

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**RECUPERAÇÃO DOS ISOLADORES DE VIDRO DAS LINHAS DE
TRANSMISSÃO CONDENADOS POR CORROSÃO E
AVALIAÇÃO DA APLICAÇÃO DE NANOTECNOLOGIA NA
REDUÇÃO DE ACÚMULO DE POLUENTES**

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE
PERNAMBUCO PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
ENGENHARIA MECÂNICA**

LUIZ CARLOS DA SILVA

ORIENTADOR: PROF. DR. ARMANDO HIDEKI SHINOHARA

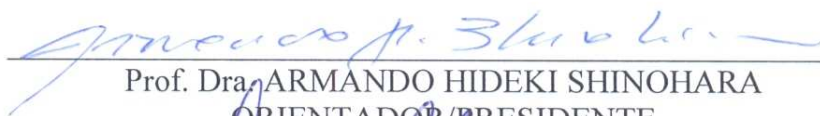
RECIFE, JUNHO DE 2008

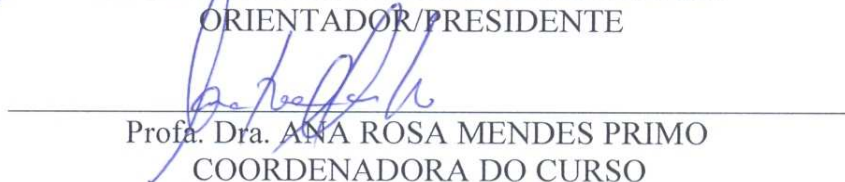
“RECUPERAÇÃO DOS ISOLADORES DE VIDRO DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO CONDENADOS POR CORROSÃO E AVALIAÇÃO DA APLICAÇÃO DE NANOTECNOLOGIA NA REDUÇÃO DE ACÚMULO POLUENTES”.

LUIZ CARLOS DA SILVA

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: MATERIAIS E FABRICAÇÃO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA/CTG/EEP/UFPE


Prof. Dr. ARMANDO HIDEKI SHINOHARA
ORIENTADOR/PRESIDENTE


Profa. Dra. ANA ROSA MENDES PRIMO
COORDENADORA DO CURSO

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. ARMANDO HIDEKI SHINOHARA (UFPE)


Profa. Dra. JULIANA DE ALMEIDA YANAGUIZAWA DE CARVALHO (UFPE)


Prof. Dr. DELSON TORIKAI (POLI/USP)

S586r

Silva, Luiz Carlos da.

Recuperação dos isoladores de vidro das linhas de transmissão condenados por corrosão e avaliação da aplicação de nanotecnologia na redução de acúmulo de poluentes / Luiz Carlos da Silva. - Recife: O Autor, 2008.

73 folhas.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2008.

Inclui bibliografia e Anexo.

1. Engenharia Mecânica. 2. Isolador de Vidro. 3. Argamassa Estrutural. 4. Superfície auto-limpante I. Título.

UFPE

621

CDD (22. ed.)

BCTG/2008-126

“A grande riqueza do homem não se mede pelos bens adquiridos em sua vida e sim pelo número de amigos conquistados”.

Autor desconhecido

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida e paz de espírito na elaboração dessa pesquisa.

A minha família em especial aos meus pais, irmãos e a minha namorada pela paciência e crédito depositado ao meu potencial.

Ao Professor Armando Hideki Shinohara, pelo apoio, acompanhamento e orientação recebidos, importantes e indispensáveis para a elaboração da dissertação.

Aos professores que formam o corpo Docente da Pós-Graduação do Departamento de Engenharia Mecânica da UFPE, em especial ao Professor Dário do corpo Docente da Graduação, pelos conhecimentos compartilhados.

Ao Professor Delson Torikai do corpo Docente do Departamento de Engenharia Mecatrônica da USP, por compartilhar seus conhecimentos.

Ao Professor Arnaldo Carneiro do corpo Docente do Departamento de Engenharia Civil da UFPE, por compartilhar seus conhecimentos.

Aos meus amigos do Laboratório pelo companheirismo, cumplicidade, apoio e incentivo na elaboração dos trabalhos técnico – científico.

À CHESF pelo fornecimento dos isoladores.

A UNICAMP pelas análises químicas.

Ao CNPq pela bolsa de estudos e suporte financeiro.

A CAPES pelo suporte financeiro.

RESUMO

As cadeias de isoladores de vidro são largamente utilizadas tanto para isolar os condutores de eletricidade da terra como suportá-los mecanicamente nas torres das linhas de transmissão. Em termos construtivos, um isolador de vidro para linhas de transmissão de energia elétrica possui uma campânula metálica, disco de vidro temperado, pino metálico e argamassa de cimento Portland ou cimento aluminoso. A argamassa tem função estrutural de fixar o pino metálico ao disco de vidro temperado, podendo suportar cargas mecânicas elevadas de 80 kN a 120 kN. Eletricamente, um isolador comporta-se como um capacitor, e a suportabilidade da tensão de disrupção de um isolador depende de vários parâmetros, tais como da distância de caminho entre os condutores elétricos, limpeza, atmosfera envolvida, tipo e integridade do material utilizado na fabricação.

Para exemplificar, o sistema CHESF (Companhia Hidrelétrica do São Francisco), empresa brasileira de produção, transmissão e comercialização de energia elétrica a nove estados do norte-nordeste, possui cerca de 20 mil km de linhas de transmissão e mais de 3 milhões de isoladores de vidro instalados, que representam 80 % do total de isoladores em operação. A CHESF substitui anualmente cerca de 60.000 isoladores de vidro danificados por novos isoladores, devido à corrosão por oxidação do pino metálico gerada pelo elevado campo elétrico e as ações de intempéries.

Na transmissão e distribuição de energia elétrica a poluição é um grande problema. Spray de sais, poluentes industriais e mesmo areia do deserto levam à interrupção das linhas de transmissão devido à ocorrência de arco elétrico e disrupção.

Filmes auto-limpantes compelem a superfície onde são aplicadas as seguintes características: repulsão a água; deflexão de poeiras ou sujeiras; rejeição de limo; fácil de lavar ou efeito auto-limpante; melhora a resistência a intempéries ambientais; evita corrosão do vidro; proteção por longos períodos.

O objetivo da presente pesquisa é desenvolver um processo de substituição do pino metálico do isolador de vidro condenado por corrosão e avaliar a utilização de produto nanotecnológico na superfície do disco de vidro para minimizar o acúmulo de poluentes.

Para obter sucesso na presente pesquisa realizou-se a caracterização por técnicas avançadas da argamassa estrutural de fixação do pino metálico ao disco de vidro utilizada atualmente, o estudo das propriedades reológicas das argamassas comerciais para selecionar o material adequado para o processo de fixação do novo pino metálico ao disco de vidro, ensaios de resistência mecânica à tração do isolador com o novo pino metálico e aplicação do filme ultrafino hidrofóbico na superfície vítrea dos isoladores.

As técnicas de caracterização avançadas utilizadas provaram que existe uma variação das propriedades físico-químicas das argamassas estruturais empregadas nos isoladores de vidro para fixação do pino metálico ao disco de vidro em função do ano de fabricação do isolador. O material comercial selecionado para fixação do novo pino metálico ao disco de vidro foi empregado com sucesso. A superfície vítrea do isolador foi modificada com a aplicação do filme ultrafino hidrofóbico.

Palavras Chave: Isolador de vidro, argamassa estrutural e superfície auto-limpante.

