ser confundido com a distância total ( $L_t$ ) a ser percorrida pelo aparelho sobre a superfície. Recomenda-se que os rugosímetros meçam 5 comprimentos de

amostragem em diferentes posições e indiquem o valor médio, uma vez que, na passagem dos sensor, uma ponta de diamante industrial pela superfície altera para menos o valor medido em cada passagem subsequente do sensor pelo mesmo caminho anteriormente percorrido.

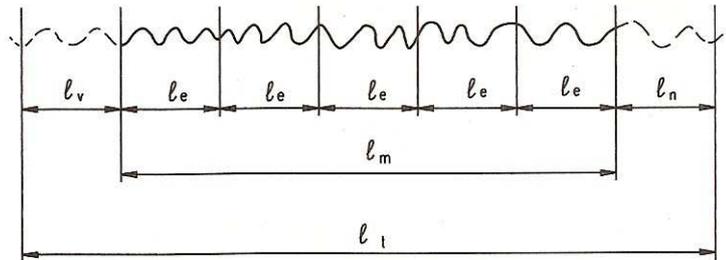


Figura 3.9.1 – Comprimentos para Avaliação de Rugosidade (Scaramboni et al., 2003)

### 3.9.1 – Sistemas de Medição da Rugosidade Superficial

São usados dois sistemas básicos de medida: o da linha média M e o da evolvente E. O primeiro é mais utilizado, inclusive no Brasil.

#### 3.9.1.1 – O Sistema M

Nesse sistema, todas as grandezas da medição da rugosidade são definidas a partir do conceito da linha média, que é a linha paralela à direção geral do perfil, no comprimento de amostragem, de tal modo que a soma das áreas superiores, compreendidas entre ela e o perfil efetivo, seja igual à soma das áreas inferiores, no comprimento de amostragem  $L_e$  (Scaramboni et al., 2003).

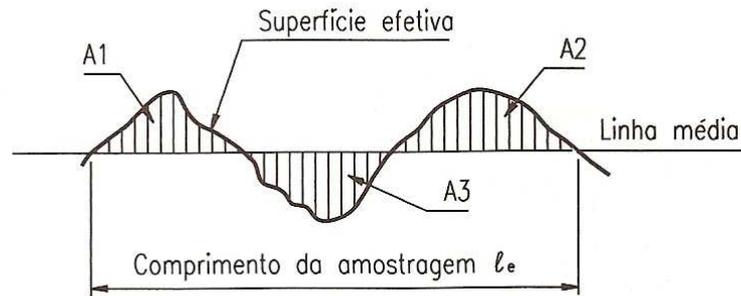


Figura 3.9.2 – O Sistema da Linha Média (Scaramboni et al., 2003)

Dessa forma,  $A1 + A2 = A3$ , onde A1 e A2 são as áreas acima da linha média e A3 é a área abaixo da linha média.

Os sistemas de medição da rugosidade baseados na linha média podem ser agrupados em três classes: o baseados na profundidade da rugosidade, os baseados em medidas horizontais e os baseados em medidas proporcionais (Agostinho et al., 1977).

### 3.9.2 – Parâmetros de Rugosidade Baseados na Profundidade da Rugosidade

#### 3.9.2.1 – Rugosidade Média ( $R_a$ )

Também chamado de desvio médio aritmético, este parâmetro é determinado pela média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento ( $y_r$ ), dos pontos do perfil de rugosidade em relação à linha média, dentro do percurso de medição ( $L_m$ ). Essa grandeza pode corresponder à altura de um retângulo, cuja área é igual à soma absoluta das áreas delimitadas pelo perfil de rugosidade e pela linha média, tendo por comprimento o percurso de medição ( $L_m$ ).

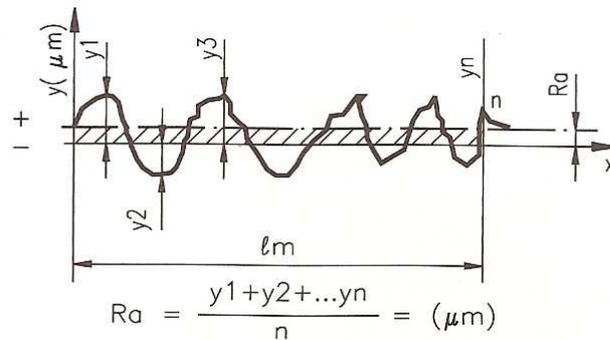


Figura 3.9.3 – Ilustração do Parâmetro da Rugosidade Média Ra (Scaramboni et al., 2003)

Esse parâmetro é conhecido como “roughness average”, que significa rugosidade média. É o parâmetro mais utilizado no mundo todo e aplicável à maioria dos processos de fabricação. Sua expressão matemática é a seguinte (Agostinho et al., 1977):

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i| \quad (3.9.1)$$

onde  $n$  é o número de ordenadas consideradas.

O valor da rugosidade  $R_a$ , segundo a norma NBR 8404/1984, é indicado pelos números de classe de rugosidade correspondente, conforme a Tabela 3.9.1:

Tabela 3.9.1 – Classe de Rugosidade

| Classe de Rugosidade | Rugosidade Ra ( $\mu\text{m}$ ) |
|----------------------|---------------------------------|
| N12                  | 50                              |
| N11                  | 25                              |
| N10                  | 12,5                            |
| N9                   | 6,3                             |
| N8                   | 3,2                             |
| N7                   | 1,6                             |
| N6                   | 0,8                             |
| N5                   | 0,4                             |
| N4                   | 0,2                             |
| N3                   | 0,1                             |
| N2                   | 0,05                            |
| N1                   | 0,025                           |

3.9.2.2 – Rugosidade Máxima ( $R_y$ )

É o maior valor das rugosidades parciais ( $z_i$ ) que se apresenta no percurso de medição ( $L_m$ ). Na figura abaixo, o maior valor parcial é o  $z_3$ , que está localizado no 3º cut-off, que corresponde à rugosidade  $R_y$  (Scaramboni et al., 2003).

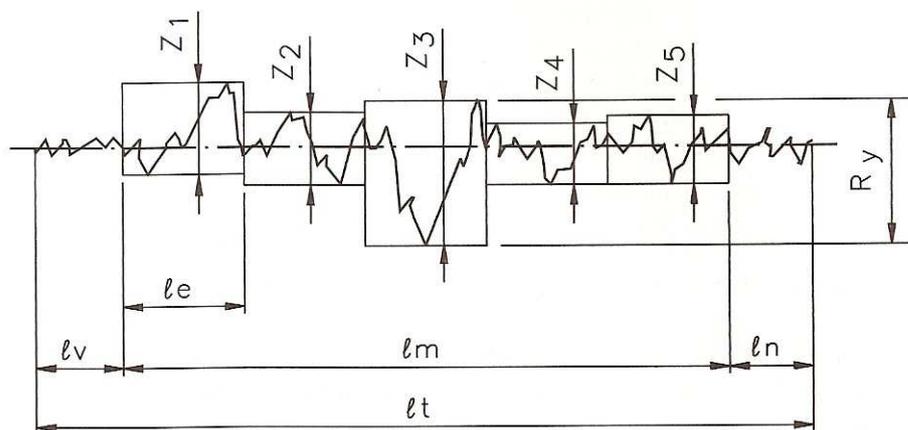


Figura 3.9.4 - Ilustração do Parâmetro da Rugosidade Máxima  $R_y$  (Scaramboni et al., 2003)

Nem todos os equipamentos fornecem esse parâmetro. Individualmente, ele não apresenta informação suficiente a respeito da superfície, ou seja, não informa o

formato da superfície, não fazendo distinção entre formatos arredondados, serrilhados ou pontiagudos, por exemplo.

### 3.9.2.3 – Rugosidade Total ( $R_t$ )

Corresponde à distância vertical entre o pico mais alto e o vale mais profundo no comprimento de avaliação ( $L_m$ ), independentemente dos valores de rugosidade parcial ( $z_i$ ) (Scaramboni et al., 2003). Na Figura 3.9.5, o pico mais alto está no retângulo  $z_1$ , e o vale mais fundo no retângulo  $z_3$ . Ambos configuram a profundidade total da rugosidade  $R_t$ .

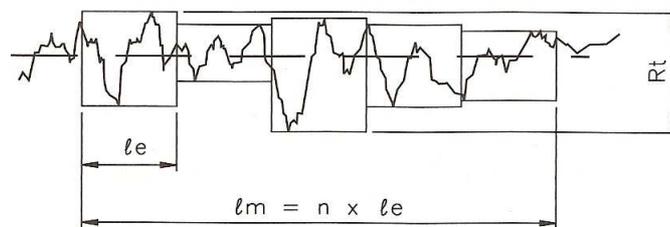


Figura 3.9.5 - Ilustração do Parâmetro da Rugosidade Total  $R_t$  (Scaramboni et al., 2003)

Este parâmetro considera o comprimento de amostra igual ao comprimento de avaliação, e não apenas o comprimento de amostragem. Porém, toda essa rigidez de avaliação pode levar a resultados enganosos.

### 3.9.2.4 – Rugosidade Média ( $R_z$ )

Trata-se da média aritmética dos cinco valores de rugosidade parcial. A rugosidade parcial ( $z_i$ ) é a soma dos valores absolutos das ordenadas dos pontos de maior afastamento, acima e abaixo da linha média, existentes no comprimento de amostragem (cut-off). Como mostra a Figura 3.9.6, esse valor corresponde à altura entre os pontos máximo e mínimo do perfil, no comprimento de amostragem  $L_e$  (Scaramboni et al., 2003).

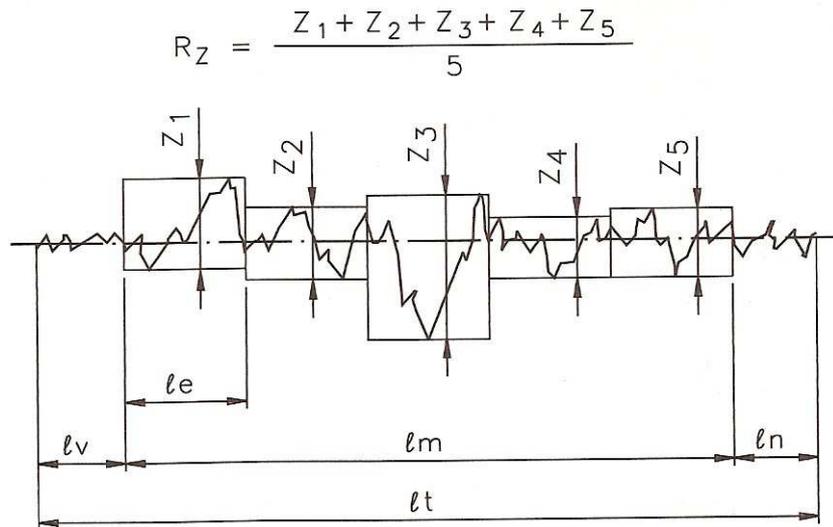


Figura 3.9.6 - Ilustração do Parâmetro da Rugosidade Média  $R_z$  (Scaramboni et al., 2003)

Assim como o parâmetro  $R_y$ , este parâmetro não informa sobre o formato do perfil, nem a distância entre as ranhuras.

### 3.9.2.5 – Rugosidade Média do Terceiro Pico e Vale ( $R_{3z}$ )

Consiste na média aritmética dos valores de rugosidade parcial ( $3z_i$ ), correspondentes a cada um dos cinco módulos (cut-off). Em cada módulo foram traçadas as distâncias entre o terceiro pico mais alto e o terceiro vale mais fundo, em sentido paralelo à linha média. A Figura 3.9.7 mostra os cinco módulos com os valores  $3z_i$  ( $i =$  de 1 a 5) (Scaramboni et al., 2003).

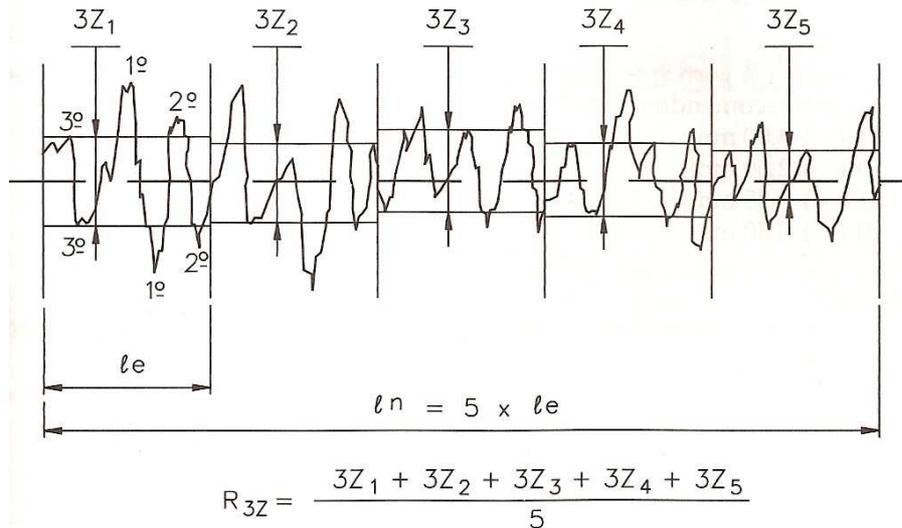


Figura 3.9.7 - Ilustração do Parâmetro da Rugosidade Média do Terceiro Pico e Vale ( $R_{3Z}$ ) (Scaramboni et al., 2003)

Este parâmetro tem a vantagem de desconsiderar picos e vales que não sejam representativos da superfície. Porém, não informa sobre a forma do perfil nem sobre a distância entre ranhuras.

Outros autores (Agostinho et al., 1977) citam outros parâmetros baseado na profundidade da rugosidade, como o desvio médio quadrático ( $R_q$ ), a altura das irregularidades dos 10 pontos  $R_z$ , a altura máxima das irregularidades  $R_{max}$  e a profundidade média  $R_p$ . Tais parâmetros não são muito utilizados e por isso não serão tratados nesse trabalho.

## CAPÍTULO 4

### 4 - MATERIAIS E MÉTODOS

#### 4.1 – Materiais Utilizados

Foram utilizados os seguintes materiais:

##### 4.1.1 – Porcelanato em pó

Amostras de argila vermelha fornecida pela AC Cerâmica, situada no município de Campos dos Goytacazes – RJ, foram coletadas após desintegração e laminação. Este produto, composto fundamentalmente por argila (feldspato e quartzo), foi peneirado a 200 mesh, pesado e umidificado ( $m_{\text{água}} = 0,07 m_{\text{pó}}$ ). Em seguida a mistura foi colocada em um saco plástico, onde permaneceu por 24 horas para homogeneização. Após isso, esse pó foi prensado em um molde retangular de dimensões de 115 x 25,5 x 6,5 mm, em uma prensa uniaxial da marca Schwing Siwa, modelo PHMA, com capacidade nominal de 30 toneladas, que foi calibrada empregando-se uma célula de carga da marca Dinateste, modelo CCI, com capacidade de 200 kN. A carga utilizada na prensagem foi de 15 toneladas, gerando uma pressão de 51,15 MPa. As amostras obtidas foram levadas a uma estufa para secagem a 120 °C, durante 24 horas. Por fim, as mesmas foram sinterizadas em um forno de sinterização rápida de marca Inti-Maitec, modelo FESORP, a uma temperatura de 1225 °C. Foi utilizado um ciclo de sinterização rápido de frio a frio, inferior de 1 hora, com tempo de permanência de 6 minutos na temperatura máxima.

Com a obtenção do porcelanato, a próxima etapa foi a obtenção de um pó fino a partir destas amostras. Para isso as mesmas foram fragmentadas inicialmente em um pilão de alumina e os pedaços foram depositados em um moinho de bolas SERVITECH, cuja jarra é feita de porcelana e seu volume é de 3 litros. As bolas também são de porcelana, e seus diâmetros variados, sendo uma

minoria de diâmetro de 41 mm (massa de 137,6 g), uma parte delas com diâmetro de 21 mm (massa de 19 g) e a maior parte delas com diâmetro de 12 mm (massa de 3,4 g). A relação volume de bolas / volume de pó foi de 1/3. Os pedaços foram moídos por 2 horas. O pó formado foi retirado e peneirado a 200 mesh. Através de microscopia eletrônica de varredura do pó obtido (ver item 4.2), foi observado que o tamanho médio das partículas é da faixa de 20  $\mu\text{m}$ , e um ensaio de caracterização completa do pó mostrou que a densidade real dos grãos é de 2,59  $\text{g}/\text{cm}^3$ .

#### 4.1.2 – Alumina em pó

Neste trabalho utilizou-se a alumina fundida marrom, usada como refratário, doada pela empresa ELFUSA. Este material já foi fornecido na forma de pó fino, produzido pela fusão de bauxitas de nível abrasivo sob condições de redução. Conforme especificação do fabricante, o grão possui forma angular, sua massa específica (densidade real) é de 3,96  $\text{g}/\text{cm}^3$ , seu ponto de fusão é 2020  $^{\circ}\text{C}$  e sua porosidade aparente é de 3,2%. De acordo com a empresa doadora, sua composição é a seguinte:

Tabela 4.1 – Composição da alumina

| $\text{Al}_2\text{O}_3$ | $\text{TiO}_2$ | $\text{SiO}_2$ | $\text{Fe}_2\text{O}_3$ | $\text{MgO}$ | $\text{CaO}$ | $\text{Na}_2\text{O}$ | $\text{K}_2\text{O}$ |
|-------------------------|----------------|----------------|-------------------------|--------------|--------------|-----------------------|----------------------|
| 94,90%                  | 1,86%          | 1,06%          | 1,50%                   | 0,30%        | 0,15%        | 0,12%                 | 0,11%                |

O tamanho médio das partículas, segundo a imagem de microscopia eletrônica de varredura (item 4.2), é inferior a 3  $\mu\text{m}$ .

Além das suas propriedades favoráveis para ser utilizada como carga, a alumina foi escolhida por ser o material usado como carga no revestimento comercial (PPA).

#### 4.1.3 - Proteção Pintável contra Abrasão (PPA)

Trata-se de um revestimento importado e de alto custo, constituído de resina epóxi, agente de cura poliamínico, pigmentos inertes especiais, óxido de alumínio, isento de solventes orgânicos e de outros produtos voláteis. Ele é comercializado sob a marca fantasia “Plasteel”, fabricado pela Tapmatic do Brasil Ind. e Com. LTDA. O teor de alumina neste material não é revelado pela Empresa fabricante. A tabela 4.2 a seguir fornece algumas propriedades desse material, segundo informações do fabricante.

Tabela 4.2 – Algumas propriedades do plasteel

|   |                                |
|---|--------------------------------|
| Tempo mínimo para manuseio  | 6 h após aplicação             |
| Tempo de cura total   | 7 dias                         |
| Densidade após Cura   | 1,7 a 1,9 g/cm <sup>3</sup>    |
| Volume específico após cura   | 0,58 a 0,52 /kg                |
| Rendimento na espessura de 1 mm   | 1,7 a 1,9 kg/m <sup>2</sup>    |
| Contração após cura (ASTM D-2566) [cm]  | 0,0004 a 0,0006                |
| Resistência a compressão (ASTM D-695)   | 5,8 a 6,0 kgf/mm <sup>2</sup>  |
| Resistência a tração (ASTM D-638)   | 2,3 a 2,6 kgf/mm <sup>2</sup>  |
| Resistência a flexão (ASTM D-790)   | 7,0 a 7,6 kgf/mm <sup>2</sup>  |
| Módulo de elasticidade (ASTM D-638)   | 400 a 440 kgf/mm <sup>2</sup>  |
| Coeficiente de expansão térmica (ASTM D-696)<br>[cm/cm°C x 10 <sup>-6</sup> ] | 40 a 46 x 10 <sup>-6</sup>     |
| Condutividade térmica (ASTM C-177)<br>[cal.cm/s.cm 2 .°C x 10 <sup>-3</sup> ] | 1,35 a 1,45 x 10 <sup>-3</sup> |

#### 4.1.4 - Tinta epóxi comercial

Trata-se de uma tinta epóxi poliamida da marca Brasilux, formada por uma mistura cuja proporção é de 75% de resina para 25% de endurecedor (chamado

de Componente B). O seu tempo de secagem para manuseio é de 3 a 4 horas, e secagem final de 7 dias.

#### 4.1.5 – Tinta epóxi com porcelanato em pó

Compósito formado pela tinta epóxi acima citada com partículas de porcelanato em pó, nas proporções de 25%, 50% e 75% em peso de carga para o ensaio de abrasão, e nas proporções de 10, 20, 30, 40 e 50% em peso para os ensaios de medição de espessura e rugosidade.

#### 4.1.6 – Tinta epóxi com alumina em pó

Compósito formado pela tinta epóxi acima citada com partículas de alumina em pó, nas proporções de 25%, 50% e 75% em peso de carga para o ensaio de abrasão, e nas proporções de 10, 20, 30, 40 e 50% em peso para os ensaios de medição de espessura e rugosidade.

#### 4.1.7 - Resina epóxi comercial

Trata-se de uma resina epóxi da marca Epoxtec 8003, com endurecedor (agente de cura) 21Z, onde as proporções para mistura são de 75% de resina para 25% de um agente endurecedor.

#### 4.1.8 – Resina epóxi com porcelanato

Compósito formado pela resina epóxi acima citada com partículas de porcelanato em pó, nas proporções de 25%, 50% e 75% em peso de carga.

#### 4.1.9 – Resina epóxi com alumina

Compósito formado pela resina epóxi acima citada com partículas de alumina em pó, nas proporções de 25%, 50% e 75% em peso de carga.

#### 4.2 – Microscopia Eletrônica de Varredura dos Pós

Foi feita uma análise da forma e tamanho dos pós utilizados neste trabalho como carga nos compósitos obtidos. Para isto utilizou-se um microscópio eletrônico SEM DSM 962, da marca Zeiss.