ABSTRACT

The chains of glass insulators are used broadly so much to isolate the electricity conductors from the earth as it supports them mechanically in the transmission lines towers. In constructive terms, a glass insulator for transmission lines of electric power has a metallic bell, temperate glass disc, metallic pin and mortar cement Portland or mortar cement aluminous. The mortar has structural function of fastening the metallic pin to the temperate glass disk, could support high mechanical loads of 80 kN to 120 kN. By electrical point of view, an insulator behaves like a capacitor, and the tolerability electrical breakdown voltage of an insulator depends on several parameters, such gap, cleaning, involved atmosphere, type and integrity of the material used in the manufacturing.

To exemplify, the CHESF system (Hydroelectric Company of São Francisco), Brazilian company of production, transmission and electric power commercialization to nine states of the north-northeast, possesses about 20 thousand kilometers of transmission lines and more than 3 million glass insulators installed, which represent 80% of all insulators in operation. The CHESF substitutes annually about of 60.000 glass insulators damaged by new insulators, due to the corrosion by oxidation of the metallic pin generated by the high electric field and the actions of bad weather.

In the transmission and electric power distribution the pollution is a great problem. Spray of salts, industrial pollutant and even sand of the desert takes to the interruption of the transmission lines due to the occurrence of electric arc and disruption.

Films self-cleaning compel the surface where they are applied the following characteristics: water repulsion; dusts deflection; slime rejection; easy to wash or effect self-cleaning; improve the resistance to environmental bad weather; prevent corrosion of the glass; protection for long periods.

The objective of the present research is to develop a process of substitution of the metallic pin of the glass insulator condemned by corrosion and to evaluate the use of nanotechnology product in the surface of the glass disk to minimize the accumulation of pollutant.

To obtain success in the present research took place the characterization for advanced techniques of the structural mortar of fixation of the metallic pin to the glass disk used actually, the study of the properties reologics of the commercial mortars to select the

appropriate material for the fixation process of the new metallic pin to the glass disk, rehearsals of mechanical resistance to the traction of the insulator with the new metallic pin and application of the hydrophobic ultra thin film in the glass surface of the insulators.

The used advanced characterization techniques proved that a variation of the physiochemical properties of the mortars structural exists in function of the year manufacture in the glass insulators for fixation of the metallic pin to the glass disk. The commercial material selected for fixation of the new metallic pin to the glass disk was employed with success. The glass surface of the insulator was modified with the application of the hydrophobic ultra thin film.

Key words: Glass insulator, structural mortar and self-cleaning surface.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Fotos de isoladores para linhas de transmissão de energia, isolador de vidro (a); isolador de porcelana (b); isolador polimérico (c).

Figura 1.2 – Isolador de vidro com o pino metálico que sofreu corrosão.

Figura 1.3 – Flor de lótus.

Figura 1.4 – Micrografia mostrando a estrutura de uma folha de lótus.

Figura 3.1 – Esquema isolador de vidro e suas respectivas partes construtivas.

Figura 3.2 – Esquema do fenômeno de Difração de Raios – X.

Figura 3.3 – Preparação da argamassa.

Figura 3.4 – Materiais utilizados nos ensaios de resistência mecânica.

Figura 3.5 – Esquema do ensaio de espalhamento.

Figura 3.6 – Esquema do corpo de prova para ensaios mecânicos.

Figura 3.7 – Isolador de vidro sem pino e com pino para ensaio de tração.

Figura 3.8 - Esquema do isolador de vidro: observar a geometria do pino metálico.

Figura 3.9 – Esquema de uma superfície com filme ultrafino hidrofóbico.

Figura 3.10 – Superfície de concreto com filme ultrafino hidrofóbico.

Figura 3.11 – Aplicação do filme ultrafino hidrofóbico.

Figura 3.12 - Cadeia de isoladores com o filme (a); e sem filme (b).

Figura 4.1 – Fotografia da argamassa retirada de um isolador de vidro de alta tensão.

Figura 4.2 – Difratoograma das amostras de argamassa estrutural dos isoladores de vidros fabricados nos anos de 1964, 1970, 1973, 1976, 1984 e 1990.

Figura 4.3 –Difratoograma da amostra de argamassa estrutural do isolador de vidro fabricado no ano de 1964.

Figura 4.4 –Difratoograma da amostra de argamassa estrutural do isolador de vidro fabricado no ano de 1990.

Figura 4.5 – Espectroscopia de infravermelho das amostras de argamassa estrutural dos isoladores de vidro para alta tensão fabricados nos anos de 1964, 1970, 1973, 1976, 1984 e 1990.

Figura 4.6 –Espectroscopia de infravermelho das amostras da argamassa estrutural detalhando banda na faixa espectral de $400\text{-}800\text{ cm}^{-1}$.

Figura 4.7 –Micrografia óptica 400 x, argamassa estrutural do isolador de vidro, fabricado no ano de 1964 (a); fabricado em 1990 (b).

Figura 4.8 – Dureza da argamassa em função do ano de fabricação.

Figura 4.9 - Isolador de vidro sem pino metálico que sofreu corrosão.

Figura 4.10 - Curva granulométrica dos materiais

Figura 4.11 - Teste de espalhamento dos materiais.

Figura 4.12 - Ensaio de flexão três pontos.

Figura 4.13 - Ensaio de flexão três pontos da argamassa quartzolit.

Figura 4.14 - Ensaio de compressão.

Figura 4.15 - Ensaio de compressão da argamassa quartzolit.

Figura 4.16 – Ensaio de tração da fixação do pino com argamassa quartzolit.

Figura 4.17 – Ensaio de tração com idades diferentes para argamassa quartzolit.

Figura 4.18 – Ensaio de flexão três pontos do grout quartzolit.

Figura 4.19 – Ensaio de flexão três pontos do grout quartzolit e da argamassa quartzolit.

Figura 4.20 – Ensaio de compressão do grout quartzolit.

Figura 4.21 - Ensaio de compressão do grout quartzolit e da argamassa quartzolit.

Figura 4.22 – Ensaio de tração da fixação do pino com grout quartzolit.

Figura 4.23 – Teste da propriedade hidrofóbica do filme ultrafino da Nanotec.

Figura 4.24 - Cadeia de isoladores após 60 dias sem o filme (a); e com o filme (b).

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Fluorescência de raios-X das argamassas dos isoladores.

Tabela 4.2 – Materiais usados para testes.

Tabela 4.3 – Resultados dos ensaios de densidade no estado anidro.