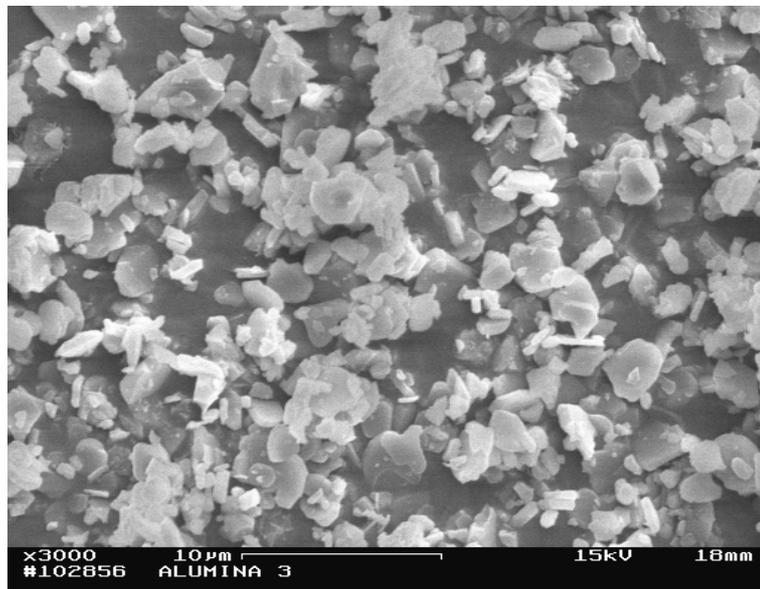


Figura 4.1 – Pó de alumina – aumento de 3000 x

Observa-se na Figura 4.1 que o pó de alumina é formado por partículas de tamanho inferior a 3  $\mu\text{m}$  que possuem formato de placas, com tendência a formarem aglomerados.

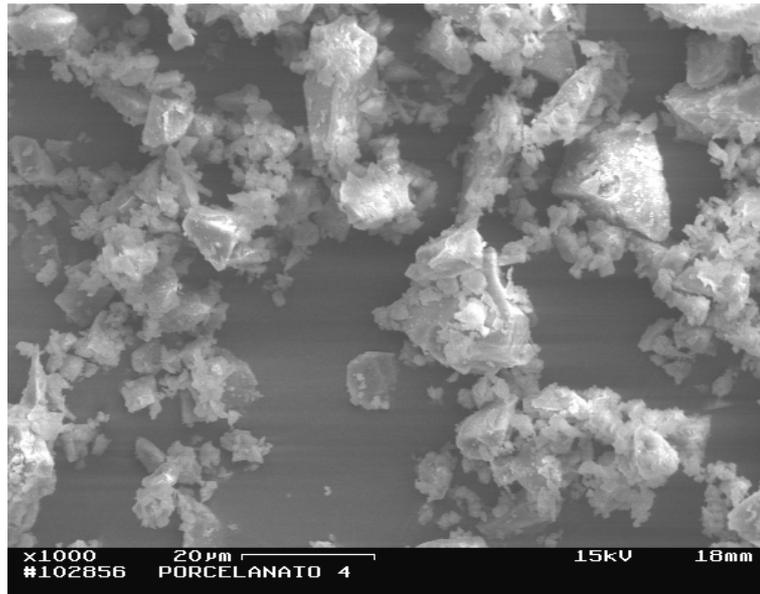


Figura 4.2 – Pó de porcelanato – aumento de 1000 x

Em relação ao pó de porcelanato, este apresenta uma distribuição de tamanho de partícula heterogênea, sendo a maioria constituída de partículas mais finas, aglomeradas, mas também apresentam uma quantidade razoável de partículas maiores (tamanho superior a 20  $\mu\text{m}$ ), cujo formato é típico de um material frágil que foi fragmentado (Figura 4.2).

O pó de alumina apresentou um formato muito mais regular em comparação com o do porcelanato. Devido ao formato irregular das partículas de porcelanato, houve um favorecimento para uma melhor adesão das mesmas à matriz do compósito, o que o torna mais resistente, e isso justifica o fato dele ter sido de maneira geral mais resistente à abrasão do que o compósito a base de alumina.

### 4.3 – Preparação das Misturas

Para o PPA, a tinta epóxi pura e a resina epóxi pura, o procedimento consiste de misturar o componente principal de cada material com um agente endurecedor na proporção de 3:1. Por exemplo, se é desejado preparar 100 ml de mistura, deve-se colocar em um becker graduado 75 ml de componente principal

e 25 ml de endurecedor. A mistura é então homogeneizada e logo em seguida deve ser utilizada.

Para os compósitos de tinta epóxi ou resina epóxi com partículas de porcelanato ou alumina, deve-se primeiro pesar o becker utilizado e, com esse peso anotado, tara-se a balança, prepara-se a mistura da tinta ou da resina nas proporções corretas, pesa-se essa mistura e com isso calcula-se o peso do pó de porcelanato ou alumina que deve ser acrescentado na proporção requerida. A partir daí a mistura é homogeneizada e o compósito é obtido.

#### **4.4 – Obtenção das Amostras**

Para o ensaio de abrasão, as misturas foram vertidas em moldes de plástico retangulares de dimensões 25 mm x 35 mm, com profundidade máxima de 25 mm. Após o tempo de cura, que foi de cerca de 5 dias (especificado pelo fabricante), elas foram removidas das matrizes e as amostras foram obtidas através do corte com um disco abrasivo “Makita” a fim de se obter corpos de prova no formato retangular, como ilustra a figura 4.3 a seguir. Em seguida as amostras foram lixadas para que suas superfícies se tornem o mais regulares possíveis. Para cada percentual de carga adicionada foram preparadas 4 amostras.

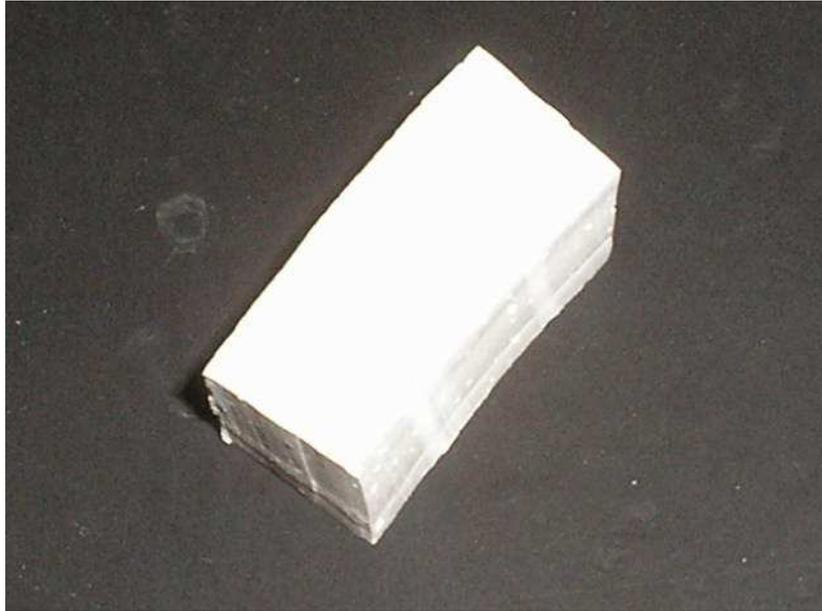


Figura 4.3 – Amostra para ensaio de abrasão

Para o ensaio de fluência, as misturas foram depositadas em matrizes do tipo “gravatinha”, segundo a norma ASTM D638. Após a cura, foram removidas dos moldes e submetidas a secagem posterior em estufa 70 °C por 48 horas, para garantir a cura total das mesmas. A figura 4.4 mostra o molde utilizado e a figura 4.5 mostra a amostra pronta, após o tempo de cura.



Figura 4.4 – Molde utilizado para confecção das amostras para ensaio de fluência



Figura 4.5 – Amostra para ensaio de fluência

Para os ensaios de medição de espessura e da rugosidade superficial, de uma chapa de aço comum ao carbono tipo AISI 1020 foram cortadas e rebarbadas uma série de amostras retangulares com tamanho médio de 35 mm

de lado. Estas amostras tiveram a superfície submetida a faceamento, seguidas de lixamento e passagem de solvente para completa remoção de quaisquer impurezas que ainda pudessem estar presentes. As amostras foram numeradas e foi marcado um ponto na lateral adjacente à face das mesmas para especificar o lugar onde será medida a rugosidade superficial. As amostras foram divididas em lotes que receberam uma camada de revestimento de tinta epóxi somente, tinta epóxi carregada com partículas de alumina (10, 20, 30, 40 e 50% em peso), tinta epóxi carregada com partículas de porcelanato (10, 20, 30, 40 e 50% em peso), e uma de PPA, que servirá como parâmetro comparativo. O tempo de cura esperado para ambos os revestimentos foi de 7 dias.

A seguir são apresentadas fotos que ilustram algumas amostras obtidas.

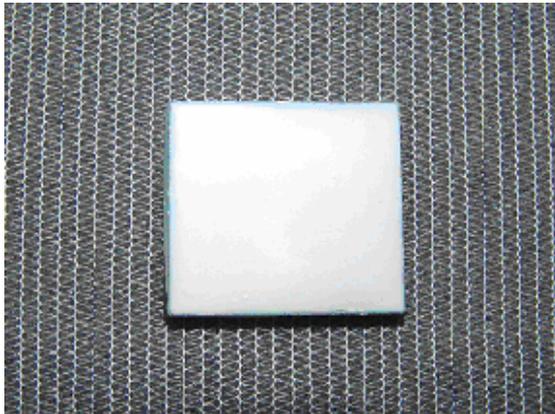


Figura 4.6 - Amostra de aço revestida apenas com tinta epóxi



Figura 4.7 - Amostra de aço revestida com a PPA

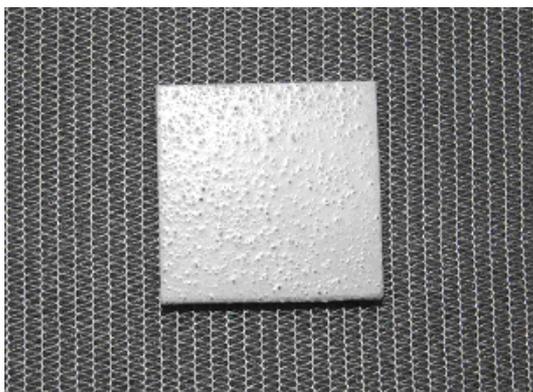


Figura 4.8 - Amostra de aço revestida com epóxi + 30% porcelanato

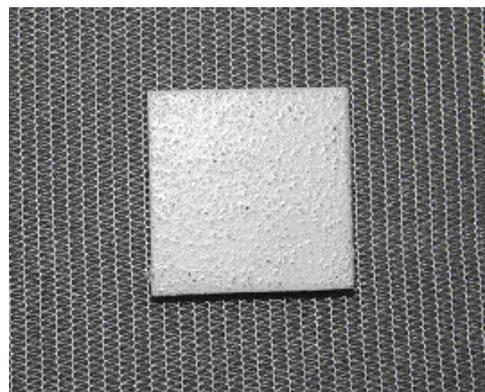


Figura 4.9 - Amostra de aço revestida com epóxi + 50% porcelanato

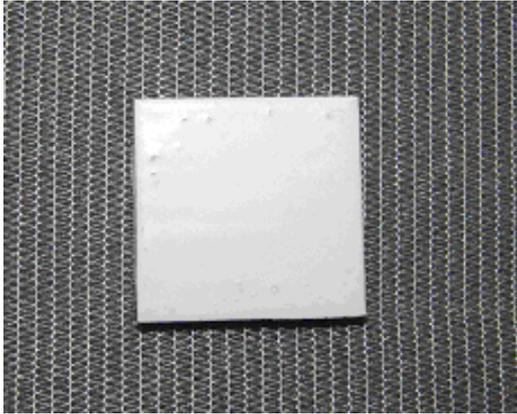


Figura 4.10 - Amostra de aço revestida com epóxi + 30% Alumina

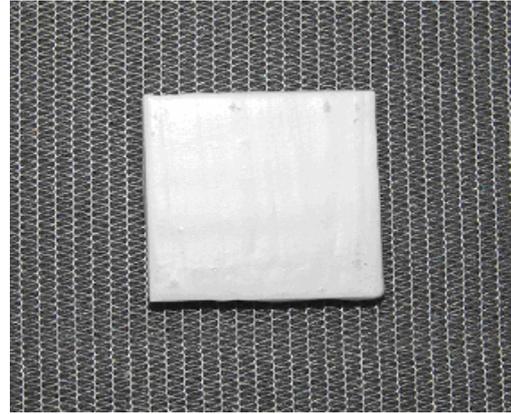


Figura 4.11 - Amostra de aço revestida com epóxi + 50% Alumina

#### 4.5 – Ensaio de Abrasão

As amostras obtidas foram submetidas a um ensaio de abrasão em um Abrasímetro especial modificado e microprocessado, da marca AB800-E, fabricado pela Contenco. Como mostra a figura 4.12 a seguir, tal equipamento consiste de um disco de granito no estado como recebido, com diâmetro externo de 70 cm e diâmetro interno de 30 cm, usinado com pastilha diamantada, o que garante as dimensões requeridas ao acoplamento na base do equipamento. Sobre o disco existe uma garra de fixação das amostras, e mais acima há um suporte onde é colocada a carga de operação.

Os parâmetros utilizados no teste foram carga vertical de 1,5 kgf, rotação do disco de granito de 15 RPM e tempo de duração de ensaio de 20 s. Embora as perdas por erosão que ocorrem no tubo sejam em meio líquido, este ensaio permite avaliar com clareza a variação relativa na perda de material entre a tinta pura e as diversas misturas (Quintela et al., 2006).



Figura 4.12 – Abrasímetro AB800-E

Durante o ensaio, a amostra, fixa no suporte, fica parada em um ponto, enquanto o disco de granito gira na rotação estabelecida, até atingir o tempo de ensaio determinado. Um computador acoplado ao equipamento controla todos os parâmetros. A figura 4.13 a seguir ilustra esse processo.



Figura 4.13 – Amostra fixa pelo suporte sobre o disco de granito

Após a retirada de cada amostra, a pista de granito é aspirada para a remoção de pós do material desgastado, para que não haja qualquer contaminação que pudesse interferir no resultado do ensaio da próxima amostra.

As amostras foram pesadas antes e após o ensaio, para que se possa determinar a perda de massa de cada amostra, a partir da seguinte equação (Aigueira, 2006):

$$PM(\%) = \frac{M_i - M_f}{M_i} \times 100 \quad (4.1)$$

onde  $M_i$  é a massa inicial (antes do ensaio),  $M_f$  é a massa final (após o ensaio) e  $PM(\%)$  é a perda de massa em porcentagem, sendo que a resistência à abrasão das amostras corresponde ao inverso dessa grandeza. Este procedimento é necessário para se evitar que a variação de peso entre amostras interfira no resultado medido.

A resistência à abrasão (RA) das amostras é calculada a partir da seguinte equação:

$$RA = \frac{1}{PM(\%)} \quad (4.2)$$

As amostras foram pesadas em uma balança digital SCALTEC, modelo SBC 31, com resolução de 0,0001 g. Foi calculado o percentual de perda de massa das mesmas através da equação 4.1. Em seguida, calculou-se a média aritmética da perda de massa para cada tipo de amostra.

Esse ensaio também fornece resultados como força tangencial em cada instante do teste. Para obter os gráficos de força tangencial versus faixa perimetral percorrida para cada amostra, calculou-se essa faixa perimetral percorrida. Sendo a rotação do disco de 15 RPM, o tempo de ensaio de 20 s, e considerando que as amostras foram fixadas no disco em um raio de 30 cm (0,30 m), temos que a faixa perimetral percorrida em uma volta do disco de granito foi

de  $2 \times \pi \times (0,30) = 1,88$  m, uma vez que o perímetro de uma circunferência é calculado pela fórmula  $c = 2\pi R$ . Sabendo-se que o disco girou a 15 rotações por minuto, a faixa perimetral percorrida em um minuto é de  $15 \times 1,88 = 28,2$  m. Para determinar a faixa perimetral percorrida em um segundo, divide-se o valor anterior por 60, portanto,  $28,2 \div 60 = 0,47$  m. Como o ensaio teve uma duração de 20 segundos, a faixa perimetral percorrida pelas amostras foi de  $0,47 \times 20 = 9,4$  m. Dessa forma, a massa perdida por metro percorrido no ensaio pode ser encontrada dividindo-se o valor da perda de massa de cada amostra por 9,4.

Também foi registrada a força tangencial em cada segundo de ensaio para cada amostra. Foi calculada a média da força tangencial para cada amostra. Como foram feitos ensaios em quatro amostras de cada tipo, calculou-se um valor médio para cada tipo. Com isso pôde-se montar um gráfico de força tangencial média para cada tipo de amostra e também da força tangencial máxima para cada tipo.

#### **4.6 – Ensaio de Fluência**

Foram realizados ensaios prévios de tração em uma amostra de resina epóxi pura e outra de tinta epóxi pura, para se ter uma idéia da tensão de ruptura das amostras, e assim determinar a tensão utilizada no ensaio de fluência. Utilizou-se uma Máquina Universal de Ensaio Instron modelo 5567, sendo que para a amostra de resina epóxi a velocidade de ensaio foi de 1,5 mm/min, e para a tinta epóxi a velocidade foi de 50 mm/min, uma vez que a primeira é mais resistente que a segunda, e o ensaio com a tinta epóxi deve ser realizado a uma velocidade maior, caso contrário, haveria tempo suficiente para ela se deformar bastante antes de romper.

A partir dos valores de tensão de ruptura pode-se chegar ao valor de tensão utilizado no ensaio de fluência. Utilizou-se cerca de 15% da tensão de ruptura do material em questão, já que, caso fosse utilizado um valor maior, a amostra romper-se-ia logo no início do ensaio.

De posse dos valores de tensão de ruptura, partiu-se para o ensaio de fluência. Foi utilizada uma máquina de ensaios de fluência e relaxação de tensão

sob estados trativos e compressivos da marca Bromberg, como ilustra a figura 4.14. Em primeiro lugar, a máquina de ensaios foi preparada para receber a amostra. Um peso é colocado no suporte da máquina, sendo este calculado de acordo com o tipo de amostra a ser ensaiada. Para aferir a carga registrada na célula de carga, uma barra de metal é presa nas garras da máquina. Dessa forma, pode-se prever um valor aproximado da carga utilizada no ensaio. Após prender a barra nas garras, os discos que ficam abaixo da garra inferior são ajustados até que o valor da carga corresponda a zero.

A partir daí, a alavanca da máquina é solta até que a barra fique apoiada sobre o parafuso. Dessa forma a carga é transferida para a barra de metal e o valor da carga é então lido na célula de carga. Em seguida a barra de metal é retirada e a amostra é presa nas garras da máquina. Após soltar a alavanca, a elongação em milímetros é então lida de tempos em tempos em um relógio comparador acoplado à máquina.



Figura 4.14 – Máquina de Fluência

Vale ressaltar que, de tempos em tempos, os parafusos das garras são apertados para evitar um possível escorregamento da amostra com as mesmas.

Neste momento, acontece um ligeiro avanço no ponteiro do relógio comparador. Por isso, o próximo valor a ser lido foi registrado em um tempo menor do que aquele que realmente corresponderia àquela elongação.

Como os resultados obtidos dos ensaios de fluência são de alongamento (em mm) versus tempo, a deformação foi obtida pela divisão dos valores de alongamento pela deformação inicial, que para o tamanho de amostra utilizada é de 50 mm (valor padrão).

Para este trabalho, os ensaios de fluência foram realizados nos laboratórios da COPPE, na UFRJ, sob a supervisão da professora Marysilvia Ferreira Costa, do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais daquela Universidade. Foram utilizadas amostras do tipo “gravatinha” (norma ASTM D638). Antes das amostras serem submetidas ao ensaio propriamente dito, as mesmas tiveram suas dimensões medidas (largura e espessura) através de um paquímetro, cuja resolução foi de 0,01 mm, para assim calcular a área da seção transversal. A tabela 4.3 apresenta os valores calculados.

Tabela 4.3 – Área das amostras para ensaio de fluência

| <b>Amostra</b> | <b>L (mm)</b> | <b>e (mm)</b> | <b>Área (mm<sup>2</sup>)</b> |
|----------------|---------------|---------------|------------------------------|
| RESINA PURA    | 9,90          | 2,80          | 27,72                        |
| RE25AL         | 9,80          | 3,00          | 29,40                        |
| RE50AL         | 9,80          | 2,50          | 24,50                        |
| RE75AL         | 9,81          | 4,70          | 46,11                        |
| RE25P          | 10,22         | 4,07          | 41,60                        |
| RE50P          | 9,90          | 3,00          | 29,70                        |
| RE75P          | 9,80          | 2,90          | 28,42                        |
| TINTA PURA     | 9,60          | 2,20          | 21,12                        |
| TE25AL         | 9,30          | 2,40          | 22,32                        |
| TE50AL         | 9,60          | 2,30          | 22,08                        |
| TE75AL         | 9,20          | 2,70          | 24,84                        |
| TE25P          | 9,20          | 2,20          | 20,24                        |
| TE50P          | 9,30          | 2,30          | 21,39                        |
| TE75P          | 9,20          | 2,50          | 23,00                        |
| PPA            | 9,90          | 2,70          | 26,73                        |

Para se determinar o valor da tensão utilizada no ensaio de fluência, o ideal seria fazer ensaios de tração nas amostras, obtendo assim a tensão de ruptura, e utilizar no ensaio de fluência um valor de tensão de aproximadamente 60% do valor da tensão de ruptura de cada amostra. Porém, devido a problemas

apresentados na máquina de ensaios, não foi viável a realização dos ensaios de tração em todas as amostras. Foram feitos ensaios prévios de tração em amostras de tinta epóxi pura e de resina epóxi pura, já que estas seriam aparentemente as menos tenazes. Dessa forma, ter-se-ia uma idéia de como as demais amostras se comportariam.

Como no ensaio de fluência são utilizados pesos, foi necessário calcular a carga utilizada em cada amostra. De posse dos valores das áreas calculados, pode-se calcular a carga utilizada no ensaio, de acordo com a tensão esperada (baseada nos valores de tensão de ruptura obtidos para as amostras de tinta pura e resina pura) para cada amostra, através da relação  $F = \sigma \times A$ . A tabela 4.4 a seguir apresenta os valores de carga utilizada em cada amostra.

Tabela 4.4 – Valores de carga utilizada no ensaio de fluência

| <b>Amostra</b> | <b>Carga (N)</b> |
|----------------|------------------|
| RESINA PURA    | 263,0            |
| RE25AL         | 457,2            |
| RE50AL         | 440,0            |
| RE75AL         | 422,8            |
| RE25P          | 530,0            |
| RE50P          | 365,6            |
| RE75P          | 382,0            |
| TINTA PURA     | 33,0             |
| TE25AL         | 43,4             |
| TE50AL         | 34,4             |
| TE75AL         | 74,6             |
| TE25P          | 74,0             |
| TE50P          | 81,2             |
| TE75P          | 58,0             |
| PPA            | 164,0            |

Gráficos de módulo de fluência versus tempo também foram obtidos, sendo esta grandeza fornecida pela seguinte equação:

$$\text{Módulo de Fluência} = \frac{\text{tensão aplicada}}{\text{deformação}} \quad (4.3)$$

Foi feita uma comparação entre os valores de deformação inicial total ( $\epsilon_0$ ) obtidos para todas as amostras, com o intuito de se determinar se houve alguma alteração nesses valores com a adição dos diferentes percentuais de carga à tinta e à resina epóxi. Para isto, montou-se um gráfico do primeiro valor de deformação que surge em cada tipo de amostra.