Tabela 4.4 – Ensaio de espalhamento

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
1.1 Apresentação do problema	14
2. OBJETIVOS	19
3. MATERIAIS E MÉTODOS	20
3.1 Isoladores de vidro para alta tensão.....	20
3.2 Análise Química por Fluorescência de Raios-X.....	21
3.3 Identificação das Fases Cristalinas por Difração de Raios-X.....	21
3.4 Análise Microestrutural por Espectroscopia de Infravermelho	23
3.5 Análise Microdureza.....	25
3.6 Argamassa Estrutural.....	25
3.6.1 Preparação da Argamassa	26
3.6.2 Teste de Composição Granulométrica.....	27
3.6.3 Caracterização da Argamassa por Espalhamento.....	27
3.7 Ensaios de Resistência Mecânica a Flexão e Compressão	28
3.8 Fixação do Pino Metálico Novo ao Disco de Vidro	29
3.9 Ensaios de Resistência Mecânica a Tração do Isolador com o Pino Metálico Novo.....	30
3.10 Avaliação da Aplicação de Nanotecnologia na Redução de Acúmulo de Poluentes.....	30
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	34
4.1 Análise Química por Fluorescência de Raios-X.....	34
4.2 Identificação das Fases Cristalinas por Difração de Raios-X.....	36
4.3 Análise Microestrutural por Espectroscopia de Infravermelho	38
4.4 Análise de Microdureza.....	40
4.5 Caracterização Mecânica da Argamassa para Fixação do Novo Pino Metálico	43
4.6 Ensaios de Resistência Mecânica a Tração do Isolador com o Pino Metálico Novo.....	48
4.7 Avaliação da Aplicação de Nanotecnologia na Redução de Acúmulo de Poluentes.....	54
5. CONCLUSÕES.....	56
5.1 Conclusões.....	56
5.2 Trabalhos Futuros	58
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS	59
7. ANEXOS.....	65

1. INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação do problema

Nas linhas de transmissão de energia elétrica os isoladores têm a importante função de isolar o cabo energizado da torre metálica e suportar mecanicamente o peso dos cabos condutores e cargas mecânicas devido à ação do vento. Na atualidade, existem três tipos de isoladores largamente utilizados em linhas de transmissão: isoladores de vidro; isoladores de porcelana; e compósito ou polimérico (Figura 1.1) [1].

Os isoladores de vidro e de porcelana são utilizados há mais de 120 anos em linhas de transmissão. Os isoladores compósito, conhecidos também como isoladores poliméricos, começaram a ser empregados na linha de transmissão a partir da década de 1960. Eletricamente, um isolador comporta-se como um capacitor, e a suportabilidade da tensão de ruptura de um isolador depende de vários parâmetros tais como da distância de caminho entre os condutores elétricos, limpeza, atmosfera envolvida, tipo e integridade do material utilizado na fabricação [2].

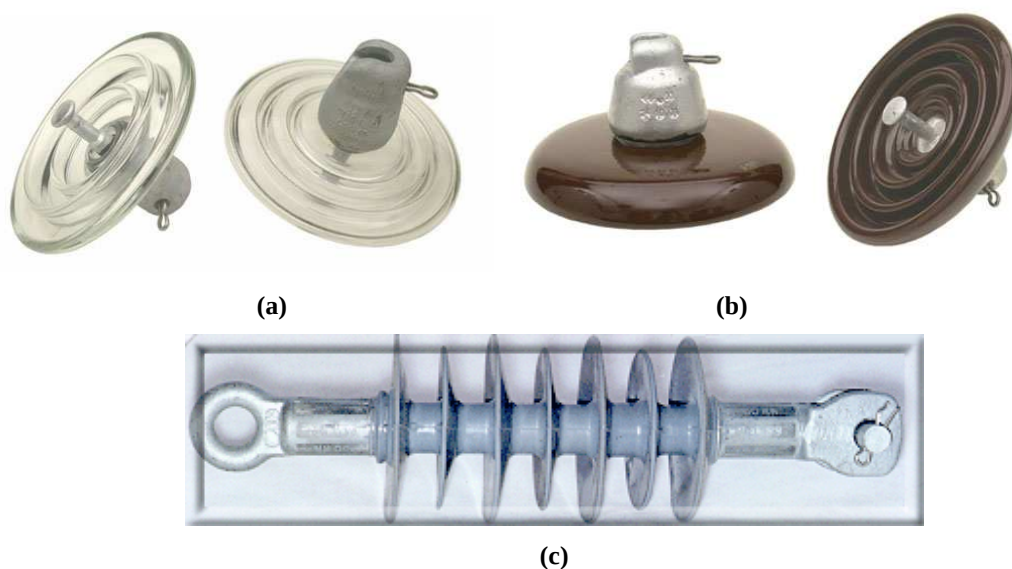


Figura 1.1 – Fotos de isoladores para linhas de transmissão de energia, isolador de vidro (a); isolador de porcelana (b); isolador polimérico (c).

Por volta da metade dos anos 90, a CESP (Companhia Hidrelétrica de São Paulo) relatou a ocorrência de episódios de corrosão, principalmente no pino, em isoladores de vidro instalados a cerca de 8 a 10 anos, em áreas de alta umidade e presença de maresia. Outras empresas relataram ocorrência de corrosão em regiões de alta umidade ou próximas ao mar, inclusive sendo registradas ocorrências de queda de condutores causadas pelo rompimento do pino de isolador de vidro. Essas ocorrências surgem em todos os níveis de tensão [3].

Para exemplificar, o sistema CHESF (Companhia Hidrelétrica do São Francisco), empresa brasileira de produção, transmissão e comercialização de energia elétrica a nove estados do norte-nordeste, possui cerca de 20 mil km de linhas de transmissão e mais de 3 milhões de isoladores de vidro instalados, que representam 80 % do total de isoladores em operação. Um isolador de vidro é constituído das seguintes partes: campânula metálica, disco de vidro temperado, pino metálico e argamassa de cimento aluminoso ou cimento portland. A campânula e o pino são de aço galvanizados. O cimento tem a função estrutural de fixar o pino metálico ao disco de vidro temperado, e pode suportar cargas mecânicas elevadas, dependendo do tipo de isolador, de 80 kN a 120 kN.

A CHESF substitui anualmente cerca de 60.000 isoladores de vidro danificados por novos isoladores, devido à corrosão por oxidação do pino metálico gerada pelo elevado campo elétrico e as ações de intempéries que leva em torno de 50 anos. Esta oxidação causa perda de massa e conseqüentemente, a diminuição da resistência mecânica à carga que os isoladores estão submetidos. Um isolador de vidro com pino que sofreu corrosão pode ser visto na Figura 1.2.



Figura 1.2 - Isolador de vidro com o pino metálico que sofreu corrosão.

O custo de um isolador de vidro novo típico, disco de vidro com diâmetro de 255 mm, empregado nas linhas de transmissão de 69 kV, 138 kV, 230 kV e 500 kV custa em torno de R\$ 40/unidade no ano de 2007. Portanto, o custo anual envolvido somente com a aquisição de novos isoladores de vidro devido a danos por corrosão é em torno de R\$ 2,3 milhões/ano.

Existem três níveis de corrosão para isoladores de vidro que são: níveis I e II, corrosões superficiais sem grande perda de massa; nível III, corrosão mais acentuada com uma grande perda de massa. Atualmente, os isoladores de vidro condenados por corrosão e retirados das linhas de transmissão são: corrosão dos níveis I e II são enviados para uma empresa em Pelotas (RS) que efetua um processo de preenchimento superficial do pino metálico com zinco e em seguida uma pintura com tinta epóxi; corrosão do nível III são depositados em pátios para leilão como sucata. As empresas vencedoras aproveitam o aço da campânula e do pino para reciclagem, juntamente com o vidro dos isoladores.

Sabendo-se que nos materiais cerâmicos não se realiza ensaio de tração, é feito no conjunto campânula metálica, disco de vidro e pino metálico, fixados por uma argamassa estrutural, devido à geometria do pino metálico. A extremidade do pino metálico que fica no interior do disco de vidro possui uma geometria tal que, quando o conjunto é submetido à tração devido ao peso dos cabos condutores, essa região realiza uma carga de compressão na argamassa estrutural.