## **4.7 – Medição de Espessura de Camada e da Rugosidade Superficial**

### **4.7.1 – Medição da Rugosidade Superficial**

Foi medida a rugosidade superficial das amostras nuas (sem tinta) utilizando-se um rugosímetro de marca Mitutoyo, modelo SJ-201P, que consiste em uma unidade detectora que é deslocada na vertical e traça minuciosamente as irregularidades da superfície da área de amostragem. O deslocamento vertical do detector é convertido em sinais elétricos que são sujeitos a cálculos baseados em critérios de medida de rugosidade. O resultado destes cálculos é indicado na tela de cristal líquido.

Foram utilizadas chapas planas ao invés de um tubo por se tratar de um estudo preliminar sobre a viabilidade do uso destes revestimentos em sistemas de proteção contra corrosão-erosão, não descartando a possibilidade dos mesmos testes e medições serem aplicados posteriormente a tubos metálicos para se confirmar os resultados. A figura 4.15 ilustra esse processo.



Figura 4.15 – Rugosímetro

A medida da rugosidade superficial foi feita em microns ( $\mu\text{m}$ ), através do rugosímetro, sobre um desempenho de granito polido Mitutoyo. Do manual deste equipamento, temos que a Rugosidade Superficial é obtida a partir da expressão:

$$R_a = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |Y_i| \quad (4.4)$$

onde  $R_a$  é o somatório dos valores absolutos dos perfis de rugosidade ( $Y_i$ ) obtido a partir de uma linha média, dividida pelo número de picos medidos (N).

#### 4.7.2 – Medição da Espessura de Camada dos Revestimentos

A espessura de camada foi medida em microns ( $\mu\text{m}$ ), em vários pontos aleatórios de cada amostra com um medidor de espessura da marca Mitutoyo, modelo Digi-Derm, com resolução de  $1,0 \mu\text{m}$ .

O medidor digital de espessura de camadas é seguro para medidas não destrutivas de camadas não magnéticas sobre metal magnético e não magnético,

com capacidade de medida de até 1500  $\mu\text{m}$ . Sua leitura é feita por comparação e há a necessidade de zerá-lo com uma base de metal (metal sem camadas). A calibração é feita através de diversas placas padrão de calibração, que são filmes com espessura de 23, 50, 100, 252, 504, 975 e 1479  $\mu\text{m}$  e uma base plana de aço sobre a qual é posta o padrão com espessura conhecida. A calibração deve ser feita antes de começar-se a medir, sendo que a placa padrão escolhida deve ser a que tiver a espessura mais próxima possível da medida a ser executada. Os valores medidos são indicados diretamente no display de cristal líquido com a máxima precisão. A figura 4.16 ilustra o processo de calibração do medidor de espessura.

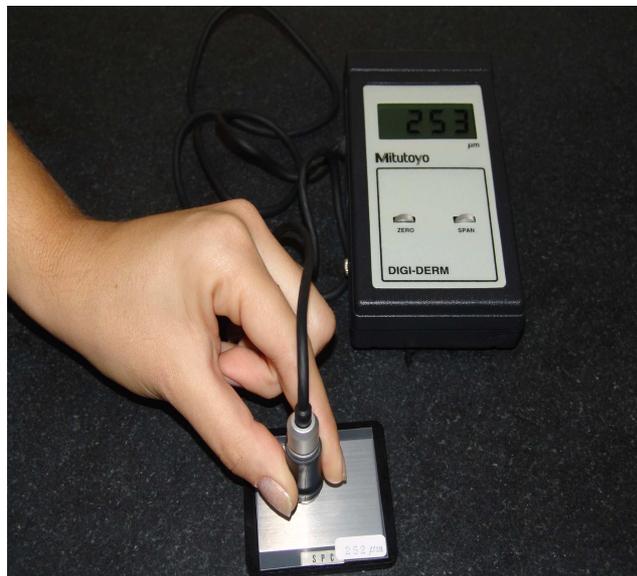


Figura 4.16 – Calibração do medidor de espessura

O suporte de medição consiste de um simples núcleo e uma ponta de contato. Possui um rasgo em “V” para auxiliar na medição de peças cilíndricas e possui uma mola que garante uma pressão constante entre o ponto de contato do medidor e a peça sendo medida.

#### 4.7.3 – Cálculo do Fator de Atrito

Para calcular-se o fator de atrito, necessita-se da Rugosidade Relativa e do número de Reynolds. Então com a medida da rugosidade calculada experimentalmente para cada corpo de prova, foi calculado o valor da rugosidade relativa através da equação 3.5.2, considerando o diâmetro do tubo como um valor médio de 48" (1219200  $\mu\text{m}$ ). Assim como o diâmetro do tubo, o número de Reynolds foi calculado baseado na literatura, com parâmetros de escoamento de petróleo bruto (Fox e McDonald, 2001), onde considerou-se:

$$\rho = 930 \text{ kg/m}^3;$$

$$D = 48" \text{ ou } 1,2192 \text{ m};$$

$$V = 2,5207 \text{ m/s, considerando uma vazão de 1,6 milhão de barris por dia;}$$

$$\mu = 0,0167 \text{ Kg/m.s}$$

Aplicando-se a equação 3.5.1 nos parâmetros acima, temos que o número de Reynolds ( $Re$ ) é igual a  $1,71 \times 10^5$ , o que caracteriza o escoamento de petróleo bruto (ou cru), como um escoamento em regime turbulento.

Os valores de rugosidade relativa e o número de Reynolds obtidos foram plotados no diagrama de *Moody* para obter-se uma medida do coeficiente de atrito.

Para fins de comparação, os cálculos acima foram feitos para um valor de diâmetro menor (4" ou 0,1016 m). O número de Reynolds obtido seria de  $1,43 \times 10^4$ .

## CAPÍTULO 5

### 5 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 5.1 – Ensaio de Abrasão

Foi realizado ensaio de abrasão em 4 amostras de cada tipo de material, sendo então calculado um valor médio para cada tipo. A tabela a seguir mostra os resultados obtidos. As siglas que iniciam com as letras “RE” significam que a matriz em questão é a resina epóxi; as que se iniciam com “TE” significa que a matriz em questão é a tinta epóxi; as que terminam com as letras “AL” significam que a carga utilizada foi alumina, e os números que as precedem são as porcentagens de carga utilizada; as que terminam com “P” significa que a carga utilizada foi o porcelanato, e os números que a precedem são as porcentagens de carga utilizada; por fim, a sigla “PPA”, como já foi dito anteriormente, significa “proteção pintável contra abrasão”, ou seja, é o revestimento comercial utilizado como referência.

Tabela 5.1 – Resultados do ensaio de abrasão

| <b>Tipo de Amostra</b> | <b>Perda de Massa (%)</b> |
|------------------------|---------------------------|
| RESINA PURA            | 08,63                     |
| RE25AL                 | 11,85                     |
| RE50AL                 | 08,10                     |
| RE75AL                 | 02,32                     |
| RE25P                  | 05,32                     |
| RE50P                  | 05,03                     |
| RE75P                  | 02,12                     |
| TINTA PURA             | 42,13                     |
| TE25AL                 | 63,95                     |
| TE50AL                 | 63,55                     |
| TE75AL                 | 07,05                     |
| TE25P                  | 28,84                     |
| TE45P                  | 32,81                     |
| TE50P                  | 38,98                     |
| TE75P                  | 25,86                     |
| PPA                    | 51,02                     |

Como pode ser observado, as amostras referentes à resina epóxi com 75% de porcelanato obtiveram o menor valor de perda de massa dentre todas as demais amostras (PM = 2,12 %), sendo esse valor bem próximo ao das amostras de resina epóxi com 75% de alumina (PM = 2,32 %). Em seguida aparecem as amostras resina epóxi com 50% de porcelanato (PM = 5,03 %) e resina epóxi com 25% de porcelanato (PM = 5,32 %). As amostras de tinta epóxi com 25% de alumina apresentaram o maior valor de perda de massa (PM = 63,95 %), seguidas pelas de tinta epóxi com 50% de alumina (PM = 63,55 %) e as de PPA (PM = 51,02 %).

Observa-se também que à medida que se adiciona carga à resina epóxi, a perda de massa diminui. Isto ocorre devido ao fato do material compósito ser mais resistente à abrasão do que a resina, que atua como matriz neles. Uma exceção foi o compósito de resina epóxi com 25% de alumina, que apresentou uma perda de massa mais elevada do que a resina epóxi pura. Isto pode ter ocorrido devido à baixa molhabilidade da alumina, que foi usada na forma de um pó muito fino, o que dificulta a sua mistura homogênea com a resina. Com isso ocorre uma aglomeração de partículas de alumina em algumas regiões das amostras e detrimento a outras, e a região que ficou em contato com o disco de granito pode ter sido mais pobre em partículas em relação às demais, ou um espalhamento ainda pior das partículas de alumina pode ter acontecido neste lote de corpos de prova.

O mesmo pode ser dito em relação à tinta epóxi pura. À medida que se adicionou carga a ela, sua perda de massa tende a diminuir, com exceção da tinta epóxi com 25% de alumina e com 50% de alumina. Nestas amostras também pode ter ocorrido aglomeração de partículas em certas regiões, e isto explica o fato delas serem menos resistentes à abrasão do que a tinta pura.

No caso da resina epóxi, quando a ela foram adicionados 75% tanto de alumina quanto de porcelanato, a perda de massa obtida nos ensaios foi praticamente igual. Já para as porcentagens de 25% e 50%, a perda de massa foi maior para os compósitos de alumina do que para os de porcelanato. Isto mostra que os grãos de porcelanato fornecem uma maior resistência à abrasão ao compósito até um determinado percentual de adição. Para grandes quantidades de carga adicionada, a perda de massa independe do tipo de partícula. Isto pode ser explicado pelo fato da matriz ter uma área útil de ancoragem reduzida, e as partículas abrasivas estarem muito próximas, face à sua elevada concentração no compósito.

Isto já não pode ser afirmado para o caso da tinta epóxi. Para as percentagens de 25% e 50% de carga, a perda de massa foi menor para o caso da adição de porcelanato do que para a adição de alumina. Isto já era esperado, pois o porcelanato utilizado apresentou tamanhos de grãos muito superiores ao da alumina, além do seu formato ser mais irregular que o do pó de alumina. Porém, para a percentagem de 75%, a adição de alumina forneceu uma maior resistência à abrasão ao compósito do que a de porcelanato. Isto pode ser explicado pelo fato de que, sendo o percentual de carga elevado, as partículas de porcelanato podem ter formado aglomerados, diminuindo a concentração de partículas em algumas regiões e assim o pó não fica bem aderido à matriz. Isto faz com que elas se desprendam mais facilmente durante o processo de atrito com o disco de granito (mecanismo de “pull-out”). Portanto, isto leva à conclusão de que partículas finamente dispersas podem ser utilizadas em quantidades mais elevadas do que partículas maiores, pois uma boa dispersão, de forma homogênea, reduz os contatos partícula-partícula, elevando a resistência à abrasão.

### 5.1.1 – Força Tangencial

Os gráficos a seguir ilustram a força tangencial em função da linha perimetral percorrida no ensaio. Foi escolhida apenas uma das 4 amostras para representar cada classe.

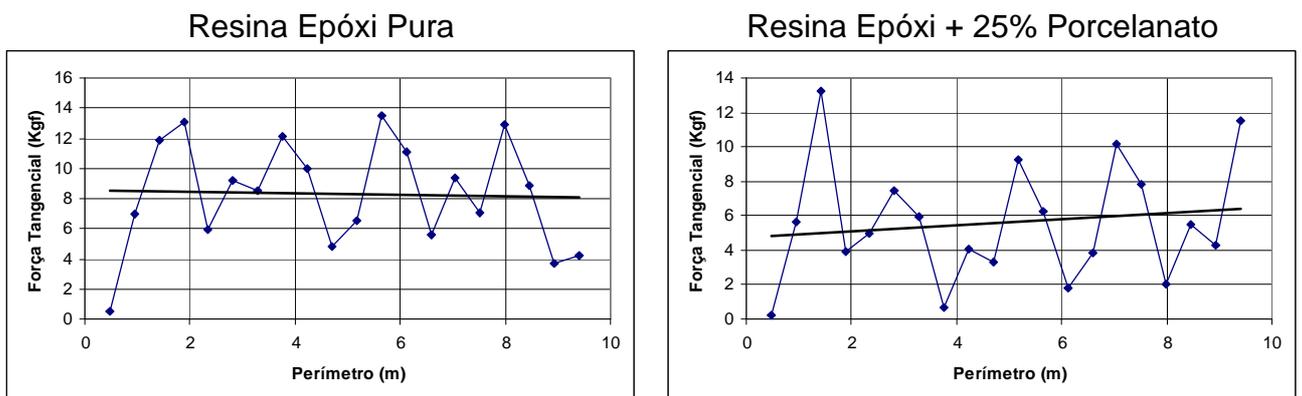


Figura 5.1 – Gráficos de Força Tangencial x Linha Perimetral Percorrida para as amostras de Resina Pura e RE25P

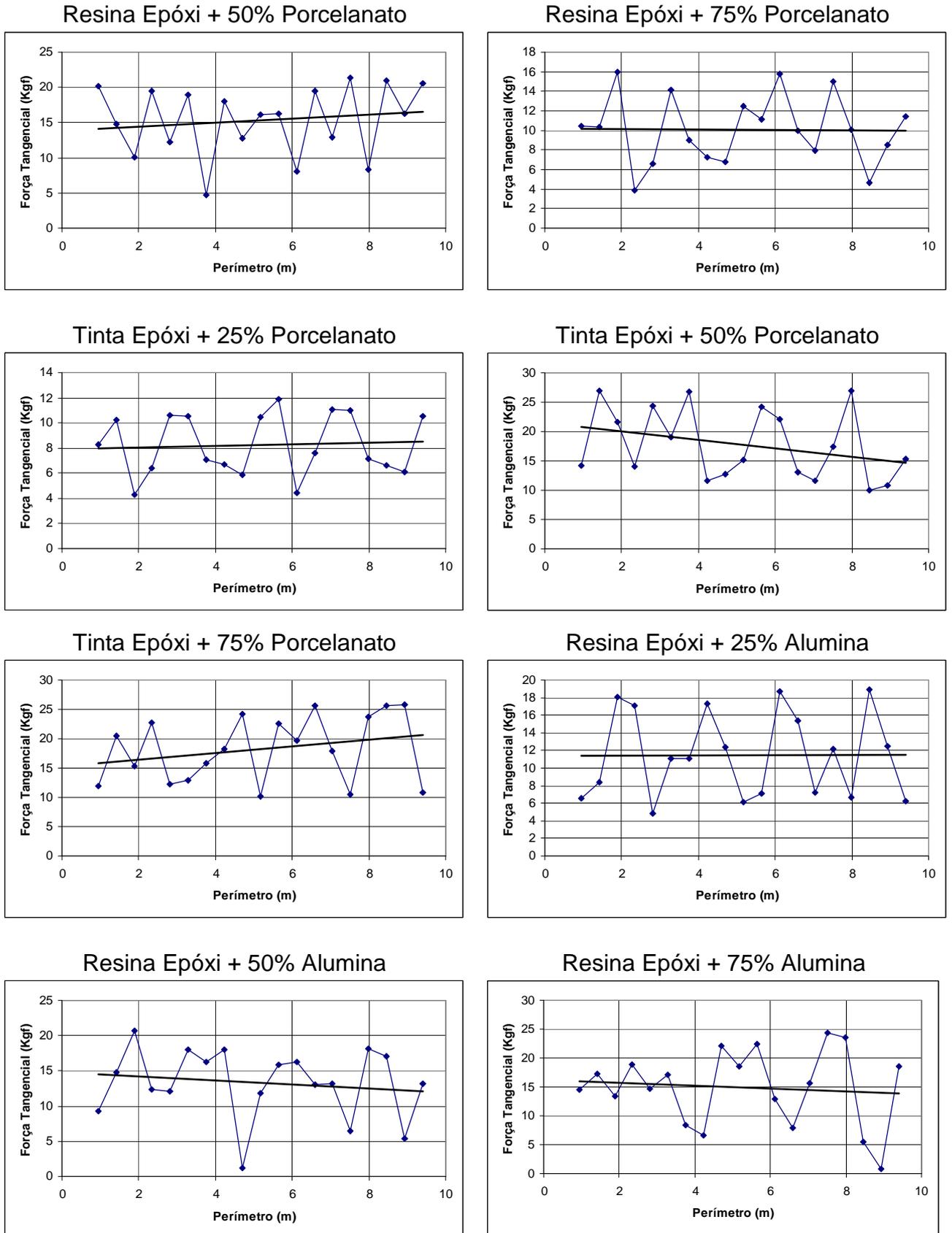


Figura 5.2 – Gráficos de Força Tangencial x Linha Perimetral Percorrida para as amostras RE50P, RE75P, TE25P, TE50P, TE75P, RE25AL, RE50AL e RE75AL

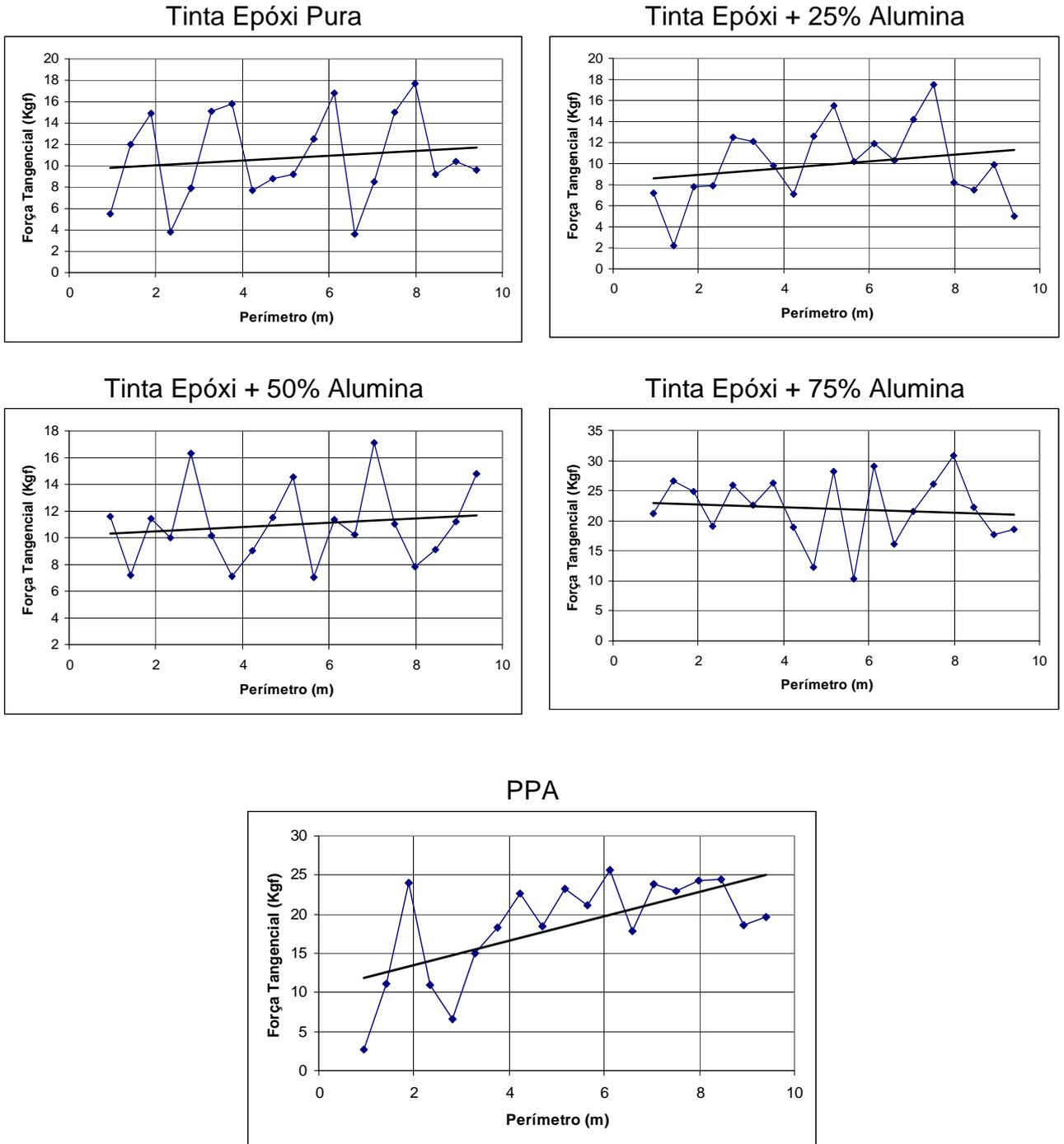


Figura 5.3 – Gráfico de Força Tangencial x Linha Perimetral Percorrida para as amostras de Tinta Pura, TE25AL, TE50AL, TE75AL e PPA

Nos gráficos das figuras 5.1 a 5.3, os valores iniciais de força tangencial (próximos de zero) foram desconsiderados para efeito de cálculo de média, uma vez que a máquina só começa a fazer a leitura da força tangencial 1 segundo após o início do ensaio.

Em seguida, foi calculado o valor médio da força tangencial para cada amostra. De posse dessas médias, calculou-se uma nova média desses valores para as 4 amostras de cada tipo. O valor obtido foi registrado em função da linha perimetral percorrida. Também foi calculada uma média dos maiores picos de força tangencial de cada amostra de um mesmo lote. Estes picos são isolados e ocorrem em lugares diferentes do teste para cada amostra.

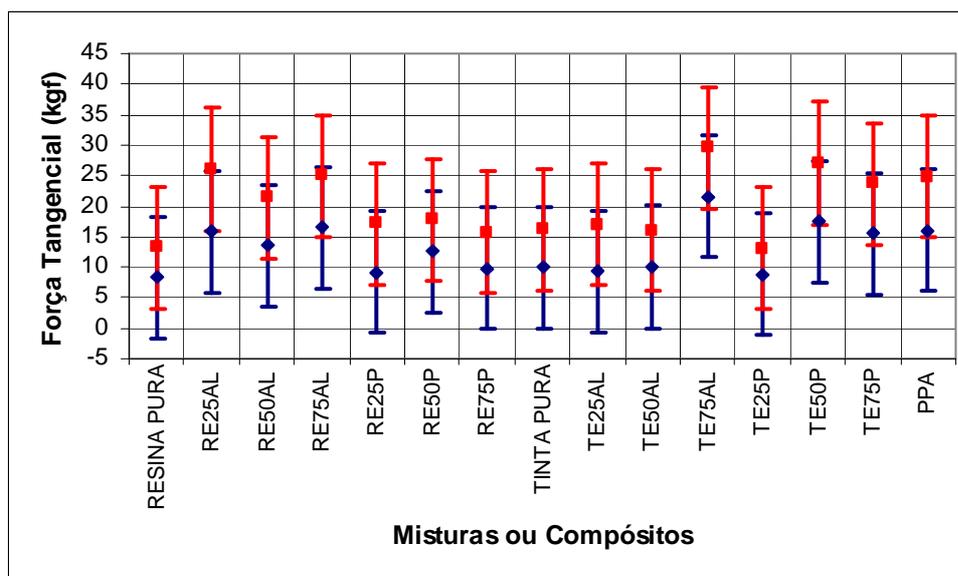


Figura 5.4 – Gráfico dos Valores Médio (pontos azuis) e Máximo (pontos vermelhos) da Força Tangencial Para Todas as Amostras; Linhas verticais em azul e vermelho são as barras de erro dos valores médios e máximos de força tangencial, respectivamente.

Para uma melhor análise do gráfico da figura 5.4, dividiu-se valores de força tangencial em três classes: de 8 a 13 kgf (valores “baixos”), de 13 a 18 kgf (valores “médios”) e de 18 a 23 kgf (valores “altos”). Esta divisão foi arbitrária e de decisão dos autores do estudo, como forma de permitir a classificação futura de novos compósitos para o mesmo fim. Verificou-se que a maioria das amostras se encontra dentro da primeira classe, sendo elas as referentes à resina epóxi pura, tinta epóxi pura, resina epóxi com porcelanato (em todas as três proporções), tinta epóxi com alumina nas proporções de 25 e 50% de carga e tinta epóxi com 25 % de porcelanato. Dentre estas, a que apresentou menor valor de força tangencial foi a de resina epóxi pura. Isto significa que ela foi a que menos resistiu ao movimento do disco de granito, o que já era esperado, pois a resina pura é mais tenaz e dúctil, e

também pouco rugosa, quando comparada com os compósitos estudados. Portanto sua aderência ao disco é muito pequena. Já as amostras que se enquadraram na segunda classe são as referentes à resina epóxi com alumina (em todas as três proporções), tinta epóxi com porcelanato nas proporções de 50 e 75 % de carga e a PPA. Pode-se dizer então que as amostras enquadradas nesta classe impõem maior resistência ao movimento do disco. O fato de que a adição de partículas torna a amostra mais rugosa também contribui no aumento da força tangencial. E na terceira classe somente a amostra de tinta epóxi com 75 % de alumina se enquadrou, sendo ela a que apresentou o maior valor de força tangencial entre todas as amostras. Provavelmente a razão para esse valor de força tangencial ser elevado é a baixa rigidez da tinta aliada ao fato do coeficiente de atrito entre ela e o granito ser alto, e por isso esta amostra não é indicada para a aplicação como revestimento.

Com relação às amostras de compósitos cuja matriz é a resina epóxi, a adição de alumina provocou um aumento mais pronunciado na força tangencial gerada do que a adição de porcelanato. Isto mostra que as amostras compósitas de porcelanato com resina epóxi obtiveram um melhor desempenho no tocante à resistência ao movimento de um material em contato com elas. Ou seja, as amostras de alumina com resina epóxi resistiram mais ao movimento do disco porque as partículas de alumina estão finamente dispersas na matriz epóxi, mais do que quando do uso do porcelanato.

Para os compósitos à base de tinta epóxi, a adição de alumina praticamente não alterou os resultados de força tangencial para teores de até 50%. Para teores de 75% de alumina, houve um aumento pronunciado da força tangencial. Isto mostra que altas concentrações de partículas de alumina prejudicam o desempenho do compósito a respeito da resistência ao movimento do disco de granito, pois não se consegue promover uma boa adesão das partículas à matriz. O mesmo aconteceu para a adição de partículas de porcelanato à matriz de tinta epóxi. Porém, pelo fato destas partículas possuírem uma maior aderência, pode-se dizer que o aumento nos valores de força tangencial não foi tão pronunciado como no caso da alumina.

Em relação à PPA, a mesma se apresentou com valores de força tangencial superiores à maioria das demais amostras testadas, sendo esses valores inferiores somente aos das amostras TE75AL, TE50P e RE75AL, sendo que desta última os valores foram bastante próximos. Assim, a maioria das amostras ensaiadas

apresentou um desempenho superior ao da PPA no que se refere à resistência ao movimento do disco abrasivo.

Também foi observado que a linha de valores máximos de força tangencial reflete aquela de valores médios, ou seja, a amostra que tem maior valor de força tangencial média também apresenta maior valor de força tangencial máxima. Isso acontece devido a, dentre outros fatores, irregularidades da pedra, fenômeno de “pull-out” não homogêneo e cantos vivos das amostras. Porém, o interesse maior é nos valores médios, e não nos picos de força tangencial, uma vez que os valores médios representam a condição de funcionamento em regime de trabalho da região protegida pelo revestimento.

## 5.2 – Ensaio de Fluência

### 5.2.1 – Ensaio prévio de tração

Ensaio de tração foram realizados em duas amostras, uma de resina epóxi pura e outra de tinta epóxi pura, para se determinar a tensão de ruptura e ter uma noção da faixa de tensão a ser trabalhada nos ensaios de fluência. Os resultados obtidos são ilustrados a seguir:

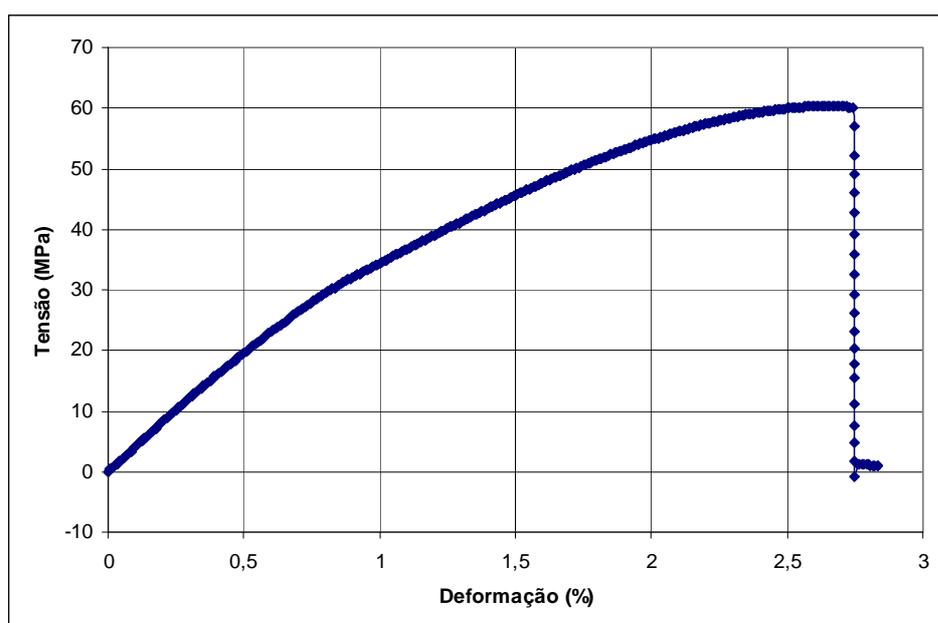


Figura 5.5 – Gráfico de tensão x deformação para uma amostra de resina epóxi Epoxtec 8003 com endurecedor 21Z, ensaiada a 1,5 mm/min

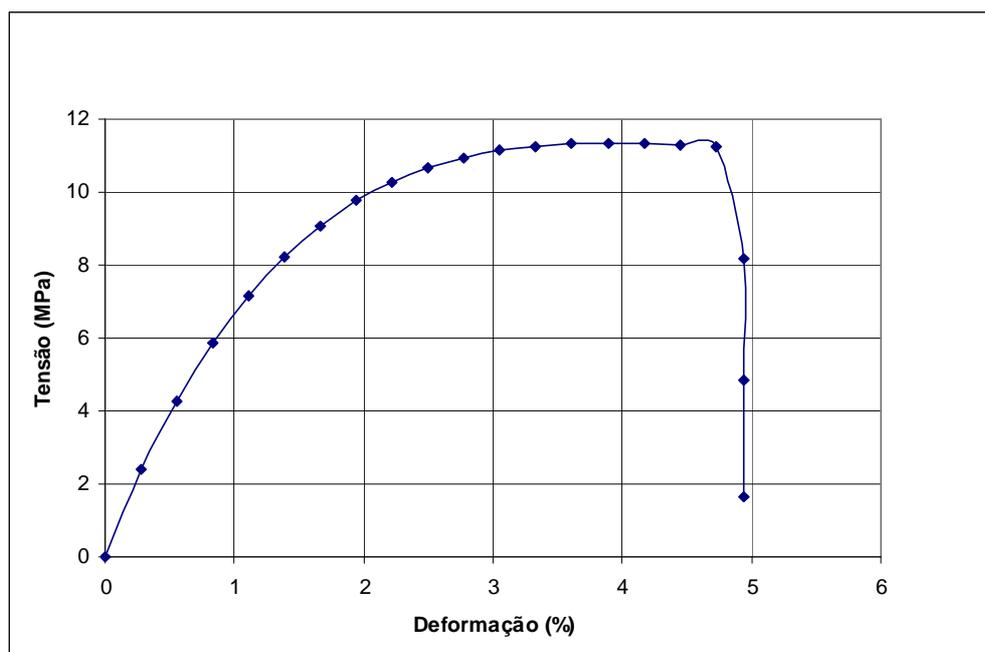


Figura 5.6 – Gráfico de tensão x deformação para uma amostra de tinta epóxi Brasilux, ensaiada a 50 mm/min

Pode-se observar que, para a amostra de resina epóxi, a tensão de ruptura foi de 60 MPa, enquanto que para a amostra de tinta, esta tensão foi de aproximadamente 11 MPa. Era de se esperar que a resistência mecânica da resina fosse maior que a da tinta, já que a tinta é uma diluição da resina, ou seja, a resina é um de seus componentes. Porém, o ensaio foi realizado em velocidades diferentes para cada amostra, e esse fator influencia na comparação, em se tratando de materiais poliméricos.

### 5.2.2 – Ensaio de Fluência: Obtenção das Deformações versus Tempo

Os gráficos a seguir ilustram o comportamento de deformação versus tempo obtido para cada amostra ensaiada, sendo que para cada amostra são apresentados três gráficos, um de deformação versus tempo, o seguinte de módulo de fluência x tempo e um terceiro de módulo de fluência x tempo, em escala logarítmica.

## i) Resina Epóxi Pura – Carga de 263,0 N

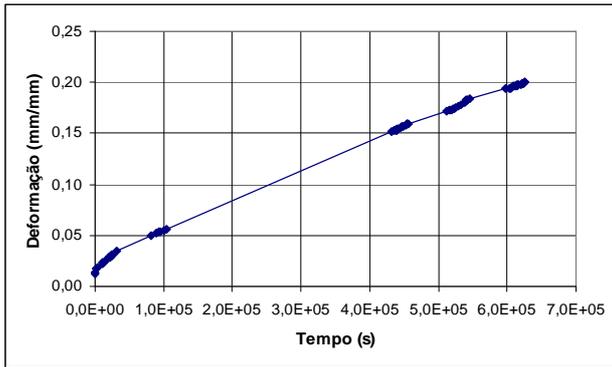


Figura 5.7 – Deformação x Tempo -  
Resina Pura

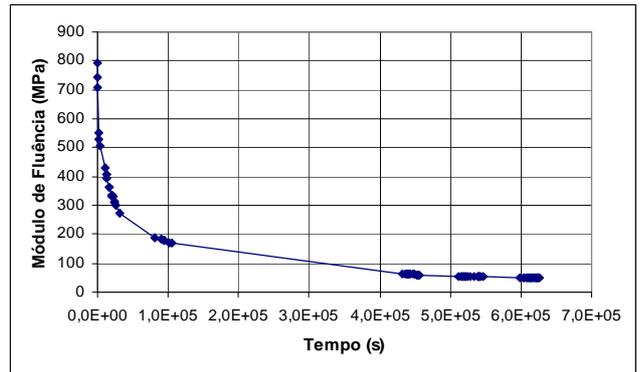


Figura 5.8 – Módulo de Fluência x t -  
Resina Pura

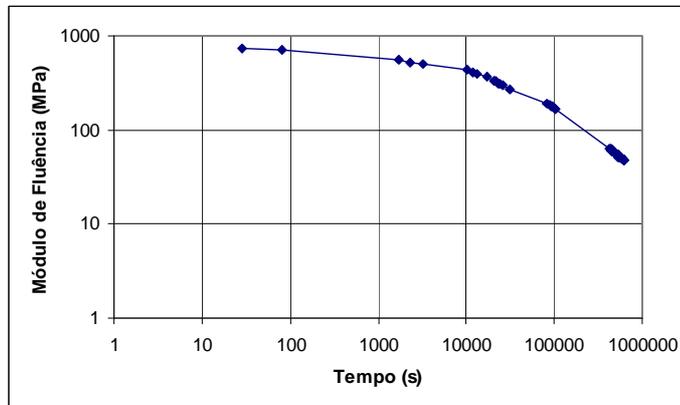


Figura 5.9 – Módulo de Fluência x t - Resina Epóxi Pura – escala logarítmica

Esta amostra apresentou valores altos de deformação máxima (0,20 mm/mm) e valores intermediários de módulo de fluência (cerca de 800 MPa), sendo sua resistência à fluência baixa. Estes valores altos de deformação máxima podem ser atribuídos à presença de um excesso do agente de cura na amostra atuando neste caso como plastificante da rede de ligações cruzadas (Amaral et al., 2001).

## ii) Resina Epóxi com 25% de Alumina - Carga de 457,2 N

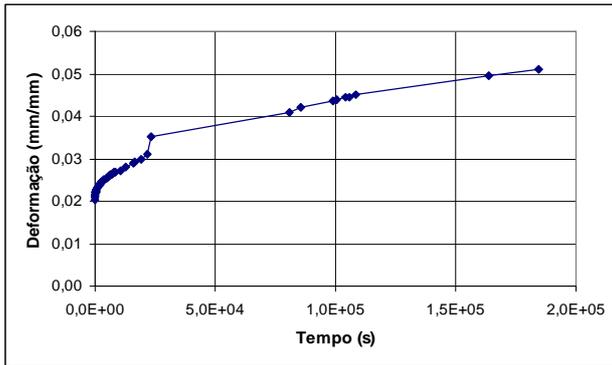


Figura 5.10 – Deformação x Tempo -  
RE25AL

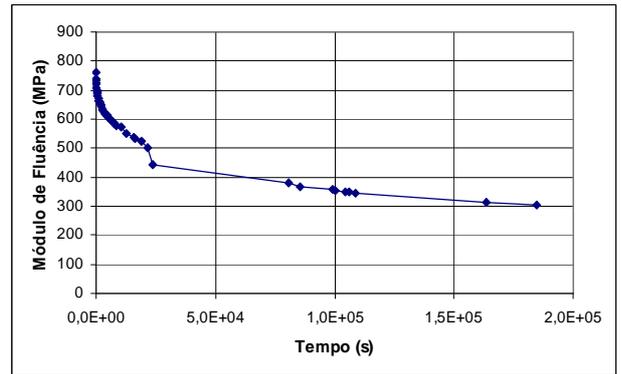


Figura 5.11 – Módulo de Fluência x t -  
RE25AL

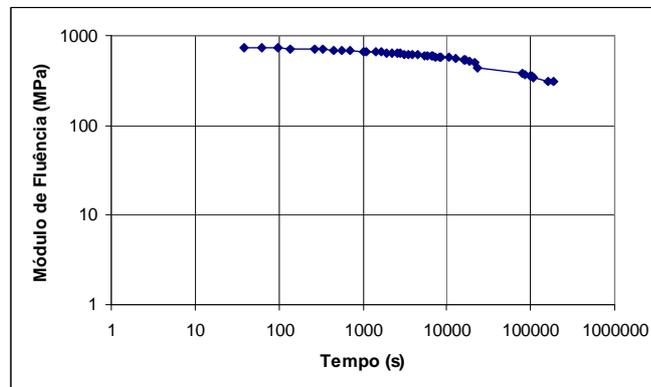


Figura 5.12 – Módulo de Fluência x t - RE25AL – escala logarítmica

A amostra de resina epóxi carregada com 25% de alumina apresentou uma redução de 4 vezes no valor de deformação máxima, em comparação à resina pura. Além disso, o módulo de fluência aumentou em aproximadamente 4 vezes. Portanto, a adição de 25% de alumina à resina epóxi aumentou a resistência à fluência do compósito. Este comportamento é de se esperar, uma vez que Zhao e Li (2007) explicaram que a incorporação de nanopartículas de alumina à resina epóxi pode melhorar a rigidez da matriz.

iii) Resina Epóxi com 50% de Alumina - Carga de 440,0 N

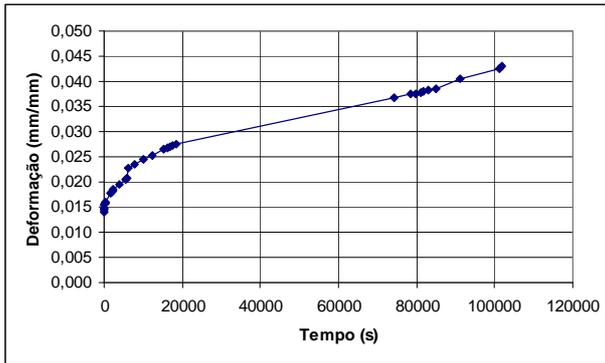


Figura 5.13 – Deformação x Tempo - RE50AL

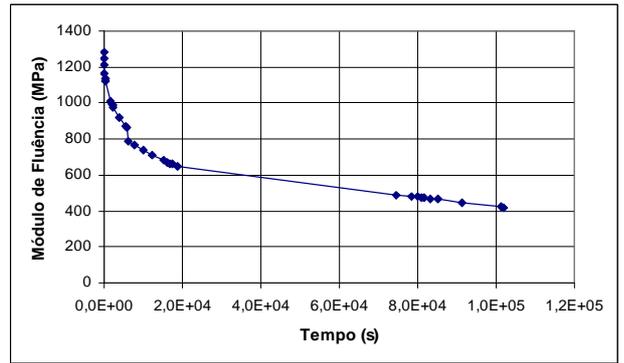


Figura 5.14 – Módulo de Fluência x t - RE50AL

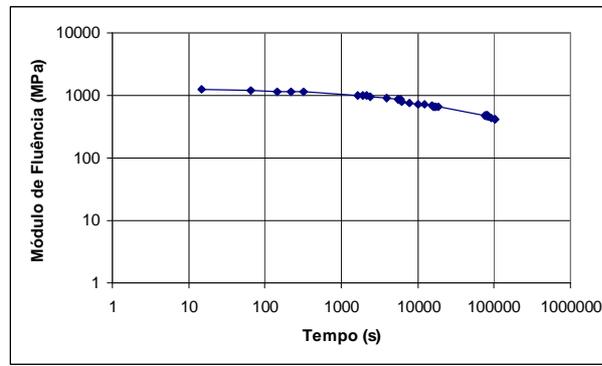


Figura 5.15 – Módulo de Fluência x t - RE50AL – escala logarítmica

Observa-se que a adição de 50% de alumina à resina epóxi provocou uma diminuição ainda maior no valor da deformação máxima atingida e um aumento maior no módulo de fluência, se comparado à RE25AL. Assim, este compósito é ainda mais resistente à fluência que o anterior.

iv) Resina Epóxi com 75% de Alumina - Carga de 422,8 N

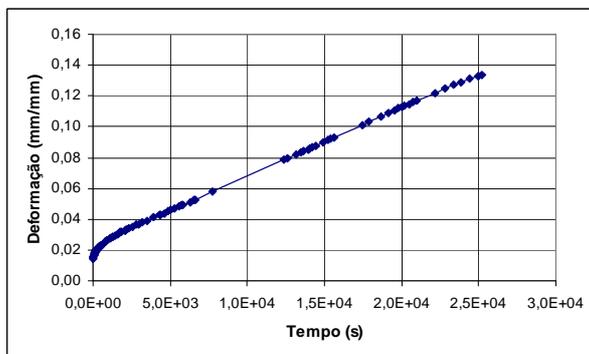


Figura 5.16 – Deformação x Tempo – RE75AL

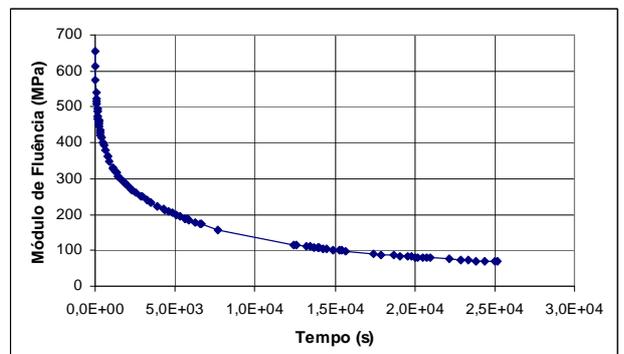


Figura 5.17 – Módulo de Fluência x t - RE75AL

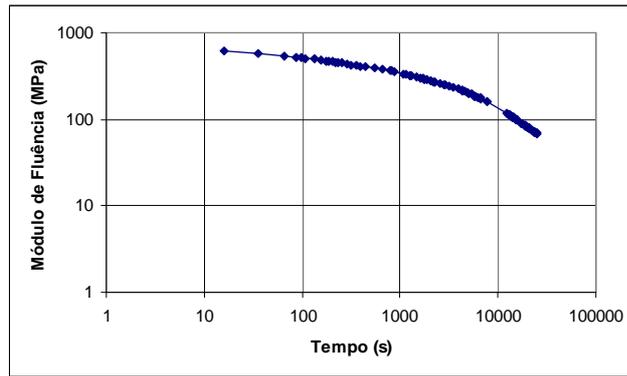


Figura 5.18 – Módulo de Fluência x t - RE75AL – escala logarítmica

Pode-se observar que a adição de 75% de alumina à resina epóxi também aumentou a resistência à fluência do material obtido, se comparado à resina pura, porém o aumento foi muito menor que para adições de porcentagens menores de alumina, já que o valor máximo de deformação atingida diminuiu discretamente, e o aumento do valor do módulo de fluência não foi pronunciado. Isto indica que provavelmente atingiu-se a “região de saturação”, no que tange ao valor percentual de carga cerâmica na matriz polimérica. O efeito da adição de elevados percentuais de carga também foi observado nos trabalhos de Aigueira e Figueira (2006), quando do estudo de abrasão do sistema SiC-poliéster, onde foi relatado que o aumento de partículas abrasivas na matriz dos compósitos promove uma melhora no seu desempenho até um certo limite, e a partir deste, o desempenho começa a cair.