Na transmissão e distribuição de energia elétrica a poluição é um grande problema. Spray de sais, poluentes industriais e mesmo areia do deserto levam à interrupção das linhas de transmissão devido à ocorrência de arco elétrico e disrupção [4]. Algumas opções foram tentadas, tais como: revestimento a base de silicone, que possui uma proteção contra acúmulo de poluição e hidrofobicidade relativamente longa em relação à lavagem à alta pressão ou aplicação de graxas especiais, mas apresentaram limitações técnicas.

O efeito de hidrofobicidade e superfície auto-limpantes exibidos por alguns vegetais, como a folha de lótus, vêm sendo pesquisados há muito tempo, e somente na década de 1990 descobriu-se sua razão: rugosidade sub-micrométrica que não prendem as partículas de sujeira, e a existência de uma cera hidrofóbica que reduz a adesão de água, denominada pelo Dr. Wilhelm Barthlott de efeito lótus. Dessa forma, toda sujeira que se deposita sobre a superfície é carregada pela água (durante uma chuva, por exemplo).

As flores de lótus são belíssimas; e suas folhas estão sempre limpas. Isso acontece graças à sua superfície naturalmente repelente à água: as gotas escorrem pelas folhas levando consigo qualquer grão de poeira que esteja pelo caminho. Há anos os cientistas se inspiram nessas estruturas, em busca de materiais que possam significar o fim da limpeza em janelas, casas e até carros [5].

O segredo por trás do efeito lótus, como é conhecido, está na microestrutura de minúsculos nódulos existentes sobre as folhas da famosa planta. Os micronódulos não oferecem superfície suficiente para que a água se apóie, ela então se contrai em gotas e rola sobre a superfície. Em superfícies normais, a água cobre a superfície e assume uma estrutura hemisférica, deixando o material molhado [6]. A flor de lótus é apresentada na Figura 1.3.



Figura 1.3 – Flor de lótus. [5]

É claro que a natureza não dotou a folha de lótus com tais características meramente por acaso: cada estrutura desempenha seu papel no efeito hidrofóbico. Por exemplo, o ângulo de contato de uma gota de água sobre uma folha de lótus é 142° (uma superfície é considerada hidrofóbica quando esse ângulo ultrapassa 90°), o que significa que a superfície de contato é bastante pequena [6].

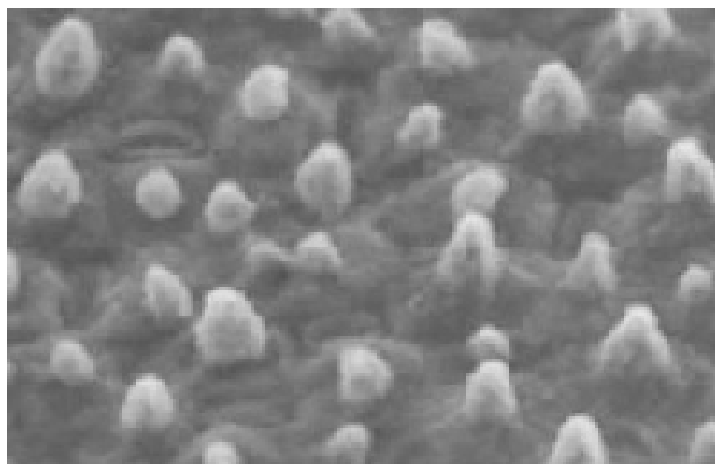


Figura 1.4 – Micrografia mostrando a estrutura de uma folha de lótus. [6]

Os produtos que compõem a superfície onde são aplicadas o efeito lótus proporcionam a essas superfícies as seguintes características: repulsão a água, deflexão de poeiras ou sujeiras, rejeição de limo, fácil de lavar ou efeito auto-limpante, podem melhorar a resistência à intempéries ambientais, evitar corrosão do vidro, proteção por longos períodos.

Logo, isoladores de vidro com propriedades de efeito lótus parecem dar uma solução para o problema da proteção contra a poluição e da hidrofobicidade procurada.

2. OBJETIVOS

➤ Objetivo geral:

O presente trabalho tem como objetivo desenvolver um processo para realizar a substituição do pino metálico do isolador de vidro que sofreu corrosão por um novo pino metálico e executar ações para a melhoria funcional em termos elétricos dos isoladores de vidro recuperados visando: minimizar a possibilidade de ocorrência da oxidação do pino metálico, avaliar a redução do acúmulo de poluentes e spray salinos na superfície vítrea dos isoladores de vidro utilizando nanotecnologia.

➤ Objetivos específicos:

- ✓ Realizar caracterizações mecânica, física e química da argamassa estrutural utilizada atualmente na fixação do pino metálico;
- ✓ Efetuar a fixação dos pinos metálicos aos isoladores de vidro recuperados;
- ✓ Avaliar as propriedades mecânicas da nova argamassa estrutural;
- ✓ Avaliar a aplicação de um filme ultrafino hidrofóbico na superfície vítrea do isolador.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Isoladores de Vidro para Linhas de Transmissão

O isolador utilizado no presente trabalho é conhecido como concha-bola, fabricado para suportar cargas de 80 kN, empregado em linhas de 230 kV. O esquema de um isolador concha-bola é mostrado na Figura 3.1.

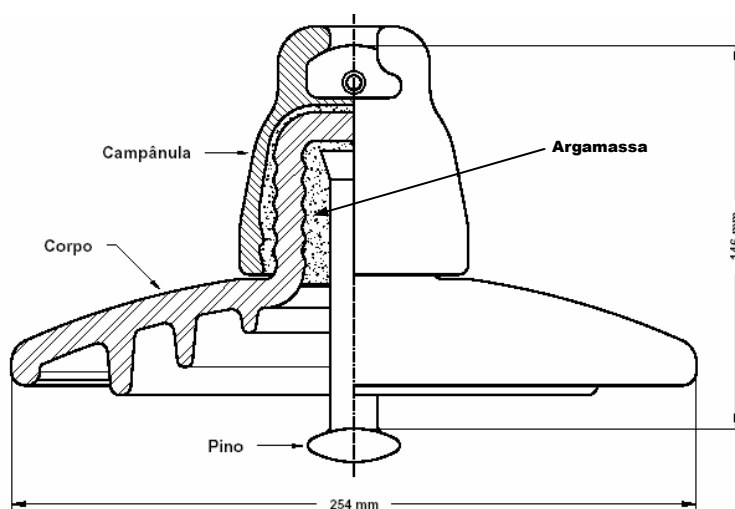


Figura 3.1 - Esquema isolador de vidro e suas respectivas partes construtivas.

Foram utilizadas amostras de argamassa estrutural dos isoladores de vidro fabricados nos anos de 1964, 1970, 1973, 1976, 1984 e 1990. A argamassa foi retirada dos isoladores (entre o pino metálico e o disco de vidro), quebrada e sofreu diminuição e homogeneização granular em um almofariz de ágata. As amostras foram aquecidas na estufa por 24h à 60°C para retirar umidade.

3.2 Análise Química por Fluorescência de Raios-X

As análises de fluorescência de raios-X foram realizadas no Departamento de Engenharia de Materiais/Unicamp, Campinas-SP. A análise química foi realizada com um espectrômetro RIGAKU RIX 3100 (tubo com alvo de ródio, 60 kV, 25 mA), método dos parâmetros fundamentais.

A análise por fluorescência de raios-X (FRX) é um método qualitativo e semi-quantitativo baseado na medida das intensidades (número de fótons detectados por unidade de tempo) dos raios-X característicos emitidos pelos elementos que constituem a amostra, quando devidamente excitada [7]. Os raios-X emitidos por tubo de raios-X são utilizados na excitação dos elementos, os quais por sua vez emitirão linhas espectrais com energias características cujas intensidades estão relacionadas com a concentração do elemento na amostra.

Quando um átomo de um elemento presente em uma amostra é excitado, ele tende a ejetar os elétrons dos níveis internos, e como consequência disto, elétrons dos níveis mais afastados realizam um salto quântico para preencher a vacância. Cada transição eletrônica constitui uma perda de energia para o elétron, e esta energia é emitida na forma de um fóton de raios-X, de energia característica, podendo ser utilizado na identificação do elemento emissor [8].

As amostras, em pó, foram compactadas em formato de pastilhas em temperatura ambientes de aproximadamente 10 mm de diâmetro.

3.3 Identificação das Fases Cristalinas por Difração de Raios-X

As análises de difração de raios-X foram realizadas no Departamento de Engenharia Mecânica/CTG/UFPE, Recife-PE, para determinar as principais fases cristalinas da argamassa estrutural dos isoladores de vidro. A difração de Raios-X foi realizada utilizando um equipamento da Shimadzu, modelo XRD6000, através de um goniômetro θ - 2θ , comprimento de onda 1,54 Å, ângulo de 10° a 90° . A identificação da fase cristalina foi realizada com o banco de dados da ICDD e utilização do software search-match.

A técnica de difração de raios-X evoluiu rapidamente como um método eficiente e preciso para uso em pesquisa científica e tecnológica, e para ensaios não-destrutivos em aplicações industriais. A Difractometria θ - 2θ utiliza amostras policristalinas ou em forma de pó. O fenômeno da difração é regido pela lei de Bragg, que tem seu esquema apresentado na Figura 3.2.

$$[2d_{hkl}\sin\theta = n\lambda] \quad 3.1$$

Onde:

d_{hkl} é o espaçamento interplanar dos planos com índices de Miller (hkl);

θ é o ângulo de Bragg;

λ é o comprimento de onda da radiação;

n número inteiro.

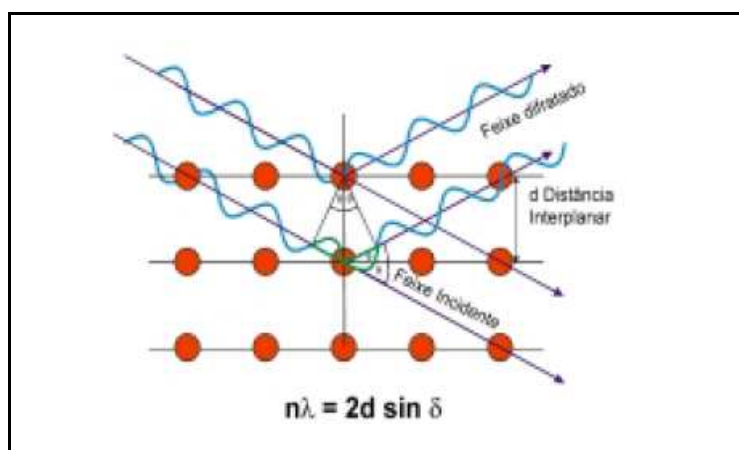


Figura 3.2 - Esquema do fenômeno de Difração de Raios – X.

O diagrama obtido com difratometria de raios-X revela a intensidade e a posição angular dos perfis que correspondem cada qual à família de planos (hkl). A partir da posição angular (2θ) do pico de cada perfil, podemos obter o espaçamento d_{hkl} usando a Lei de Bragg (Eq. 3.1).

A difração pode ser usada para a identificação de estruturas cristalinas, para determinar parâmetros de rede, identificação das fases presentes e para medição de tensões residuais, além de um grande número de outras utilizações [9-10].

A identificação das fases presentes numa microestrutura pode ser feita com base na estrutura cristalina de cada fase, cujos planos difratam segundo um princípio conhecido como Lei de Bragg [11].

No difratômetro tradicional a captação do eixo difratado é feita por meio de um detector, segundo um arranjo geométrico conhecido como a geometria Bragg-Brentano.

O feixe difratado é normalmente expresso através de picos que se destacam do *background* (ou linha de base), registrados num espectro de intensidade versus o ângulo 2θ (ou d), constituindo o padrão difratométrico ou difratograma).

As informações obtidas de cada pico são a intensidades, a posições angular (2θ) ou distância interplanar (d) e o perfil. Cada composto cristalino apresenta um padrão difratométrico característico, permitindo sua identificação através das posições angulares e intensidades relativas dos picos difratados.

No estudo de agregados policristalinos através do método do pó, a amostra é pulverizada, fixada a um porta-amostra por prensagem e/ou colagem e submetida a um feixe de raios-X monocromático.

A identificação das substâncias cristalinas é obtida através da comparação do difratograma com padrões difratométricos de fases individuais disponibilizados pelo ICDD (*International Center for Diffraction Data*, antigo JCPDS-*Joint Committee of Powder Diffraction Standards*).

As amostras, em pó, foram prensadas a um porta amostra.

3.4 Análise Microestrutural por Espectroscopia de Infravermelho

As análises de infravermelho foram realizadas no Departamento de Engenharia Mecânica/CTG/UFPE, Recife-PE, para complementar as informações obtidas por difração de raios-X. Utilizou-se o equipamento FTIR marca ABB, modelo FTLA2000, medidas feitas em pastilhas de KBr, número de scans = 100, resolução 4 cm^{-1} , faixa espectral = $8000 - 400\text{ cm}^{-1}$.

A energia de ligação de uma molécula consiste da soma de sua energia rotacional, vibracional e eletrônica. Enquanto as transições entre níveis de energia eletrônicos são responsáveis pela absorção ou emissão na região do visível ou ultravioleta, as vibrações moleculares são responsáveis por bandas de absorção na região do infravermelho.

Em espectroscopia de infravermelho para estudo de materiais, usualmente o número de ondas é representado pela seguinte equação:

$$k = \frac{\nu}{c} = \frac{1}{\lambda} \quad 3.2$$

Onde:

- K número de ondas;
- c velocidade da luz;
- ν frequência;
- λ comprimento de onda.

Cada molécula ou grupo funcional absorve uma frequência de radiação característica resultando uma banda de absorção ou pico de espectro.

Basicamente, as vibrações moleculares podem ser classificadas em dois tipos: vibrações de deformação axial (*stretching*) e de deformação angular (*bending*). As deformações axiais, ou estiramento são oscilações radiais das distâncias entre os núcleos enquanto as deformações angulares envolvem mudanças dos ângulos entre as ligações ou, como no modo de deformação assimétrica fora do plano, alterações do ângulo entre o plano que contém as ligações e um plano de referência.

Basicamente, existem dois tipos de espectrofotômetros de absorção de infravermelho, (i) os que separam os comprimentos de onda da radiação por dispersão e, (ii) os que utilizam o fenômeno de interferência [12]. A última técnica requer o uso de transformada de Fourier para obtenção do espectro de absorção, e utilizando o algoritmo de FFT – (*Fast Fourier Transform*) tornou-se possível realizar as medidas de absorção no infravermelho, e hoje é conhecida por espectrofotometria de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR).

As amostras, em pó, foram compactadas em formato de pastilhas com adição de KBr em temperatura ambientes de aproximadamente 10 mm de diâmetro.