v) Resina Epóxi com 25% de Porcelanato - Carga de 530,0 N

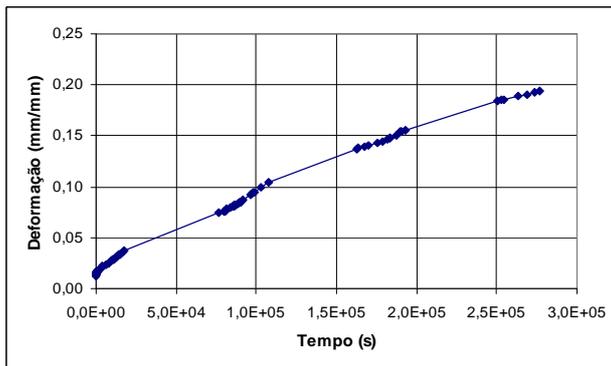


Figura 5.19 – Deformação x Tempo – RE25P

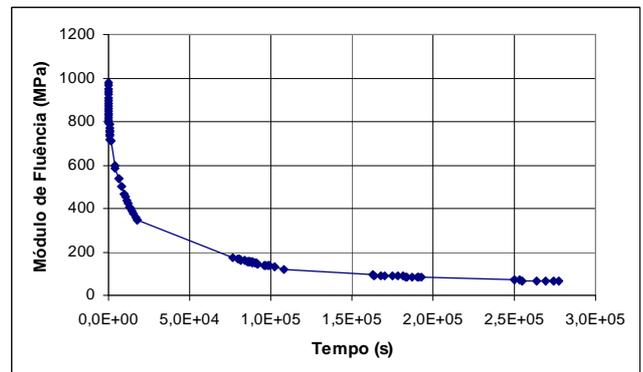


Figura 5.20 – Módulo de Fluência x t - RE25P

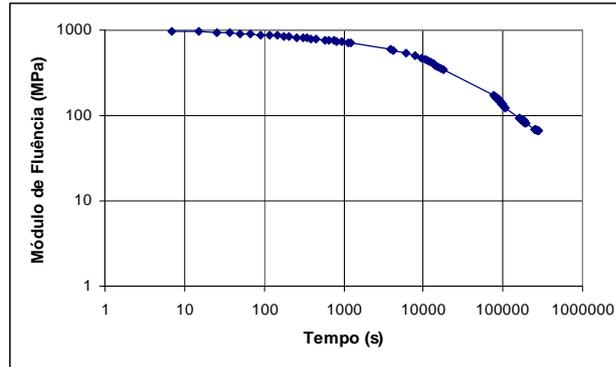


Figura 5.21 – Módulo de Fluência x t - RE25P – escala logarítmica

Para esta amostra, o valor de deformação máxima praticamente não se alterou, se comparado à resina pura. Porém, houve um aumento no valor do módulo de fluência de cerca de 2,5 vezes. Isto indica que sua resistência à fluência aumentou em um grau moderado.

vi) Resina Epóxi com 50% de Porcelanato - Carga de 365,6 N

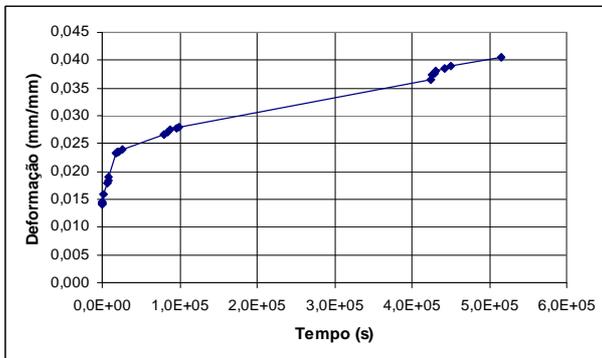


Figura 5.22 – Deformação x Tempo -

RE50P

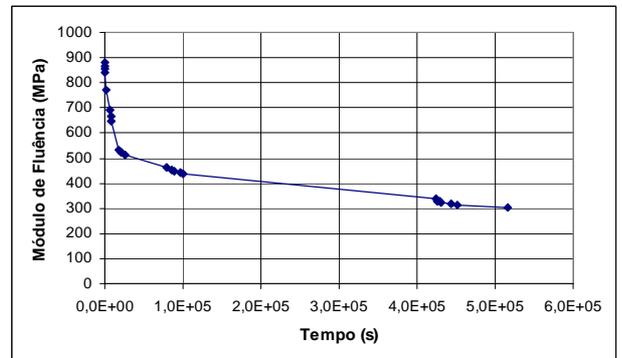


Figura 5.23 – Módulo de Fluência x t -

RE50P

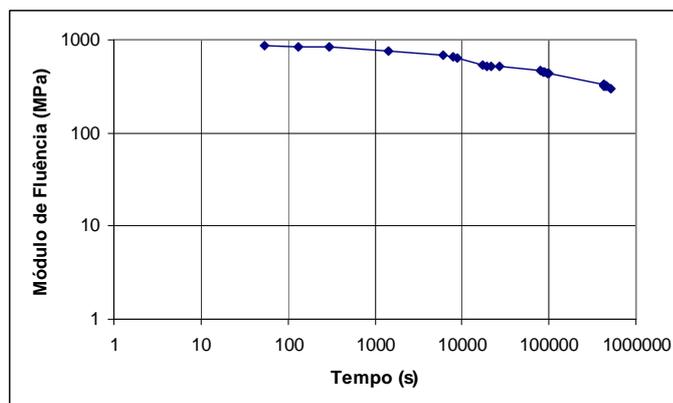


Figura 5.24 – Módulo de Fluência x t - RE50P – escala logarítmica

A deformação máxima atingida por esta amostra foi 5 vezes menor que a da resina pura, e seu módulo de fluência aumentou mais de 3 vezes, indicando que a adição de 50% de porcelanato aumenta bastante a resistência à fluência do compósito.

vii) Resina Epóxi com 75% de Porcelanato - Carga de 382,0 N

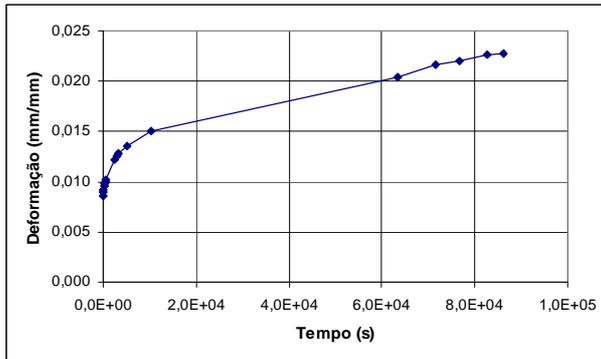


Figura 5.25 – Deformação x Tempo –

RE75P

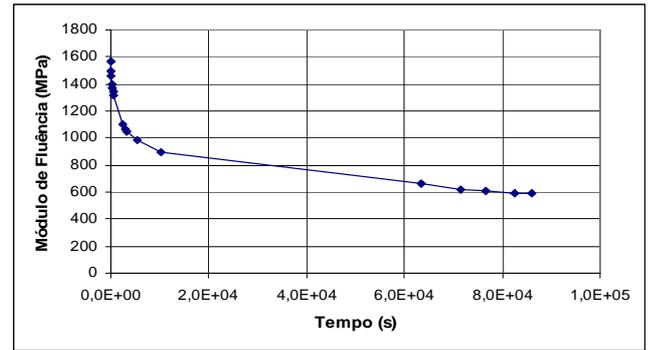


Figura 5.26 – Módulo de Fluência x t -

RE75P

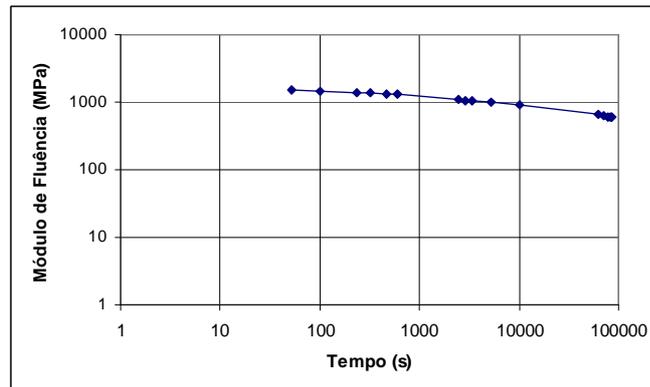


Figura 5.27 – Módulo de Fluência x t - RE75P – escala logarítmica

Esta amostra apresentou o menor valor de deformação máxima atingida (cerca de 0,023 mm/mm) e o maior valor de módulo de fluência (cerca de 1560 MPa) dentre todas as demais. Sendo assim, ela é a mais resistente à fluência entre todas as amostras estudadas, uma vez que a concentração de porcelanato é elevada (75%), e também devido ao fato de haver uma maior aderência porcelanato-resina do que alumina-resina, face ao que já foi explicado por Aigueira e Filgueira (2006).

## viii) Tinta Epóxi Pura - Carga de 33,0 N

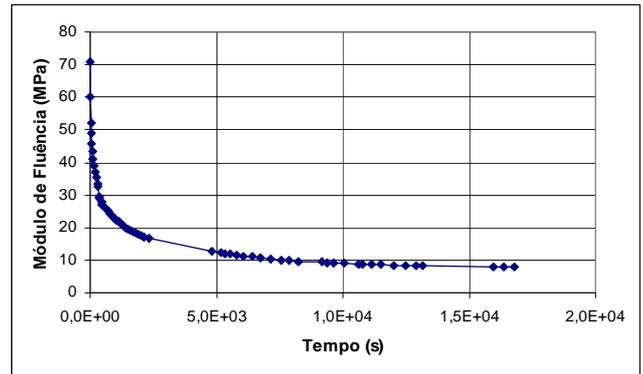
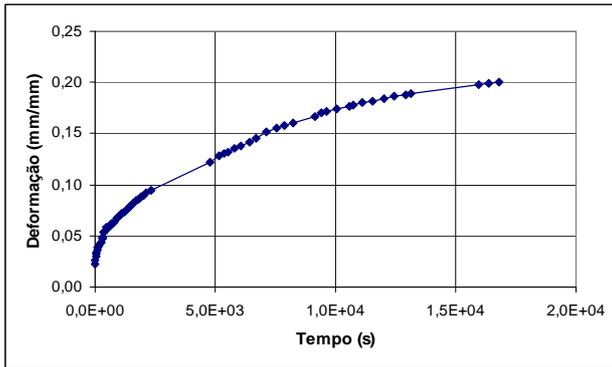


Figura 5.28 – Deformação x Tempo - Tinta

Figura 5.29 – Módulo de Fluência x t - Tinta

Pura

Pura

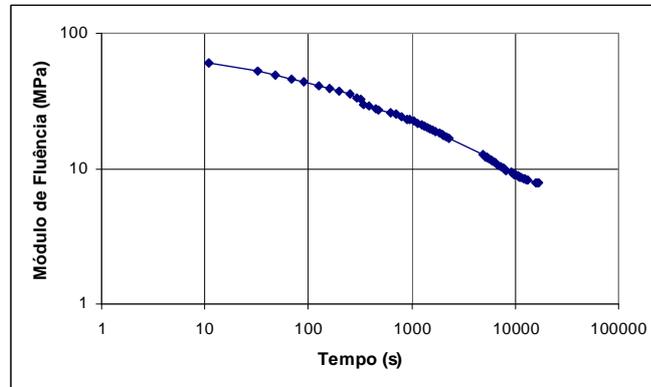


Figura 5.30 – Módulo de Fluência x t - Tinta Pura – escala logarítmica

Esta amostra apresentou um valor elevado de deformação máxima (0,20 mm/mm), como o da amostra de resina pura, porém, seu módulo de fluência foi um dos menores de todas as amostras (cerca de 71 MPa), tornando sua resistência à fluência muito baixa. Isto pode ser atribuído à estrutura polimérica da tinta epóxi, em contraste com a da resina pura. Pode-se pensar que tenham ocorrido alterações nas interações inter e intramoleculares da estrutura da tinta, em decorrência da presença do solvente e da carga da tinta (Gnecco et al., 2003).

ix) Tinta Epóxi com 25% de Alumina - Carga de 43,4 N

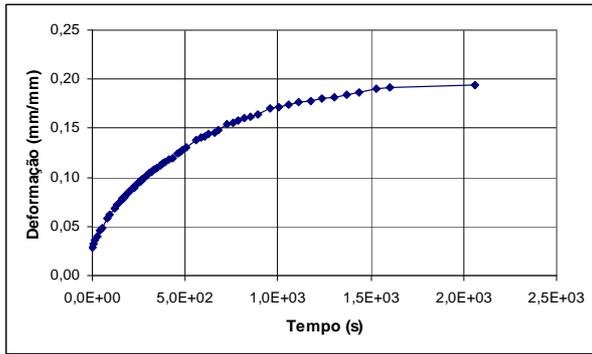


Figura 5.31 – Deformação x Tempo - TE25AL

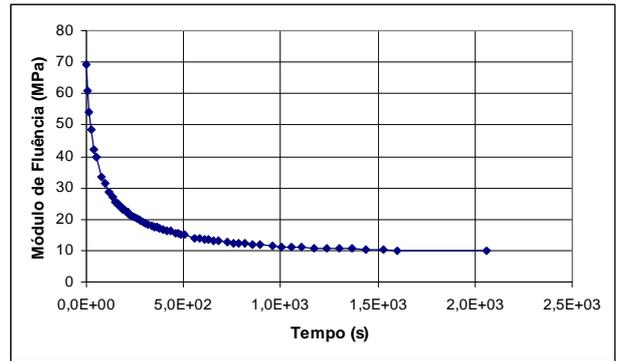


Figura 5.32 – Módulo de Fluência x t - TE25AL

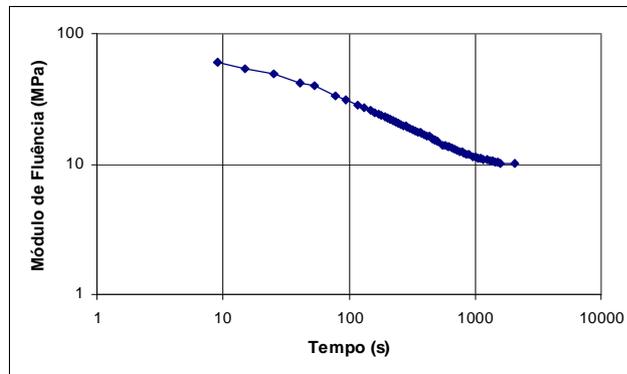


Figura 5.33 – Módulo de Fluência x t - TE25AL – escala logarítmica

Como se pode observar, a adição de 25% de alumina à tinta epóxi praticamente não alterou o valor de deformação máxima e o módulo de fluência, se comparado à tinta pura. Sendo assim, não houve alteração na resistência à fluência para este percentual de adição de carga.

x) Tinta Epóxi com 50% de Alumina - Carga de 34,4 N

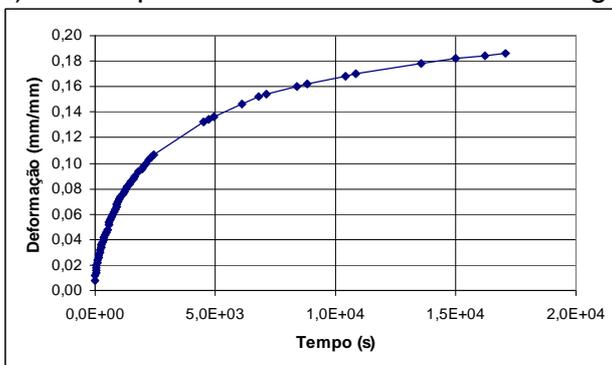


Figura 5.34 – Deformação x Tempo - TE50AL

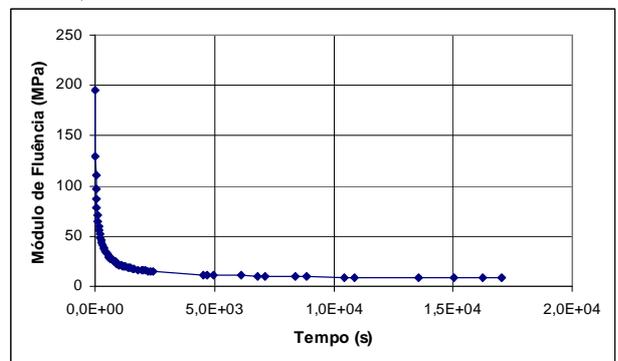


Figura 5.35 – Módulo de Fluência x t - TE50AL

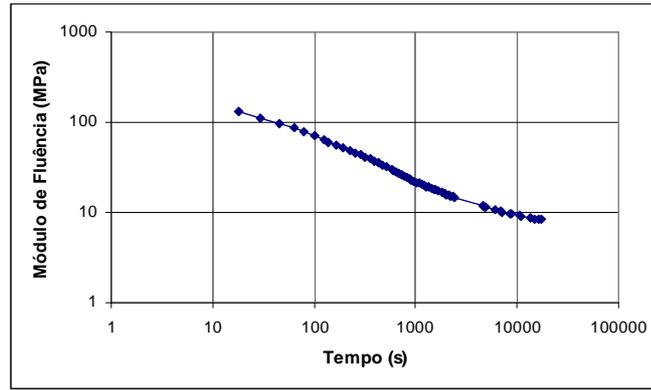


Figura 5.36 – Módulo de Fluência x t - TE50AL – escala logarítmica

Para a amostra TE50AL, houve uma discreta diminuição no valor de deformação máxima atingida e também um discreto aumento no módulo de fluência, se comparada à tinta pura. Portanto, a adição de 50% de alumina à tinta epóxi aumentou muito pouco a resistência à fluência do compósito obtido.

xi) Tinta Epóxi com 75% de Alumina - Carga de 74,6 N

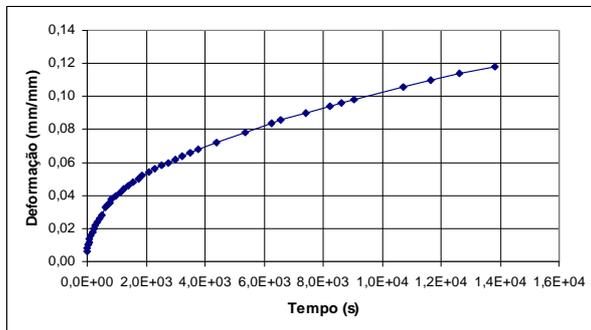


Figura 5.37 – Deformação x Tempo – TE75AL

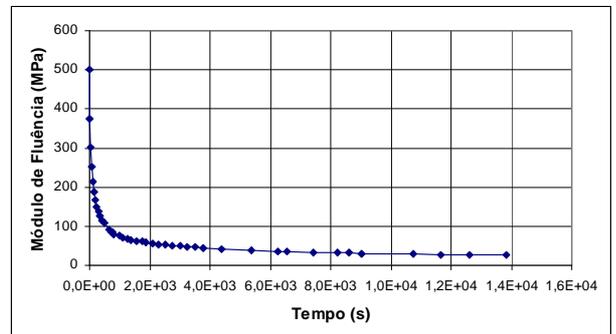


Figura 5.38 – Módulo de Fluência x t - TE75AL

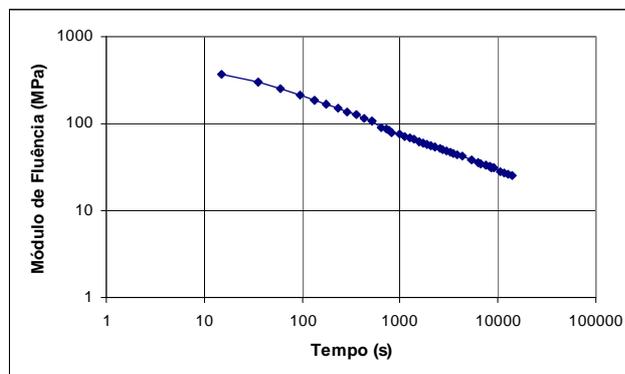


Figura 5.39 – Módulo de Fluência x t - TE75AL – escala logarítmica

Para esta amostra, a deformação máxima atingida caiu praticamente pela metade, em relação à tinta pura, enquanto que o módulo de fluência aumentou cerca de 4,5 vezes. Assim, a adição de 75% de alumina à tinta epóxi provoca o aumento da resistência à fluência do compósito obtido.

xii) Tinta Epóxi com 25% de Porcelanato - Carga de 74,0 N

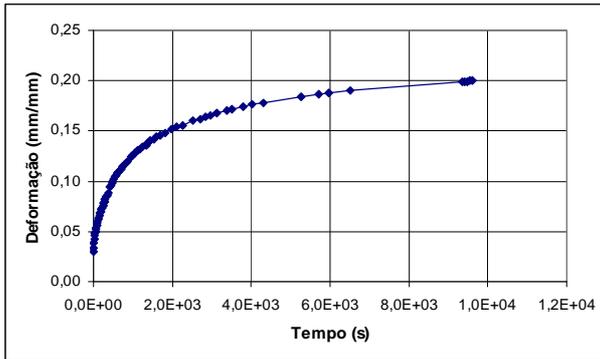


Figura 5.40 – Deformação x Tempo – TE25P

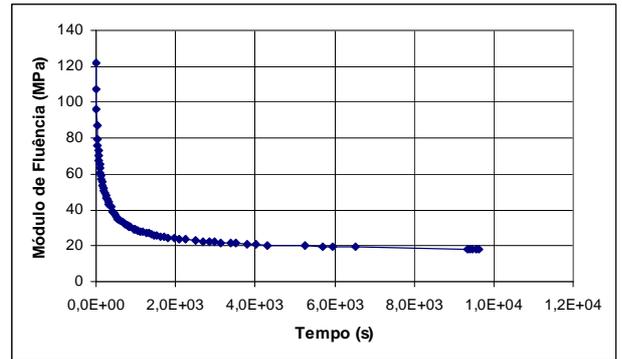


Figura 5.41 – Módulo de Fluência x t - TE25P

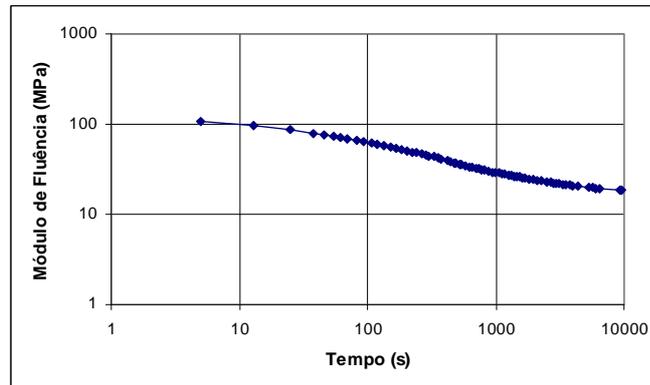


Figura 5.42 – Módulo de Fluência x t - TE25P – escala logarítmica

É observado que para a adição de 25% de porcelanato à tinta epóxi não houve alteração no valor de deformação máxima, porém, houve um ligeiro aumento no módulo de fluência, comparando-se à tinta pura, o que a torna pouco mais resistente à fluência.

## xiii) Tinta Epóxi com 50% de Porcelanato - Carga de 81,2 N

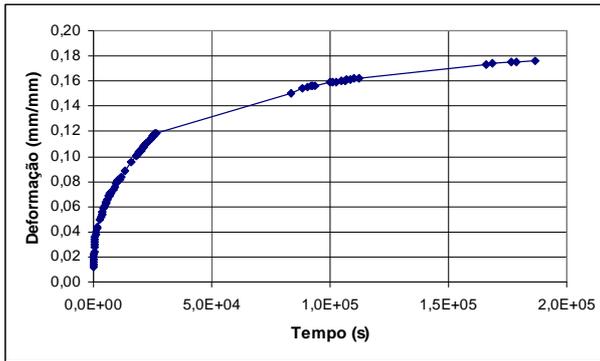


Figura 5.43 – Deformação x Tempo -  
TE50P

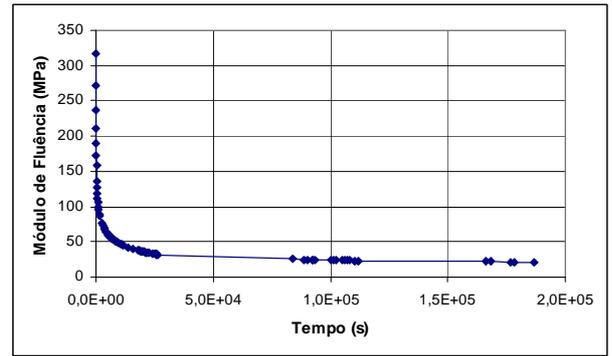


Figura 5.44 – Módulo de Fluência x t -  
TE50P

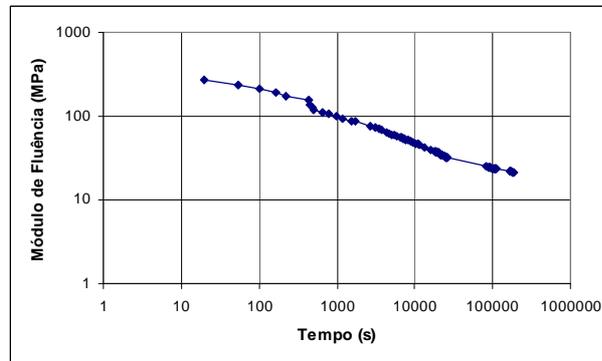


Figura 5.45 – Módulo de Fluência x t - TE50P – escala logarítmica

Para a adição de 50% de porcelanato à tinta epóxi, ocorreu uma pequena diminuição na deformação máxima atingida, mas houve um aumento de 3 vezes no módulo de fluência, em relação à tinta pura. Pode-se dizer então que para este percentual de adição de porcelanato a resistência à fluência aumentou, o que já era de se esperar, uma vez que, segundo o trabalho de Salazar et al., 2006, a adição de partículas cerâmicas a uma matriz polimérica resulta em propriedades mecânicas superiores nos compósitos obtidos, pois ocorre uma boa transmissão de tensões entre as fases.

## xiv) Tinta Epóxi com 75% de Porcelanato - Carga de 58,0 N

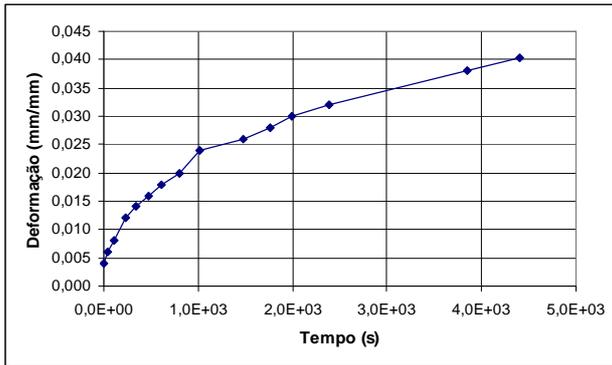


Figura 5.46 – Deformação x Tempo –  
TE75P

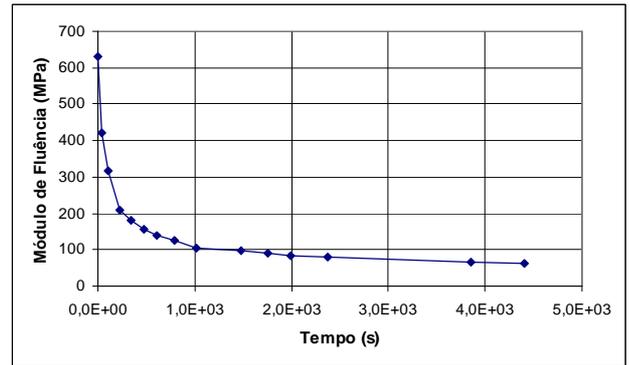


Figura 5.47 – Módulo de Fluência x t –  
TE75P

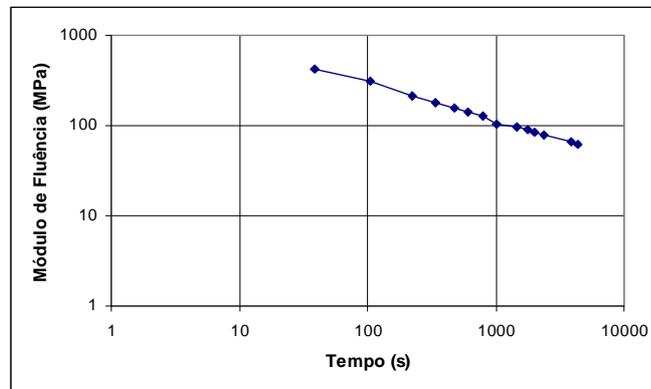


Figura 5.48 – Módulo de Fluência x t – TE75P – escala logarítmica

Em relação a esta amostra, pode-se afirmar que sua resistência à fluência é maior que a da tinta pura, uma vez que, comparativamente, houve uma diminuição significativa na deformação máxima (de 5 vezes) e um aumento considerável no módulo de fluência (de quase 9 vezes), e isto é atribuído à melhora na resistência à adesão do compósito com a adição de partículas cerâmicas, o que concorda com o trabalho de Kubernach e Miller (1997).

xv) PPA - Carga de 164,0 N

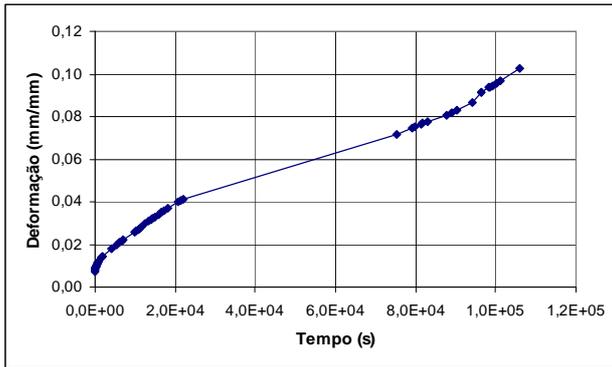


Figura 5.49 – Deformação x Tempo - PPA

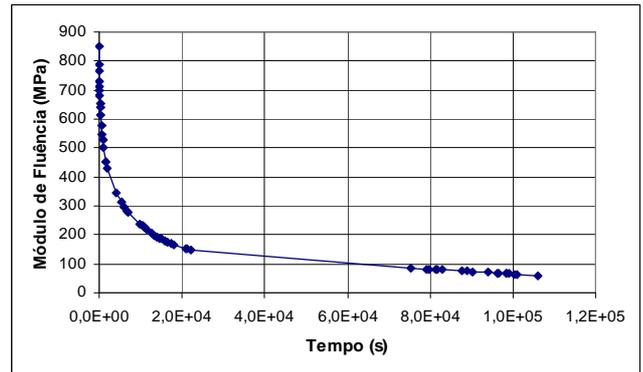


Figura 5.50 – Módulo de Fluência x t - PPA

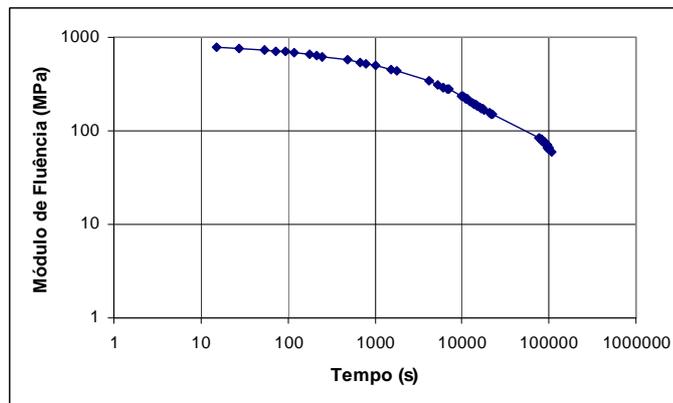


Figura 5.51 – Módulo de Fluência x t - PPA – escala logarítmica

A amostra de PPA apresentou uma deformação máxima da ordem de 2 vezes menor que a da resina pura e a tinta pura. Porém, a maioria dos compósitos obtidos neste estudo se mostrou com uma deformação máxima inferior à da PPA. Da mesma forma, o módulo de fluência deste revestimento comercial foi superior ao da resina pura e da tinta pura, porém, somente os compósitos com matriz de resina epóxi superaram a PPA no módulo de fluência. Estes compósitos possuem, então, maior resistência à fluência que a PPA.

Pode-se observar nos gráficos deformação x tempo de cada amostra que aquelas que atingiram maiores valores de deformação máxima foram as de resina epóxi pura, tinta epóxi pura, resina epóxi com 25% de porcelanato, tinta epóxi com 25% de alumina e tinta epóxi com 25% de porcelanato. Ou seja, em geral, as amostras com pouco ou nenhum teor de carga são as menos resistentes à fluência dentre todas ensaiadas.

No caso das amostras de resina epóxi com partículas de alumina, os valores de deformações máximas foram muito baixos. Sendo assim, a alumina aumentou a

resistência à fluência do compósito em todas as porcentagens adicionadas. Já com a adição de partículas de porcelanato à resina epóxi, a resistência à fluência somente diminuiu significativamente para elevados percentuais. Além disso, observa-se que a adição de 75% de porcelanato à resina epóxi levou a uma diminuição nos valores de deformação máxima de cerca de dez vezes em relação às amostras que mais se deformaram, e esta seria a amostra mais indicada para aplicações que envolvem solicitação mecânica sob carga constante.

A adição de partículas de alumina à tinta epóxi praticamente não alterou a deformação máxima atingida, havendo uma tendência de diminuição da deformação para teores muito elevados de pó. E adicionando-se partículas de porcelanato à tinta epóxi, somente há uma redução significativa nos valores de deformação máxima para teores de 75%, ou seja, somente para valores elevados de porcentagem de pó adicionado pode-se dizer que a resistência à fluência aumentou.

A PPA apresentou valores de deformação máxima superiores aos das amostras RE25AL, RE50AL, RE50P, RE75P e TE75P, sendo esses compósitos mais resistentes à fluência do que o revestimento comercial.

### 5.2.3 – Valores Médios e Máximos do Módulo de Fluência

Os valores médios e máximos do módulo de fluência obtidos foram os seguintes:

Tabela 5.2 – Valores Médios e Máximos do Módulo de Fluência

| Amostra     | Valor Médio (MPa) | Valor Máximo (MPa) |
|-------------|-------------------|--------------------|
| RESINA PURA | 160,30            | 790,64             |
| RE25AL      | 572,14            | 762,30             |
| RE50AL      | 772,83            | 1282,80            |
| RE75AL      | 252,35            | 654,96             |
| RE25P       | 393,77            | 980,03             |
| RE50P       | 533,81            | 879,27             |
| RE75P       | 1066,49           | 1562,93            |
| TINTA PURA  | 21,10             | 71,02              |
| TE25AL      | 20,41             | 69,44              |
| TE50AL      | 33,70             | 194,75             |
| TE75AL      | 97,94             | 500,54             |
| TE25P       | 39,31             | 121,87             |
| TE50P       | 63,44             | 316,35             |
| TE75P       | 184,27            | 630,43             |
| PPA         | 290,20            | 852,14             |

Para fins de comparação, foi montado um gráfico dos valores médios e máximos do módulo de fluência para cada tipo de amostra. Os pontos azuis correspondem aos valores médios e os pontos vermelhos correspondem aos valores máximos.

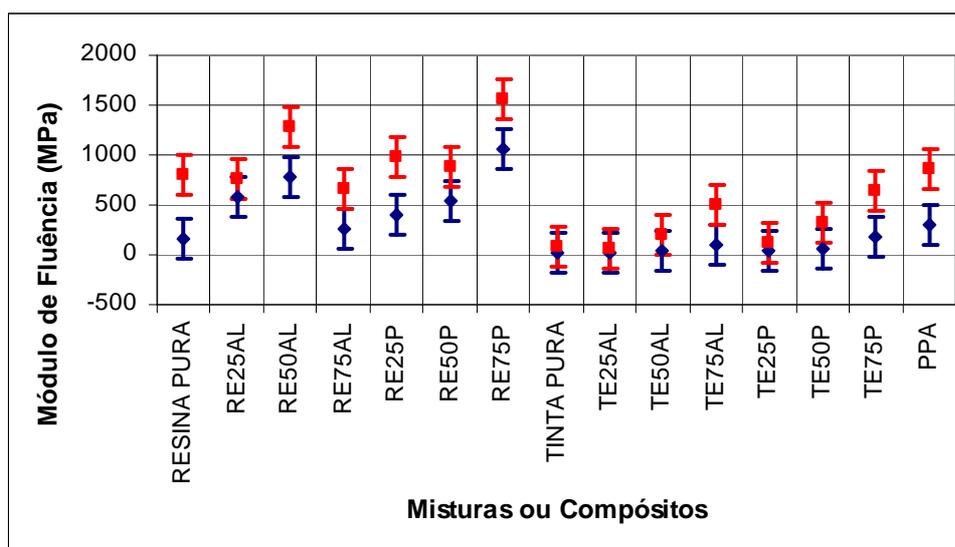


Figura 5.52 – Valores médios (pontos azuis) e máximos (pontos vermelhos) dos módulos de fluência de cada amostra; Linhas verticais em azul e vermelho são as barras de erro dos valores médios e máximos de módulo de fluência, respectivamente.

Como se pode observar, a mistura que apresentou maiores valores médio e máximo de módulo de fluência é a de resina epóxi com 75 % de porcelanato (1066,49 MPa e 1562,93 MPa respectivamente), o que concordou com os resultados obtidos para deformação máxima atingida, confirmando que esta amostra é a mais resistente à fluência entre as demais. Por outro lado, a amostra que apresentou menores valores médio e máximo desse módulo foi a de tinta epóxi com 25 % de alumina (20,41 MPa e 69,44 MPa respectivamente). Esta amostra também apresentou valores muito elevados de deformação máxima se comparada às demais, e, portanto, ela pode ser considerada de baixa resistência à fluência.

A amostra de tinta epóxi pura apresentou valores de módulo de fluência muito baixos também. Este fato, juntamente com sua baixa deformação máxima, a torna pouco resistente à fluência.

A amostra de resina epóxi com 50% de alumina apresentou valores relativamente altos de módulo de fluência e também atingiu valores baixos de deformação máxima. Ela pode ser considerada de alta resistência à fluência.

A amostra de PPA apresentou valores de módulo de fluência inferiores aos das amostras RE25AL, RE50AL, RE25P, RE50Pe RE75P. Sendo assim, pode-se dizer que o revestimento comercial é menos resistente à fluência que a maioria dos compósitos a base de resina epóxi. Se for comparado aos resultados de deformação máxima, conclui-se que o revestimento comercial é menos resistente à fluência que os compósitos de resina epóxi com baixo a médio teores de alumina e com médio a alto teores de porcelanato. Vale ressaltar que estes resultados são de grande significado, uma vez que a meta deste estudo é processar os compósitos, visando à substituição dos revestimentos comerciais, face à vantagem econômica que esta substituição proporcionará ao consumidor do produto, que terá seus gastos muito diminuídos devido ao fato da matéria-prima empregada e do processamento do produto serem baratos.

#### 5.2.4 – Taxa Mínima de Fluência

Para obter a taxa mínima de fluência das amostras, calculou-se o coeficiente angular da região secundária (linear) da curva Deformação versus Tempo de cada amostra. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 5.3 a seguir.

Tabela 5.3 – Taxa mínima de fluência de cada amostra

| Amostra     | Taxa Mínima de Fluência (1/s) |
|-------------|-------------------------------|
| PLASTEEL    | 60,0E-08                      |
| RESINA PURA | 30,0E-08                      |
| RE25AL      | 10,0E-08                      |
| RE50AL      | 20,0E-08                      |
| RE75AL      | 400,0E-08                     |
| RE25P       | 60,0E-08                      |
| RE50P       | 3,0E-08                       |
| RE75P       | 10,0E-08                      |
| TINTA PURA  | 600,0E-08                     |
| TE25AL      | 3000,0E-08                    |
| TE50AL      | 300,0E-08                     |
| TE75AL      | 500,0E-08                     |
| TE25P       | 600,0E-08                     |
| TE50P       | 40,0E-08                      |
| TE75P       | 700,0E-08                     |

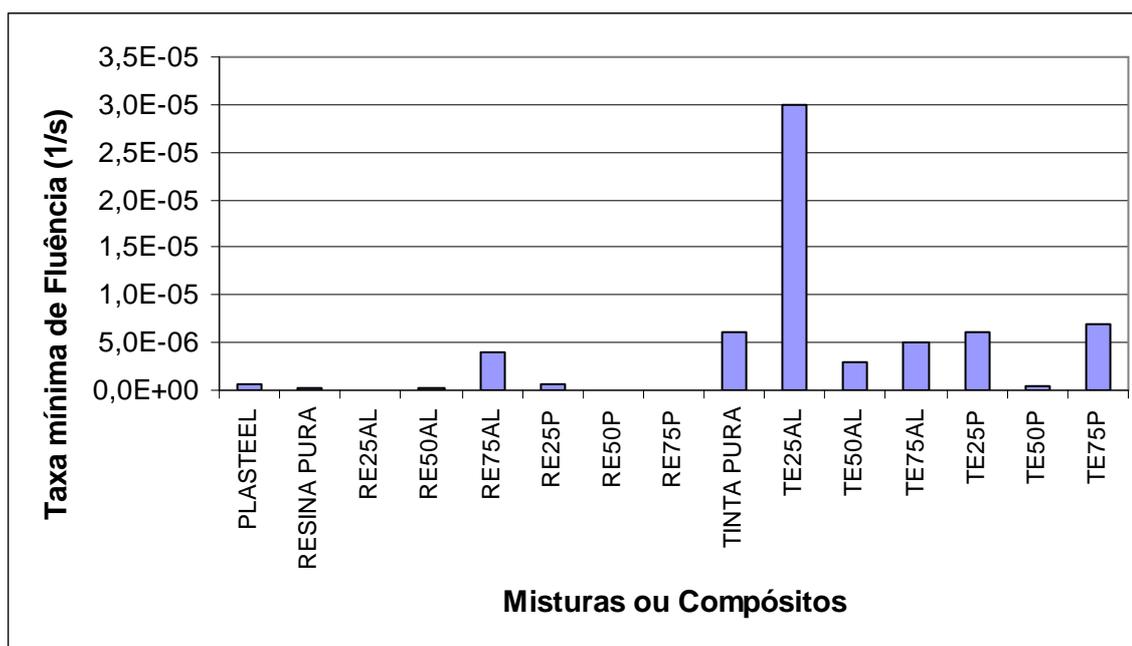


Figura 5.53 – Taxa mínima de fluência de cada mistura

Como o valor da taxa mínima de fluência para a amostra de tinta epóxi com 25 % de alumina foi muito maior que das demais amostras, isto impediu uma melhor observação do gráfico acima devido ao fato da escala obtida não possuir resolução suficiente para que os valores menores fossem observados. Por isso foi montado um novo gráfico, dessa vez retirando-se a amostra TE25AL (tinta epóxi com 25% de alumina) que apresentou um valor de taxa mínima de fluência muito superior ao das

demais amostras, para se ter uma noção melhor da taxa mínima de fluência das amostras restantes.

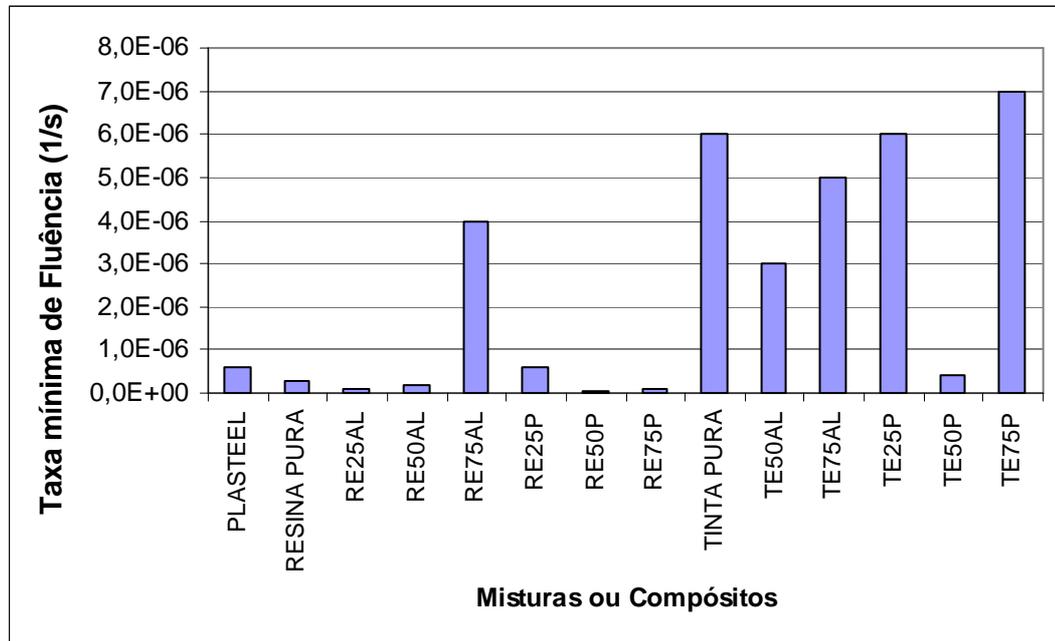


Figura 5.54 – Taxa mínima de fluência para todas as misturas, exceto a TE25AL

As amostras que apresentaram um menor valor de taxa mínima de fluência foram as de resina epóxi com 50 % de porcelanato (com  $3 \times 10^{-8} \text{ s}^{-1}$ ), resina epóxi com 25% de alumina e resina epóxi com 75 % de porcelanato (ambas com  $10 \times 10^{-8} \text{ s}^{-1}$ ). Isto significa que estas amostras se deformam com menor rapidez ao longo do tempo do ensaio de fluência.