3.5 Análise de Microdureza

As análises de microdureza foram realizadas no Departamento de Engenharia Mecânica/CTG/UFPE, Recife-PE. Utilizou-se o microdurômetro Shimadzu, modelo HMV-2, com aplicação de uma carga de 980,7 mN por 30 segundos, em cinco pontos aleatórios da superfície da amostra, por meio de um Indentador Vickers.

No teste de dureza Vickers uma pirâmide com base quadrada é prensada com uma carga específica sobre a superfície polida de um material. O valor de dureza Vickers (geralmente abreviado por HV) é calculado por meio da divisão da carga pela área projetada da penetração. Os comprimentos das diagonais são mensurados e seus valores multiplicados para calcular a área [13].

Os testes foram realizados por meio da aplicação de uma carga na superfície do corpo de prova, por meio de um Indentador Vickers, (pirâmide de diamante de base quadrada e ângulo entre as faces de 136°).

A argamassa foi retirada dos isoladores (entre o pino metálico e o disco de vidro), cortada em formato aproximadamente cúbico de 1cm³, em seguida as amostras foram lixadas com lixa de granulação 1200 para obtenção de uma superfície lisa, plana e polida.

3.6 Argamassa Estrutural

A argamassa é uma mistura de aglomerantes, agregados e água, dotada de capacidade de endurecimento e aderência, cuja dosagem varia de acordo com a utilização.

Empregada no assentamento de alvenarias e na execução de revestimentos, a argamassa deve ter, basicamente, as seguintes características: economia, poder de incorporação de areia, plasticidade, aderência, retenção de água, homogeneidade, compacidade, resistência à infiltração, à tração e à compressão e durabilidade. Cada tipo de emprego exige diferentes características e propriedades, correlatas aos materiais empregados [14].

3.6.1 Preparação da Argamassa

A preparação das argamassas foi realizada no Departamento de Engenharia Civil/CTG/UFPE, Recife-PE. A argamassa foi preparada segundo a norma NBR-6457 – (Preparação de Amostras). A preparação da argamassa é apresentada na Figura 3.3.



Figura 3.3 – Preparação da argamassa.

Os materiais empregados nessa pesquisa são comerciais e de fácil preparo. Foram utilizadas argamassas Quartzolit porcelanato uso externo, argamassa Portokoll porcelanato, grout Quartzolit e Sika grout. Os materiais usados podem ser vistos na Figura 3.4 [15-17].



Figura 3.4 – Materiais utilizados nos ensaios de resistência mecânica.

3.6.2 Caracterização da Argamassa por Espalhamento

O ensaio de espalhamento das argamassas foi realizado no Departamento de Engenharia Civil/CTG/UFPE, Recife-PE. O ensaio foi realizado segundo a norma NBR-13276 (Determinação da água da pasta de consistência normal).

Com este ensaio pretende-se aferir a capacidade de deformação das pastas (trabalhabilidade) em função da dosagem de água. No intuito de atingir este objetivo foram realizadas várias pastas com diferentes dosagens [18].

O molde tronco cônico semelhante ao apresentado na Figura 3.5 é colocado sobre uma placa de metal onde é cheio de pasta e retirado. Deixa-se a pasta espalhar durante 60s e os diâmetros finais da argamassa são medidos em duas direções perpendiculares. Os 60s são o tempo necessário para que a deformação da pasta estabilize, ou seja, não haja aumento do diâmetro [19].

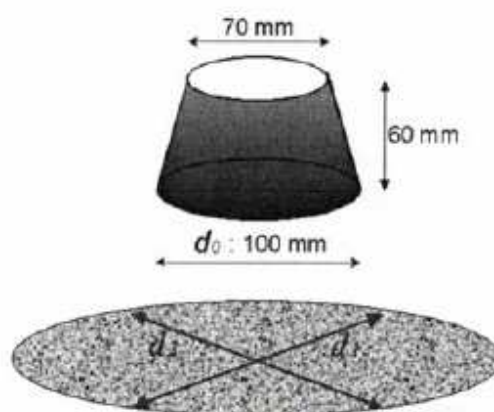


Figura 3.5 – Esquema do ensaio de espalhamento.

3.6.3 Teste de Composição Granulométrica

O ensaio de composição granulométrica das argamassas foi realizado no Departamento de Engenharia Civil/CTG/UFPE, Recife-PE. O ensaio foi realizado segundo a norma NBR-NM-248 (Determinação da composição granulométrica).

Com este ensaio pretende-se determinar a variação do tamanho de grão das argamassas em função do fornecedor [18].

3.7 Ensaios de Resistência Mecânica a Flexão e Compressão

Os ensaios de resistência mecânica a flexão e compressão das argamassas foram realizados no Departamento de Engenharia Mecânica/CTG/UFPE, Recife-PE. Utilizou-se a máquina de ensaios universal EMIC DL10000, com tensão máxima no ensaio de 80000 N. O ensaio foi realizado segundo NBR-13279 (Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão).

Para os ensaios no estado endurecido foram selecionada argamassa quartzolit e sika grout. As argamassas foram preparadas segundo a norma NBR-6457 – (Preparação de Amostras). O corpo de prova apresenta formato prismático de dimensões 40mm x 40mm x 160mm, e tem o seu esquema apresentado na Figura 3.6.

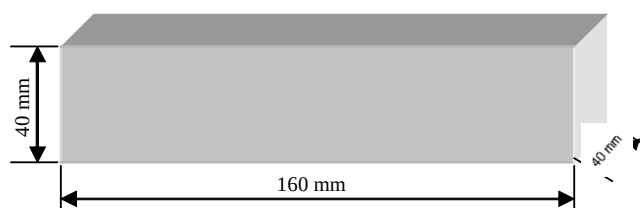


Figura 3.6 – Esquema do corpo de prova para ensaios mecânicos.

Com os corpos de prova preparados, foram realizados ensaios de flexão e compressão com idades diferentes. As amostras permaneceram em uma câmara úmida até a realização do ensaio para garantir uma cura com pequena variação volumétrica, evitando assim o aparecimento de trincas.

3.8 Fixação do Pino Metálico Novo ao Disco de Vidro

A preparação das argamassas foi realizada no Departamento de Engenharia Civil/CTG/UFPE, Recife-PE. A argamassa foi preparada segundo a norma NBR-6457 – (Preparação de Amostras).

Os pinos metálicos novos foram confeccionados na Oficina Mecânica no Departamento de Engenharia Mecânica/CTG/UFPE, Recife-PE. Foi utilizado aço 1020, apenas no intuito de testes mecânicos, sem qualquer preocupação para efeitos de corrosão. Para os ensaios de resistência mecânica a tração foi necessária à confecção de pinos sem o engate concha-bola para fixação nos mordentes da garra da máquina de tração. Os isoladores de vidro sem pino e com pino podem ser vistos na Figura 3.7



Figura 3.7 – Isolador de vidro sem pino e com pino para ensaio de tração.

3.9 Ensaios de Resistência Mecânica à Tração do Isolador com o Pino Metálico Novo

Os ensaios de resistência mecânica a tração do isolador de vidro com o pino metálico novo foram realizados no Departamento de Engenharia Mecânica/CTG/UFPE, Recife-PE. Utilizou-se a máquina de ensaios universal EMIC DL10000, com tensão máxima no ensaio de 80000 N.