A amostra de tinta epóxi com 25 % de alumina foi a que apresentou um valor maior de taxa mínima de fluência ( $3000 \times 10^{-8} \text{ s}^{-1}$ ), seguida pelas de tinta epóxi com 75 % de porcelanato ( $700 \times 10^{-8} \text{ s}^{-1}$ ), tinta epóxi pura e tinta epóxi com 25 % de porcelanato (ambas com  $600 \times 10^{-8} \text{ s}^{-1}$ ). Sendo assim, estas amostras são as que deformam com uma maior rapidez ao longo do tempo.

Em relação à resina epóxi, pode-se afirmar que, com a adição de 25% e 50% de alumina, a taxa mínima de fluência diminuiu, enquanto que com a adição de 75% desse pó, a taxa mínima de fluência teve um aumento considerável. Mais uma vez, a formação de aglomerados de partículas no compósito pode ter sido a causa desse aumento, uma vez que o pó de alumina é muito fino, sendo difícil de se misturar homogeneamente à matriz quando a proporção de pó é elevada.

Já com a adição de porcelanato em pó à matriz de resina epóxi, houve diminuição na taxa mínima de fluência somente para percentuais de 50% e 75%. A mistura de porcelanato na proporção de 25% aumentou a taxa mínima de fluência, ou seja, a quantidade adicionada não foi suficiente para diminuir a velocidade de deformação da amostra. Dessa forma, a adição de porcelanato em proporções de 50% e 75% à resina epóxi provoca uma deformação mais lenta da amostra ao longo do tempo.

Para o caso da tinta epóxi, houve diminuição na taxa mínima de fluência somente com a adição de 50% e 75% de alumina, e 50% de porcelanato. Para as demais misturas, o valor dessa taxa não se alterou, ou teve um pequeno aumento, com exceção da adição de 25% de alumina, que teve um aumento muito acentuado nessa taxa. Suspeita-se que o motivo para esse acontecimento foi que o pequeno tamanho da partícula de alumina acabou por gerar regiões sem interpenetrações na matriz (tinta epóxi). Sendo assim, a deformação da amostra foi mais acelerada.

#### 5.2.5 – Deformação Inicial Total

Os valores obtidos para a deformação inicial total de cada amostra são apresentados na tabela 5.4 e na figura 5.55 a seguir.

Tabela 5.4 – Deformação Inicial Total das Amostras

| <b>Amostra</b> | <b><math>\epsilon_0</math> (<math>\mu\epsilon</math>)</b> |
|----------------|---|
| PLASTEEL       | 7200  |
| RESINA PURA    | 12000   |
| RE25AL         | 20400   |
| RE50AL         | 14000   |
| RE75AL         | 14000   |
| RE25P          | 13000   |
| RE50P          | 14000   |
| RE75P          | 8600  |
| TINTA PURA     | 22000   |
| TE25AL         | 28000   |
| TE50AL         | 8000  |
| TE75AL         | 6000  |
| TE25P          | 30000   |
| TE50P          | 12000   |
| TE75P          | 4000  |

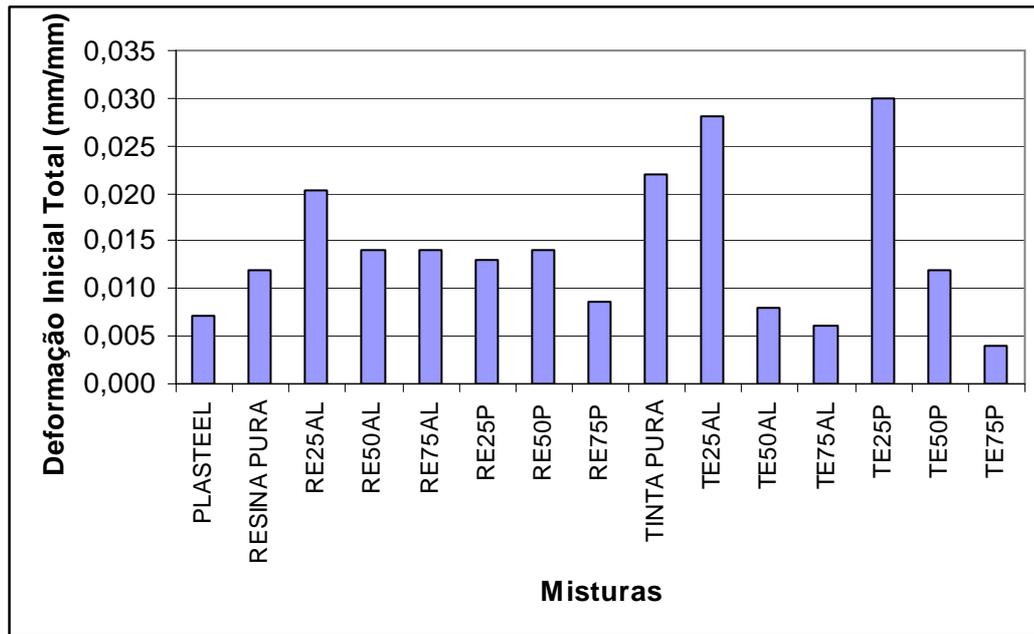


Figura 5.55 – Gráfico dos valores de deformação inicial total de todas as amostras

Pôde-se observar na Tabela 5.4 e na Figura 5.55 que, para o caso da resina epóxi, houve um aumento significativo no valor da deformação inicial total quando a ela foram adicionados 25% de alumina, e um aumento discreto no valor de  $\epsilon_0$  quando foram adicionados 50% e 75% de alumina e também 25% e 50% de porcelanato. Pode-se concluir então que nesses compósitos, as partículas adicionadas não tiveram boa interação com a matriz a ponto de tornar o material mais resistente à fluência. Já com a adição de 75% de porcelanato, houve uma diminuição no valor de  $\epsilon_0$ . Pode-se dizer então que somente com uma adição de porcelanato em grandes proporções à resina epóxi, o material obtido apresentou boa interação partícula / matriz.

Para a tinta epóxi, houve um aumento no valor de  $\epsilon_0$  quando a ela foram adicionados 25% de alumina e 25% de porcelanato. Com as adições de 50% e 75% tanto de alumina quanto de porcelanato, houve uma diminuição no valor de  $\epsilon_0$ . Portanto, os pós adicionados somente tornam o compósito obtido com a tinta mais resistentes à fluência para percentuais médios e altos de adições.

Em relação ao PPA, notou-se que as misturas de tinta epóxi com 75% tanto de alumina quanto de porcelanato apresentaram valores de deformação inicial total inferiores. Dessa forma, a interação partícula / matriz somente é melhor que a do

revestimento comercial para o caso da tinta epóxi misturada a elevados percentuais de carga.

### 5.3 - Medição da Rugosidade Superficial

Após serem feitas as medidas das rugosidades das várias amostras antes e depois delas serem revestidas, foram calculadas as médias da rugosidade superficial de cada lote de amostras antes e depois de elas serem submetidas ao revestimento composto à base de tinta epóxi.

Tabela 5.5 – Rugosidade Superficial antes e depois das amostras serem revestidas

| Revestimento | Rugosidade média da amostra nua ( $\mu\text{m}$ ) | Rugosidade média após Revestimento ( $\mu\text{m}$ ) |
|--------------|---|--|
| PPA          | 1,42  | 0,62   |
| TINTA PURA   | 1,67  | 0,67   |
| TE10P        | 1,34  | 1,93   |
| TE20P        | 1,38  | 3,12   |
| TE30P        | 1,38  | 4,04   |
| TE40P        | 1,06  | 5,14   |
| TE50P        | 1,27  | 4,55   |
| TE10AL       | 1,66  | 2,77   |
| TE20AL       | 1,87  | 2,64   |
| TE30AL       | 1,62  | 1,87   |
| TE40AL       | 1,66  | 2,68   |
| TE50AL       | 2,04  | 3,69   |

A partir daí foi feito um gráfico demonstrando como varia a rugosidade das amostras revestidas com tinta epóxi carregada com alumina e porcelanato. Isso foi feito calculando-se uma Rugosidade Adimensional, onde ela representa a razão entre o valor da rugosidade medida após o revestimento e o valor da rugosidade medida antes do revestimento (valor de referência).

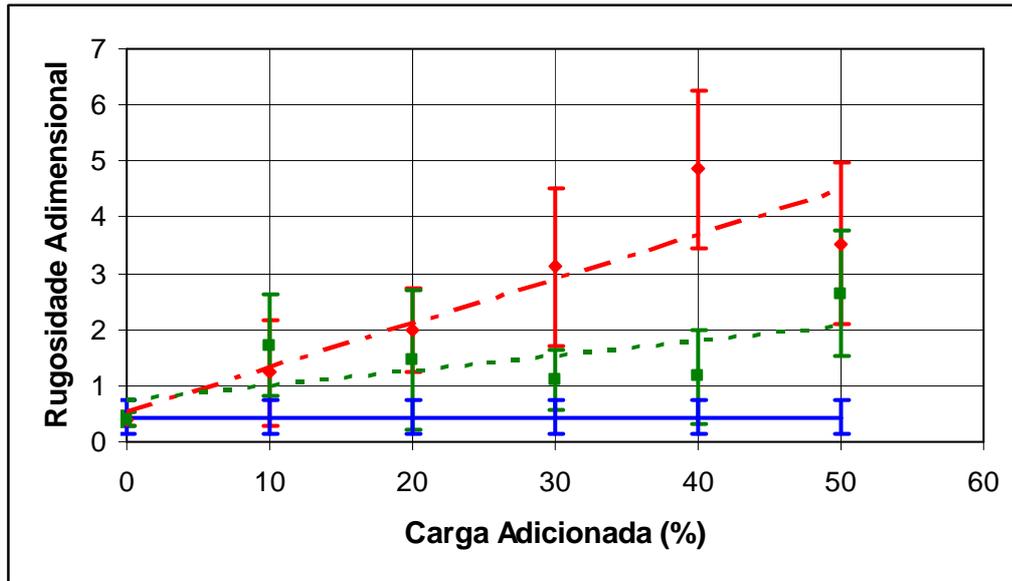


Figura 5.56 - Comparação da rugosidade adimensional com o aumento de carga

Na figura 5.56, os pontos em vermelho representam o efeito da adição de porcelanato à tinta epóxi, enquanto que os pontos em verde representam o efeito da adição de alumina à tinta epóxi. A linha em azul representa o efeito da PPA, enquanto que a linha tracejada vermelha é a linha de tendência referente ao porcelanato e a linha tracejada verde é a linha de tendência referente à alumina. As linhas verticais em vermelho e verde representam as barras de erro dos valores referentes ao porcelanato e à alumina, respectivamente.

De posse da Tabela 5.5 e da figura 5.56, pode-se observar que apenas as amostras revestidas com a PPA e tinta epóxi apresentaram uma diminuição da rugosidade após o revestimento, enquanto as amostras revestidas com tinta epóxi carregadas com alumina e porcelanato mostraram um aumento significativo na rugosidade. Além disso, observa-se que a rugosidade superficial das amostras aumenta com o aumento da quantidade de carga adicionada. Isto quer dizer que as partículas adicionadas provocaram esse aumento na rugosidade, já que pós de granulometria fina não se misturam bem à tinta devido ao baixo grau de molhabilidade. Sendo assim, há uma tendência em se formarem aglomerados, surgindo então regiões mais salientes no revestimento obtido.

Também foi observado que as amostras carregadas com partículas de porcelanato experimentaram um aumento mais significativo na rugosidade. Isso acontece devido ao fato de que as partículas de porcelanato eram visivelmente

maiores do que as partículas de alumina, sendo esse tamanho na faixa de 20  $\mu\text{m}$  para o porcelanato e de 3  $\mu\text{m}$  para a alumina. Além disso, o formato das partículas de porcelanato era mais irregular que as de alumina, e as bordas vivas destas partículas aumentam a rugosidade do revestimento.

Partindo desses resultados, foi calculado para cada lote o valor de sua rugosidade relativa média, para avaliar a influência deste aumento de rugosidade superficial no coeficiente de atrito.

Tabela 5.6 - Valor da Rugosidade Relativa Média de cada lote de amostras

| <b>Revestimento</b> | <b>Rugosidade Relativa Média (<math>R_r</math>)</b> |
|---------------------|---|
| PPA                 | 5,06E-07  |
| TINTA PURA          | 4,59E-07  |
| TE10P               | 1,58E-06  |
| TE20P               | 2,64E-06  |
| TE30P               | 3,31E-06  |
| TE40P               | 4,22E-06  |
| TE50P               | 3,73E-06  |
| TE10AL              | 2,28E-06  |
| TE20AL              | 2,17E-06  |
| TE30AL              | 1,53E-06  |
| TE40AL              | 2,20E-06  |
| TE50AL              | 3,03 E-06   |

Com estes valores e com número de Reynolds, ambos parâmetros foram empregados no diagrama de Moody (Fox & McDonald, 2001).

Tabela 5.7 – Rugosidade Relativa das Amostras Antes e Após Revestimento  
Para Diâmetro de 48”

| Amostra    | D( $\mu\text{m}$ ) | Ra ( $\mu\text{m}$ )<br>antes | Ra ( $\mu\text{m}$ )<br>após | Ra/D Antes | Ra/D Após |
|------------|--------------------|-------------------------------|------------------------------|------------|-----------|
| PPA        | 1219200            | 1,42                          | 0,62                         | 1,16E-06   | 5,09E-07  |
| TINTA PURA | 1219200            | 1,67                          | 0,67                         | 1,37E-04   | 5,50E-07  |
| TE10P      | 1219200            | 1,34                          | 1,93                         | 1,10E-06   | 1,58E-06  |
| TE20P      | 1219200            | 1,38                          | 3,12                         | 1,13E-06   | 2,56E-06  |
| TE30P      | 1219200            | 1,38                          | 4,04                         | 1,13E-06   | 3,31E-06  |
| TE40P      | 1219200            | 1,06                          | 5,14                         | 8,69E-07   | 4,22E-06  |
| TE50P      | 1219200            | 1,27                          | 4,55                         | 1,04E-06   | 3,73E-06  |
| TE10AL     | 1219200            | 1,66                          | 2,77                         | 1,36E-06   | 2,27E-06  |
| TE20AL     | 1219200            | 1,87                          | 2,64                         | 1,53E-06   | 2,17E-06  |
| TE30AL     | 1219200            | 1,62                          | 1,87                         | 1,33E-06   | 1,53E-06  |
| TE40AL     | 1219200            | 1,66                          | 2,68                         | 1,36E-06   | 2,20E-06  |
| TE50AL     | 1219200            | 2,04                          | 3,69                         | 1,67E-06   | 3,03E-06  |

Para os valores de rugosidade relativa obtidos, tanto antes do revestimento quanto após ele, os fatores de atrito encontrados no diagrama de Moody para um diâmetro típico de 1,22 m ficaram na faixa de 0,016, ou seja, o comportamento é como o de um tubo liso.

Podê-se então observar que apesar da rugosidade superficial aumentar após o revestimento com tinta epóxi carregado com partículas de alumina e porcelanato, este aumento não foi capaz de alterar o fator de atrito. Isto quer dizer que, mesmo aumentando a rugosidade da amostra, topograficamente, o revestimento ficou pouco rugoso, a ponto de não interferir no valor do fator de atrito. Isto é favorável, pois foi mantido o comportamento como um tubo liso, onde se tem o menor coeficiente de atrito possível.

Caso o diâmetro utilizado nos cálculos fosse reduzido para 4 polegadas (0,10 m), os resultados obtidos para rugosidade relativa antes e após o revestimento seriam:

Tabela 5.8 - Rugosidade Relativa das Amostras Antes e Após Revestimento  
Para Diâmetro de 4"

| Amostra    | D( $\mu\text{m}$ ) | Ra ( $\mu\text{m}$ ) antes | Ra ( $\mu\text{m}$ ) após | Ra/D Antes | Ra/D Após |
|------------|--------------------|----------------------------|---------------------------|------------|-----------|
| PPA        | 101600             | 1,42                       | 0,62                      | 1,40E-05   | 6,10E-06  |
| TINTA PURA | 101600             | 1,67                       | 0,67                      | 1,64E-05   | 6,59E-06  |
| TE10P      | 101600             | 1,34                       | 1,93                      | 1,32E-05   | 1,90E-05  |
| TE20P      | 101600             | 1,38                       | 3,12                      | 1,36E-05   | 3,07E-05  |
| TE30P      | 101600             | 1,38                       | 4,04                      | 1,36E-05   | 3,98E-05  |
| TE40P      | 101600             | 1,06                       | 5,14                      | 1,04E-05   | 5,06E-05  |
| TE50P      | 101600             | 1,27                       | 4,55                      | 1,25E-05   | 4,48E-05  |
| TE10AL     | 101600             | 1,66                       | 2,77                      | 1,63E-05   | 2,73E-05  |
| TE20AL     | 101600             | 1,87                       | 2,64                      | 1,84E-05   | 2,60E-05  |
| TE30AL     | 101600             | 1,62                       | 1,87                      | 1,59E-05   | 1,84E-05  |
| TE40AL     | 101600             | 1,66                       | 2,68                      | 1,63E-05   | 2,64E-05  |
| TE50AL     | 101600             | 2,04                       | 3,69                      | 2,01E-05   | 3,63E-05  |

Pode-se observar que novamente não houve muita alteração nos valores de rugosidade relativa obtidos antes e após o revestimento, e os fatores de atrito encontrados no diagrama de Moody ficaram na faixa de 0,0268, ou seja, o comportamento continua sendo como o de um tubo liso.

Sendo assim, no tocante à rugosidade superficial, todas as amostras se mostraram adequadas à aplicação como revestimento antierosivo, pois não provocaram um aumento no fator de atrito.

#### 5.4 – Medição da Espessura de Camada

Após ter sido feita a medição de espessura em vários pontos de cada amostra, obteve-se a média de cada lote.

Tabela 5.9 – Medida da Espessura de Camada Média após o revestimento

| <b>Tipo de Revestimento</b> | <b>Espessura Média 1ª camada (µm)</b> |
|-----------------------------|---------------------------------------|
| PPA                         | 339                                   |
| TINTA PURA                  | 113                                   |
| TE10P                       | 146                                   |
| TE20P                       | 197                                   |
| TE30P                       | 184                                   |
| TE40P                       | 234                                   |
| TE50P                       | 261                                   |
| TE10AL                      | 127                                   |
| TE20AL                      | 126                                   |
| TE30AL                      | 120                                   |
| TE40AL                      | 157                                   |
| TE50AL                      | 245                                   |

Observou-se que, dentre todos os lotes, apenas o lote da PPA, tinta epóxi + 50% porcelanato e tinta epóxi + 50% alumina se enquadraram na espessura mínima recomendada para atmosferas altamente agressivas, que é de 240 a 260 µm, segundo a norma PETROBRÁS N-1195 (1999). Portanto, os revestimentos que ficaram com valores de espessura abaixo da Norma acima devem ser aplicados em duas ou mais camadas, para se assegurar a sua boa aderência ao substrato.

Também pode ser observado que a PPA obteve a camada mais espessa, como mostrado na Tabela 5.9, e, além disso, os revestimentos que mais se aproximaram dela foram os que tinham 50% em peso de carga de porcelanato e alumina. Mesmo assim, eles apresentaram, comparando-se com a PPA, uma redução de espessura em torno de 23%, para o lote carregado com 50% em peso de porcelanato e cerca de 27,7%, para o lote carregado com 50% em peso de alumina. Isto é favorável, pois caso o revestimento aplicado tenha uma espessura muito elevada, pode ocorrer alterações nas dimensões da peça onde ele será aplicado, gerando diversos problemas, tais como dificuldade de encaixe e diminuição da área útil. Portanto, no que tange à espessura de camada do revestimento, aqueles que apresentaram melhores resultados foram a tinta epóxi com 50% tanto de porcelanato quanto de alumina, uma vez que, somente com uma camada de revestimento, consegue-se obter uma espessura ideal, segundo a Norma supracitada. Assim evitar-se-iam gastos maiores com a aplicação de uma segunda camada.

## CAPÍTULO 6

### 6 – CONCLUSÕES

#### 6.1 - Perda por Abrasão

- A combinação de matriz de resina epóxi, com uma carga de 75% de porcelanato revelou-se a de menor perda de massa entre todas as analisadas.
- A mistura feita de tinta epóxi e carga de 25% de alumina revelou-se a de maior perda de massa de todas as estudadas.
- A maior parte das misturas apresentou uma força tangencial de resistência ao movimento do abrasímetro relativamente baixa. A mistura feita de tinta epóxi e 75% de alumina gerou a maior força, além de uma baixa perda de massa (7,05%). A resina epóxi pura foi a que menos gerou resistência ao movimento, porém, sua perda de massa também foi baixa (8,63 %).
- Em comparação a PPA, pode-se dizer que as amostras de resina epóxi com 75% de porcelanato apresentaram uma redução na perda de massa de 95,84%. Este fato, juntamente com o baixo custo de sua produção, a torna uma forte candidata a substituta do revestimento comercial importado.

#### 6.2 – Fluência

- A combinação de matriz de resina epóxi, com uma carga de 75% de porcelanato apresentou o maior Módulo de Fluência e menor taxa mínima de fluência de todas.
- As misturas contendo tinta epóxi como matriz apresentaram os menores Módulos de Fluência e maiores taxas mínimas de fluência. Isto indica que elas poderiam ser utilizadas como revestimento protetor em regiões onde estão presentes processos erosivos de grau leve.
- Houve diminuição no valor de deformação inicial total para a resina epóxi somente quando foram adicionados 75% de porcelanato à mesma. Para as demais misturas, o valor de  $\epsilon_0$  aumentou discretamente. Dessa forma,

conclui-se que o valor da deformação inicial total da resina epóxi não é, de maneira geral, afetado pela adição de partículas a ela, já que a mesma já possui uma resistência à deformação relevante.