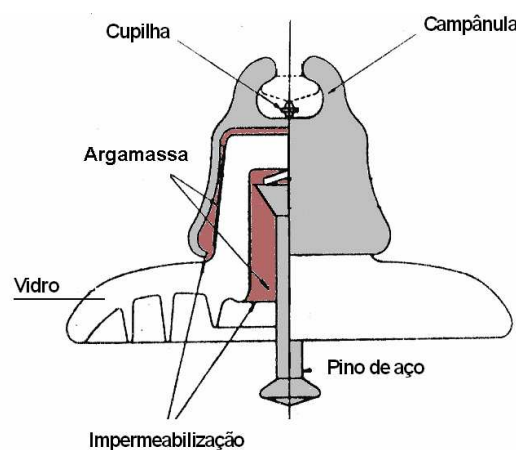


Figura 3.8 – Esquema do isolador de vidro: observar a geometria do pino metálico.

3.10 Avaliação da Aplicação de Nanotecnologia na Redução de Acúmulo de Poluentes

Os testes de avaliação da aplicação de nanotecnologia na redução de acúmulo de poluentes no isolador de vidro foram realizados no Departamento de Engenharia Mecatrônica/USP, São Paulo-SP e Departamento de Engenharia Mecânica/CTG/UFPE, Recife-PE.

Para realizar os testes foram adquiridos da empresa australiana Nanotec os seguintes produtos:

Nanoprotect® AG - tratamento nanotecnológico especificamente desenvolvido para vidros de automóveis. Contém nanopartículas que aderem diretamente nas moléculas superficiais (ligação molecular) e garante visibilidade total, com filme ultrafino fornece a superfície

onde for aplicado hidrofobicidade (propriedade de repelir a água). Essa propriedade transforma a superfície em auto-limpante, todo o material poluente é simplesmente lavado em uma chuva ou quando molhado. O esquema de uma superfície com filme ultrafino hidrofóbico pode ser vista na Figura 3.9 [20].

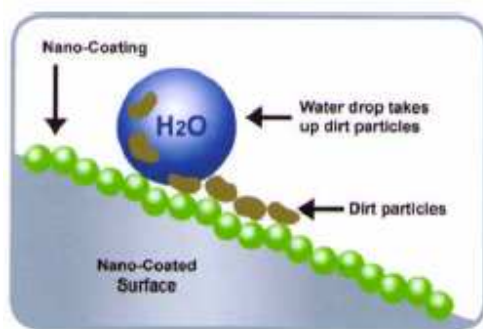


Figura 3.9 – Esquema de uma superfície com filme ultrafino hidrofóbico. [20]

Nanoprotect® CS - tratamento para superfícies de concretos porosos e não porosos baseado em nanotecnologia. Contém nanopartículas que aderem diretamente nas moléculas superficiais (ligação molecular) e garante visibilidade total, com filme ultrafino fornece a superfície onde for aplicado hidrofobicidade (propriedade de repelir a água). Essa propriedade transforma a superfície em auto-limpante, todo o material poluente é simplesmente lavado em uma chuva ou quando molhado. Uma superfície de concreto com filme ultrafino hidrofóbico pode ser visto na Figura 3.10 [20].



Figura 3.10 – Superfície de concreto com filme ultrafino hidrofóbico. [20]

Surface Preparation é um produto utilizado na preparação das superfícies antes da aplicação dos filmes ultrafinos hidrofóbicos [20].

Para aplicação do produto a superfície deve ser preparada da seguinte forma: deve ser bem lavada; aplicado o Surface Preparation por spray e esfregado com uma flanela limpa; aplicar o produto desejado (Nanoprotect® AG ou Nanoprotect® CS) por spray e esfregar com uma flanela até garantir uniformidade; repetir a aplicação do filme ultrafino após 15 minutos.

Foi realizado um estudo das propriedades hidrofóbicas do Nanoprotect® AG em uma placa de vidro com variação de inclinação. Esse teste foi realizado no intuito de determinar o ângulo mínimo de inclinação da superfície com filme ultrafino hidrofóbico para que a água deslize sobre essa superfície. Para cada seção da placa de vidro foi aplicada uma camada do filme ultrafino hidrofóbico a mais da seção anterior, começando com uma camada.

A superfície dos isoladores foi preparada para a aplicação do filme ultrafino hidrofóbico. Todos foram lavados com detergente e muita água corrente, em seguida utilizou-se o Surface Preparation desenvolvido pela empresa australiana. O detalhe da limpeza e aplicação do filme pode ser visto na Figura 3.11.



Figura 3.11 – Aplicação do filme ultrafino hidrofóbico.

Após a aplicação do filme foram formadas duas cadeias composta por cinco isoladores de vidro cada no exterior do laboratório para monitorar o seu funcionamento. A primeira cadeia de isoladores de vidro foi instalada com isoladores sem aplicação do filme ultrafino hidrofóbico e a segunda cadeia foi instalada com isoladores usando o filme

ultrafino hidrofóbico Nanoprotect® AG, dessa forma é possível comparar e verificar possíveis melhorias. A montagem das cadeias de isoladores pode ser vistas na Figura 3.12.

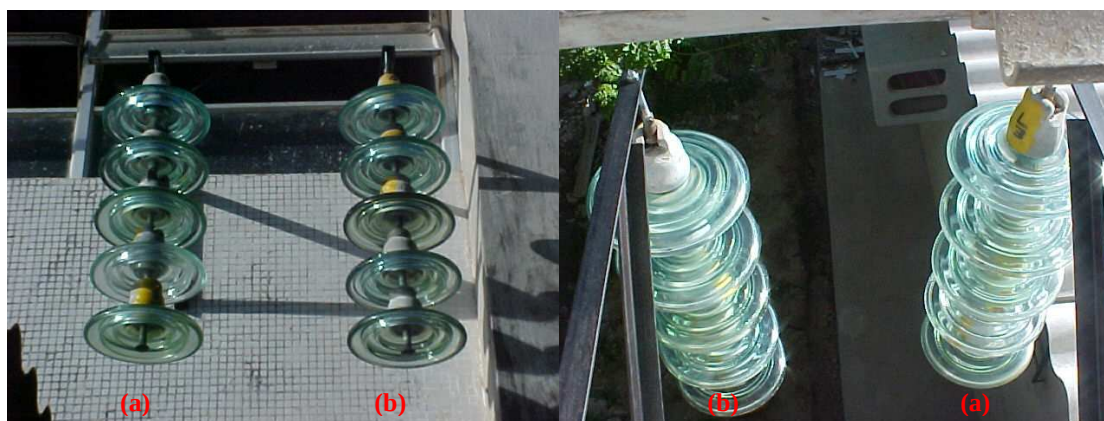


Figura 3.12 – Cadeia de isoladores com o filme (a); e sem filme (b).

Foram realizados testes de disrupção dos isoladores com aplicação do filme fino hidrofóbico e sem aplicação do filme, tanto para testes a seco como sob condições de chuva no IEE-USP.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Análise Química por Fluorescência de Raios-X

Com as análises de fluorescência de raios-X determinou-se que as argamassas possuem variação dos seus componentes em função do ano de fabricação. Os resultados são apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Fluorescência de raios-X das argamassas dos isoladores.