- Houve um aumento no valor de  $\varepsilon_0$  para a tinta epóxi quando adicionou-se alumina e porcelanato na proporção de 25%. Para as demais misturas, o valor de  $\varepsilon_0$  diminuiu significativamente. Isto indica que a adição de partículas à matriz de tinta epóxi tornou o compósito obtido mais resistente a uma deformação inicial quando a mesma é solicitada através de uma carga.
- A PPA se apresentou menos resistente a uma deformação inicial imposta por uma carga que as misturas de tinta epóxi com 75% tanto de alumina quanto de porcelanato.
- Dentre todas as amostras, aquelas com pouco ou nenhum teor de carga adicionada, de maneira geral, obtiveram menores resistências à fluência.
- A amostra de resina epóxi com 75% de porcelanato é a melhor indicada para aplicações onde há solicitações mecânicas sob carregamento constante, uma vez que ela apresentou melhores resultados de deformação máxima, módulo de fluência e taxa mínima de fluência. Além disso, esta amostra também obteve o melhor desempenho de abrasão, sendo, portanto, o melhor material para ser utilizado como revestimento anti-erosivo em dutos.

### 6.3 - Rugosidade e Espessura de Camada

- As amostras revestidas com a PPA e a tinta epóxi pura apresentaram redução na rugosidade superficial após a aplicação do revestimento.
- Amostras revestidas com tinta epóxi carregadas com alumina e porcelanato apresentaram um aumento significativo na rugosidade, em relação ao valor de sua rugosidade nua.
- Conforme esperado, o aumento na carga de particulados em cada mistura ocasionou em aumento da rugosidade superficial. Além disso, as amostras carregadas com porcelanato apresentaram um aumento mais significativo na sua rugosidade, uma vez que o tamanho das partículas de porcelanato empregadas neste estudo foi de 20  $\mu\text{m}$ , muito maiores que o das partículas de alumina (3  $\mu\text{m}$ ).

- Para dutos com tamanhos de diâmetro entre 0,1016 m e 1,2192 m, os valores de rugosidade apresentados não aumentam as perdas de carga no bombeamento de fluidos pelas linhas, já que não houve alteração nos valores de coeficiente de atrito após o revestimento.
- O PPA ocasionou o maior aumento de espessura de camada de proteção. A tinta epóxi pura foi a que apresentou a menor espessura de camada entre todas as amostras analisadas.
- De maneira geral, todas as amostras apresentaram resultados de rugosidade adequados para aplicações em revestimentos, uma vez que não afetaram o fator de atrito. E em relação à espessura de camada, aquelas que apresentaram valores adequados a essa aplicação foram a tinta epóxi com 50% de alumina e com 50% de porcelanato.

#### **6.4 – Sugestões para Trabalhos Futuros**

- Realizar ensaios de DMTA (análise termodinâmico-mecânica) nos compósitos obtidos a fim de se obter suas propriedades térmicas.
- Analisar através de microscopia eletrônica de varredura a superfície das amostras após o ensaio de abrasão, com o intuito de verificar se a matriz se desgastou antes das partículas de carga adicionadas.
- Realizar ensaios de tração nas amostras antes do ensaio de fluência, para se ter uma noção mais precisa da carga utilizada neste último ensaio.
- Repetir os ensaios de fluência, mas com variação de temperatura, para se poder prever o comportamento das misturas estudadas em situações de aplicação em temperaturas elevadas. Além disso, poder-se-ia prever o comportamento do material em um período longo, através da extrapolação das características de fluência para as suas condições de operação.
- Testar um protótipo do revestimento proposto em escala industrial.
- Desenvolver um método de mistura de partículas finas com resinas de maneira que não haja formação de aglomerados.

## CAPÍTULO 7

### 7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aigueira, R.B. e Filgueira, M. (2006) Mecanismo de Resistência à Abrasão de Compósitos à Base de Poliéster-SiC para Uso em Coroas de Polimento de Rochas Ornamentais. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, 16(3):187-192.

Agência USP de Notícias – Método mais preciso para prever falhas em dutos. <http://www.usp.br/agen/rede813.htm> em 11/04/06.

Agostinho, O.L., Rodrigues, A.C.S. e Lirani, J. (1977) *Tolerâncias, Ajustes, Desvios e Análise de Dimensões*. 8ª Reimpressão (2005), Editora Edgard Blücher LTDA., São Paulo, 295p.

Amaral, T.P., Barra, G.M.O., Barcia, F.L. e Soares, B.G. (2001) Estudo das Propriedades de Compósitos de Polianilina e Resina Epoxídica. *Polímeros*, 11(3):149-157.

Ashby, M.F. e Jones, D.R.H. (1994) *Engineering Materials 2*. Pergamon Press, Oxford, Reino Unido.

Associação Brasileira de Corrosão – ABRACO. [www.abraco.org.br/corros17.htm](http://www.abraco.org.br/corros17.htm) em 14/05/2006.

ASTM D 638-00 Standard Test Methods for Tensile Properties of Plastics.

Bagnato, O.R. (2002) *Propriedades Mecânicas de Juntas AlSi12/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Soldadas por Difusão*. Tese de Doutorado, Campinas, SP, UNICAMP, 231 p.

Brooks, K. S. A. (1987) *World Directory and Handbook of Hard Materials*. 4. ed., Engineers Digest and International Carbide Data.

Callister, W.D. (2000) *Materials Science and Engineering – An Introduction*. John Wiley & Sons Ed., 5. ed., 871p.

Cambuzzi, A.; Rossi S.; Deflorian, F. (2004) *Redução das propriedades protetoras dos revestimentos orgânicos produzidas por partículas abrasivas*. Tese de Doutorado. Universidade de Trento-Itália, p.1-5.

Cavalcante, P.M.T., Dondi, M., Guarini, G., Melandri, C., Raimondo, M., Zanelli, C. e Almendra, E.R. (2003) Fatores Chaves na Resistência à Abrasão de Pisos de Grês Porcelanato. *Cerâmica Industrial*, 8:21-26.

D'Almeida. J.R.M., Menezes, G.W. e Monteiro, S.N. (2003) Ageing of the DGEBA/TETA Epoxy System With Off-Stoichiometric Compositions. *Materials Research*, 6(3):415-420.

Dias, L.L., Quinteiro, E. e Boschi, A.O. (2000) Efeitos da Adição de Alumina, Mulita, Titânia e Zircônia sobre a Resistência ao Desgaste de Vidrados Cerâmicos. *Cerâmica Industrial*, 5:19-24.

El-Tayeb, N.S. e Gadelrab, R.M. (1996) Friction and Wear Properties of E-glass Fiber Reinforced Epoxy Composites under Different Sliding Contact Conditions. *Wear*, 192:112-117.

Engineered Materials Handbook, Volume 4, Ceramics and Glasses, *ASM International*, 1991.

Falla, F.S., Larini, C. , Le Roux , G.A.G., Quina, F.H., Moro, L.F.L. e Nascimento, C.A.O. (2005) *Caracterização do petróleo cru por NIR*, Rio de Janeiro, 1p.

Fazenda, J.M.R. (2005) *Tintas e Vernizes – Ciência e Tecnologia*. Ed. Edgard Blucher, 3. ed., São Paulo: 1044p.

Ferreira, M., Camargo Jr., S.S., Barbosa, B.M., Gomes, R.V.B., Lachtermacher, M.G. e Quintela, J. (2002) Propriedades Mecânicas de Epóxis Utilizados no Recobrimento Interno de Oleodutos e Gasodutos. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, 12(3):180-187.

Filho, O.A. (2003) Tintas Cerâmicas. *Cerâmica Industrial*, 8(5/6):40-43.

Fox, R. W., McDonald, A.T. (2001) *Introdução à Mecânica dos Fluidos*. LTC Editora, 5. ed., Rio de Janeiro: p. 227-241.

Freire, M.N. (2007) *Uso de Matérias-Primas Argilosas do Estado do Rio de Janeiro em Massas Cerâmicas para Porcelanato: Formulação, Propriedades Físicas e Microestrutura*. Tese de Doutorado, Campos dos Goytacazes, RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense – UENF, 306p.

Garcia, A., Spim, J. A. e Santos, C. A. (2000) *Ensaio dos Materiais*. LTC Editora, 247p.

Gemelli, E. (2001) *Corrosão de Materiais Metálicos e sua Caracterização*. LTC Editora, 183p.

Gentil, V. (1996) *Corrosão*. Livros Técnicos e Científicos Editora. 3. ed., Rio de Janeiro: 345p.

Giles, R.V., Evet, J.B., Liu C. (1998) *Mecânica dos Fluidos e Hidráulica*. Makron Books, 2. ed., São Paulo: p. 174-180.

Gerenciamento de riscos.  
<http://www.cetesb.sp.gov.br/Emergencia/acidentes/dutos/introducao.asp> em  
11/04/06.

Gnecco, C., Mariano, R. e Fernandes, F. (2003) *Tratamento de Superfície e Pintura, Série Manual de Construção em Aço*, IBS / SBCA, Rio de Janeiro: 94p.

Gonçalves, A., Almeida, S.F.M. e Neto, F.L. (2001) Comportamento de Cilindros de Carbono/Epóxi Submetidos a Cargas Compressivas Axiais, *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, Vol.11, nº2, pp94-101.

Guedes, R.M. (2007) Durability of Polymer Matrix Composites: Viscoelastic Effect on Static and Fatigue Loading. *Composites Science and Technology*, 67:2574-2583.

Gupta, N.K. e Abbas, H. (2000) Lateral Collapse of Composite Cylindrical Tubes Between Flat Platens. *International Journal of Impact Engineering*, 24:329-346.

Hanemann, T. (2007) Influence of Particle Properties on the Viscosity of Polymer-Alumina Composites. *Ceramics International*, doi: 10.1016/j.ceramint.2007.08.007.

Heck, C. (1996) Grês Porcelanato. *Cerâmica Industrial*, 01:21-24.

Hussaim, M., Oku, Y., Nakahira, A. e Niihara, K. (1996) Effects of Wet Ball-Milling on Particle Dispersion and Mechanical Properties of Particulate Epoxy Composites. *Materials Letters*, 26:177-184.

International Protective Coatings - Preparação da Superfície.  
[http://www.international-pc.com/pc/pds/pre\\_pt.pdf](http://www.international-pc.com/pc/pds/pre_pt.pdf) em 09/05/06

Jordano, J., Maluf, V. (2005). *Revista Inpra Latina*, n.4, ago/05, p. 25–41.

Kang, K.J. e Mercer, C. (2007) Creep Properties of a Thermally Grown Alumina. *Materials Science and Engineering A*, doi: 10.1016/j.msea.2007.05.114.

Karelin, K.Y., Denisov, A.I. e Wu, Y.L. (2007) Fundamentals of Hydroabrasive Erosion Theory, Vol. 2, *Imperial College Press*.  
[http://books.google.com.br/books?id=MJaQxuQpOewC&printsec=frontcover&dq=abrasive+erosion+and+corrosion&sig=T1VIKX4S5QVPOIC\\_ClvxrT1H1Eg#PPP1,M1](http://books.google.com.br/books?id=MJaQxuQpOewC&printsec=frontcover&dq=abrasive+erosion+and+corrosion&sig=T1VIKX4S5QVPOIC_ClvxrT1H1Eg#PPP1,M1) em 08/08/2007.

Khashaba, U.A., Sallam, H.E.M., Al-Shorbagy, A.E. e Seif, M.A. (2006) Effect of Washer Size and Tightening Torque on the Performance of Bolted Joints in Composite Structures. *Composite Structures*, 73:310-317.

Kortov, V.S., Ermakov, A.B., Zatsepin, A.F. e Nikiforov, S.V. (2007) Luminescence Properties of Nanostructured Alumina Ceramic. *Radiation Measurements*, doi:10.1016/j.radmeas.2007.10.008.

Kubernach, K. e Miller, B. (1997) Low-VOC Ceramic Epoxy Coating for High Abrasion Use on Aircraft, *Metal Finishing*, p. 20-23.

Kuo, D.H., Chang, C.C., Su, T.Y., Wang, W.K e Lin, B.Y. (2004) Dielectric Properties of Three Ceramic/epoxy Composites. *Materials Chemistry and Physics*, 85:201-206.

Lazarevic, Z.Z., Miskovic-Stankovic, V.B., Kacarevic-Popovic, Z. e Drazic, D.M. (2005) The Study of Corrosion Stability of Organic Epoxy Protective Coatings on Aluminium and Modified Aluminium Surafces. *J. Braz. Chem. Soc.*, 16(1):98-102.

Li, Z. e Huang, K. (2007) Optical Properties of Alumina Membranes Prepared by Anodic Oxidation Process. *Journal of Luminescence*, 127:435-440.

Llorenz, F.G. (2000) Matérias-Primas Fundentes Para a Fabricação de Grês Porcelanato. *Cerâmica e Informação* 9, Seção Matérias-Primas, Março/Abril, p. 51-55.

Luo, S. Y., Liu, Y. C., Chou, C. C. e Chen, T. C. (2001) Performance of Powder Filled Resin-Bonded Diamond Wheels in the Vertical Dry Grinding of Tungsten Carbide. *Journal of Materials Processing Technology*, 118:329-336.

Luo, S., Zheng, Y, Li, J. e Ke, W. (2003) Effect of Curing Degree and Fillers on Slurry Erosion Behaviour of Fusion-bonded Epoxy Powder Coatings. *Wear*, 254:292-297.

Mano, E. B. (1991) *Polímeros Como Materiais de Engenharia*. Editora Edgard Blücher LTDA, 197p.

Mendonça, R.M.L., Piratelli-Filho, A. e Levy-Neto, F. (2007) Compósitos Particulados para Aplicações em Engenharia de Precisão: Obtenção e Propriedades Mecânicas. [http:// www.unb.br/ft/enm/metro/papers/cobef1\\_03.pdf](http://www.unb.br/ft/enm/metro/papers/cobef1_03.pdf) em 28/11/2007.

Monteiro, S. N. (1990) *Materiais para Engenharia*. Edição Experimental, Departamento de Engenharia Metalúrgica, UFRJ, 303p.

Morais, W.A. e D'Almeida, J.R.M. (2003) Comparação do Comportamento à Flexão com Restrições à Deflexão de Placas de Compósitos de Matriz Polimérica Epoxídica em Função do Tipo de Fibra de Reforço. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, 13(3):181-187.

M'Peko, J.C., Spavieri Jr., D.L., Silva, C.L., Fortulan, C.A., Souza, D.P.F. e Souza, M.F. (2003) Electrical Properties of Zirconia-Alumina Composites. *Solid State Ionics*, 156:59-69.

Muraki, N., Matoba, N., Hirano, T. e Yoshikawa, M. (2002) Determination of Thermal Stress Distribution in a Model Microelectronic Device Encapsulated with Alumina Filled Epoxy Resin Using Fluorescence Spectroscopy. *Polymer*, 43:1277-1285.

NBR 13818 (1997) – *Ensaio para Qualificação das Características Físico-Químicas das Placas Cerâmicas*. ABNT, Rio de Janeiro: 78p.

Nunes, L.P., Evangelista, I.N.M. (1984) Abordagem Sistêmica da Pintura Industrial. *Anais do 11º Seminário Nacional de Corrosão*, Rio de Janeiro, ABRACO.

Nunes, L. P., Lobo, A. C. (1998) *Pintura Industrial na Proteção Anticorrosiva*. 2. ed., Interciência Editora, p. 44 - 59.

O'Brien, D.J., Mather, P.T. e White, S.R. (2001) Viscoelastic Properties of an Epoxy Resin During Cure. *Journal of Composite Materials*, 35(10):883-904.

Oliveira, A.P.N. (1998) Grês Porcelanato: Aspectos Mercadológicos e Tecnológicos. *Cerâmica Industrial*, 3(3):34-41.

Paiva, J.M.F., Mayer, S. e Rezende, M.C. (2005) Evaluation of Mechanical Properties of Four Different Carbon/Epoxy Composites Used in Aeronautical Field. *Materials Research*, 8(1):91-97.

PETROBRÁS N-1195 (1999) – Tinta Epóxi de Alta Espessura, Rev. G, Petrobrás, 13p.

Potter, M.C. & Wiggert, D.C. (2004) *Mecânica dos Fluidos*. Thomson Editora, Tradução da 3ª Edição Norte-Americana, p. 237-251.

Prehn, R., Hauptert, F. e Friedrich, K. (2005) Sliding Wear Performance of Polymer Composites Under Abrasive and Water Lubricated Condition for Pump Applications. *Wear*, 259:693-696.

Quintela, J.P.; Fragata, F.L.; Amorim, C.C.; Vieira, M.M.; Vieira, G.V. Fatores que Podem Implicar em Falhas Prematuras de Pintura Interna *In Situ* de Dutos. <http://www.abraco.org.br/24srepi.htm> em 10/01/2006.

Ramanathan, L. V. (1992) *Corrosão e seu Controle*. São Paulo, SP: Hemus Editora. pp.103–107.

Riella, H.G., Franjndlich, E.U.C. e Durazzo, M. (2002) Caracterização e Utilização de Fundentes em Massas Cerâmicas. *Cerâmica Industrial*, 7(3):33-36.

Rincón, J.M. e Romero, M. (2001) A Atual Expansão da Produção de Grês Porcelanato como Passo Prévio para a Produção de Revestimentos Cerâmicos Maciços. *Cerâmica Industrial*, 6(4):22-24.

Rossi, S., Deflorian, F., Fontanari, L., Cambuzzi, A. e Bonora, P. L. (2004). *Electrochemical Measures to Evaluate the Damages due to Abrasion in System of Organic Protection*. Tese de Doutorado, Italy, Treno University, p. 1–2.

Rothon, R. (1995) *Particulate-Filled Polymer Composites*. Polymer Science & Technology Series, Longman Scientific & Technical, 375p.

Rousseau, C.E. e Tippur, H.V. (2002) Influence of Elastic Variations on Crack Initiation in Functionally Graded Glass-filled Epoxy. *Engineering Fracture Mechanics*, 69:1679-1693.

Salazar, J.M.G., Barrena, M.I., Morales, G., Matesanz, L. e Merino, N. (2006) Compression Strength and Wear Resistance of Ceramic Foams-polymer Composites. *Materials Letters*, 60:1687-1692.

Salvini, V.R., Innocentini, M.D.M., Rodrigues, J.A. e Pandolfelli, V.C. (2001) Fluência em Filtros Cerâmicos de  $Al_2O_3$ . *Cerâmica*, 47(304):193-198.

Sánchez, E., Orts, M.J., García-Ten, J. e Cantavella, V. (2001) Efeito da Composição da Matérias-Primas Empregadas na Fabricação de Grês Porcelanato Sobre as Fases Formadas Durante a Queima e a Propriedades do Produto Final. *Cerâmica Industrial*, 6:15-22.

Sánchez-González, E., Miranda, P., Meléndez-Martínez, J.J., Guiberteau, F. e Pajares, A. (2007) Temperature Dependence of Mechanical Properties of Alumina up to the Onset of Creep. *Journal of European Ceramic Society*, 27:3345-3349.

Santos, C., Strecker, K., Neto, F.P., Baldacim, S.A., Silva, O.M.M. e Silva, C.R.M. (2005) Anisotropia no Comportamento à Fluência de Cerâmicas à Base de  $Si_3N_4$  Prensadas à Quente. *Cerâmica*, 51:96-101.

Scaramboni, A. et al. (2003) Telecurso 2000 - Curso Profissionalizante – Mecânica/Metrologia, *Fundação Roberto Marinho*, Rio de Janeiro, 240p.

Seif, M.A., Khashaba, U.A. e Rojas-oviedo, R. (2006) Residual Stress Measurements in CFRE and GFRE Composite Missile Shells. *Composite Structures*, Article in press.

Silva, C. E., Santos, P. T., Oliveira, L. C. e Campos, P. H. (2007) O Uso da Pintura Interna em Dutos: Uma Vantagem Econômica. <http://www.abraco.org.br/23sduto.htm> em 22/06/2007.

Soriano, E.A. e Almeida, S.F.M. (2003) Time Dependent Response of a Rubber-Toughened Carbon/Epoxy Composite With Damage Accumulation. *J. Braz. Soc. Mech. Sci. & Eng.*, Rio de Janeiro, 25(2).

Symonds, N, e Mellor, B.G. (1999) Polymeric Coatings for Impact and Wear Resistance I: Wear. *Wear*, 225-229:111-118.

Szeri, A. Z. (1980) *Tribology-Friction, Lubrication and Wear*. New York: Mc Graw-Hill, 548p.

Tarpani, J.R., Milan, M.T., Spinelli, D. e Bose, W.W. (2006) Mechanical Performance of Carbon-epoxy Laminates Part II: Quasi-static and Fatigue Tensile Properties. *Materials Research*, 9(2):121-130.

Wetzel, B., Hauptert, F. e Zhang, M.Q. (2003) Epoxy Nanocomposites with High Mechanical and Tribological Performance. *Composites Science and Technology*, 63:2055-2067.

Wilshire, B. e Bache, M.R. (2007) Creep Damage Resistance of Ceramic-Matrix Composites. *Journal of the European Ceramic Society*, 27:4603-4611.

Xin, S.G., Song, L.X., Zhao, R.G. e Hu, X.F. (2006) Composition and Thermal Properties of the Coating Containing Mullite and Alumina. *Materials Chemistry and Physics*, 97:132-136.

Zanelli, C., Dondi, M., Raimondo, M., Beccaluva, L. e Vaccaro, C. (2003) Phase Transformations During Liquid Phase Sintering of Porcelain Stoneware Tile: a Petrological Approach. *Sintering 2003 – An International Conference on the Science, Technology & Applications of Sintering*. Pennsylvania, EUA. <http://www.mri.psu.edu/conferences/sint03/> em 17/08/2005.

Zhang, F.C., Luo, H.H., Wang, T.S., Roberts, S.G. e Todd, R.I. (2007) Influence Factors on Wear Resistance of Two Alumina Matrix Composites. *Wear*, doi: 10.1016/j.wear.2007.08.011.

Zhao, H. e Li, R.K.Y. (2007) Effect of Water Absorption on the Mechanical and Dielectric Properties of Nano-alumina Filled Epoxy Nanocomposites. *Composites: Part A*, doi: 10.1016/j.compositesa.2007.07.006.