	1964	1970	1973	1976	1984	1990
Elementos	(%massa)	(%massa)	(%massa)	(%massa)	(%massa)	(%massa)
CaO	62,45	61,73	66,04	64,34	42,53	42,05
SiO ₂	24,80	24,21	20,68	21,61	2,07	1,73
Al ₂ O ₃	2,78	3,53	4,03	2,87	29,77	30,92
Fe ₂ O ₃	3,10	3,07	3,14	4,24	21,31	21,03
MgO	3,11	3,17	0,80	1,48	0,32	0,31
TiO ₂	0,33	0,37	0,43	0,23	2,18	2,17
Na ₂ O	0,30	0,46	0,39	0,83	0,27	0,48
ZnO	0,24	0,13	0,48	0,16	0,06	0,45
SO ₃	1,29	1,52	2,20	2,17	0,15	0,18
Cr ₂ O ₃	-----	0,01	0,02	0,03	0,16	0,15
Cl	0,08	0,07	0,09	0,07	0,07	0,13
K ₂ O	0,22	0,38	0,30	0,39	0,09	0,09
NiO	0,01	0,01	0,01	0,01	0,08	0,07
P ₂ O ₅	0,12	0,08	0,15	0,12	0,04	0,07
ZrO ₂	0,04	0,05			0,06	0,06
SrO	0,17	0,20	0,26	0,20	0,04	0,04
MnO	0,06	0,11	0,04	0,11	0,02	0,02
As ₂ O ₃	-----	-----	-----	-----	-----	0,02
Nb ₂ O ₅	-----	-----	-----	-----	0,01	0,01
Ga ₂ O ₃	-----	-----	-----	-----	0,01	0,01
Y ₂ O ₃	0,00	0,00	-----	-----	0,01	0,01
PbO	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
ThO ₂	-----	-----	-----	-----	-----	0,00
N	0,90	0,86	0,95	1,13	0,74	-----
CuO	0,00	0,01	-----	0,01	-----	-----
Au ₂ O	-----	0,01	-----	-----	-----	-----
Rb ₂ O	-----	0,00	-----	-----	-----	-----

Como apresentado na Tabela 4.1 as amostras de argamassa dos isoladores de vidro dos anos de 1964, 1970, 1973 e 1976 apresentam diferenças significativas em relação às

amostras dos isoladores de vidro dos anos de 1984 e 1990. As principais diferenças são as quantidades de CaO e SiO_2 que são maiores nas amostras dos anos de 64-76 comparado com as amostras dos anos de 84 e 90, e as quantidades de Al_2O_3 e Fe_2O_3 que são menores nas amostras dos anos de 64-76 em relação as amostras dos anos de 84 e 90.

A presença de Si e Ca podem ser entendidas pelos silicatos de tricálcio (Ca_3SiO_5) e silicato dicálcio (Ca_2SiO_4), que são os principais componentes das argamassas. Também presentes nas argamassas estão aluminato tricálcio ($\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$), aluminato de ferrita tricálcio ($\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{Fe}_2\text{O}_6$). [21]

O aumento da quantidade de Al_2O_3 nas amostras dos anos de 84 e 90 ocorrem devido à adição de material pozzolânico, que pode ser natural ou sintético, silicoso ou silicoaluminoso que por si só não possui atividade hidráulica, mas quando finamente moído exibe a capacidade de se combinar com Ca(OH)_2 em meio aquoso e temperatura ambiente, proporcionando formação de novos compostos com propriedades cimentíceas. O material pozzolânico reage com hidróxido de cálcio durante a reação de hidratação e forma silicato de cálcio hidratado, reduzindo o tamanho dos poros dos produtos cristalinos [22].

Reduzir a porosidade das argamassas é desejado, pois aumenta o tempo de vida útil do material, uma vez que o principal processo de corrosão do material é controlado pela difusão [23]. Os poros da argamassa retirada de um isolador de vidro de alta tensão podem ser visto na Figura 4.1.



Figura 4.1 – Fotografia da argamassa retirada de um isolador de vidro de alta tensão.

4.2 Identificação das Fases Cristalinas por Difração de Raios-X

Nos espectros de difração de raios-x podemos identificar as diferenças de fases cristalinas nas argamassas estruturais dos isoladores de vidro devido ao ano de fabricação. As amostras dos anos de 1964, 1970, 1973 e 1976 apresentam grande semelhança nas fases cristalinas, que diferem muito das amostras dos anos de 1984 e 1990, as quais se assemelham. Os espectros de difração de raios-X das amostras de argamassa estrutural dos isoladores de vidro de alta tensão podem ser vistos na Figura 4.2.

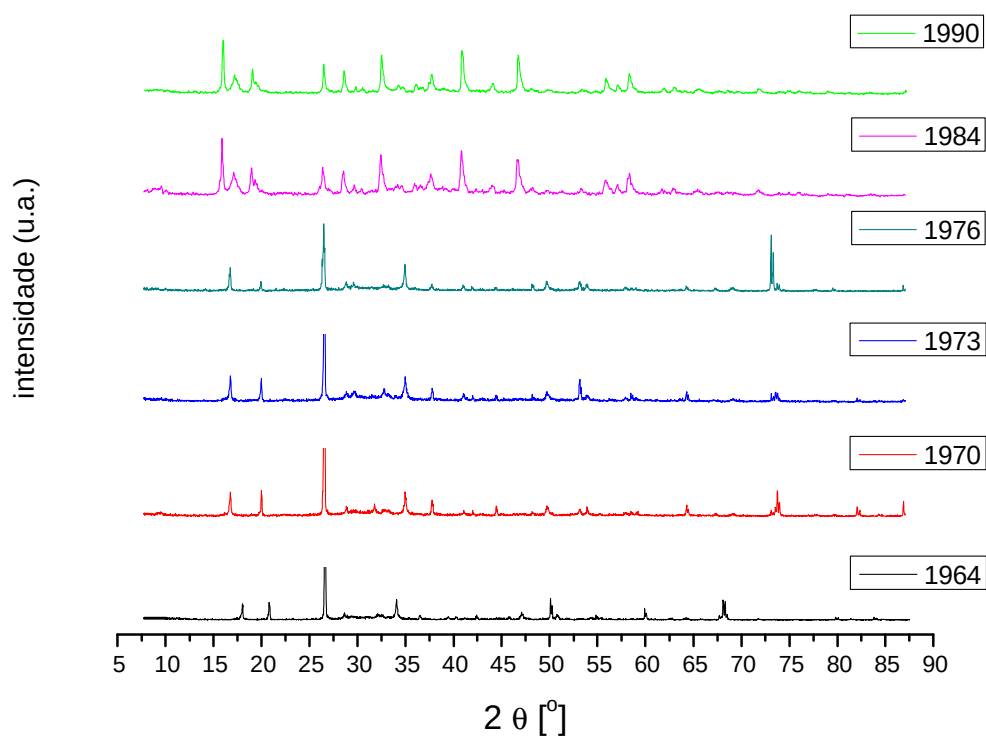


Figura 4.2 - Difratoograma das amostras de argamassa estrutural dos isoladores de vidros fabricados nos anos de 1964, 1970, 1973, 1976, 1984 e 1990.

O difratograma apresentado na Figura 4.2 mostra que as semelhanças das fases cristalinas podem ser separadas em dois grupos, vamos tratar detalhadamente as amostras dos extremos cronológicos.

Da amostra de argamassa estrutural do isolador de vidro para alta tensão fabricado no ano de 1964 foi possível identificar as fases cristalinas SiO_2 (Quartz) e Ca(OH)_2 (Portlandite), como observado na figura 4.3.

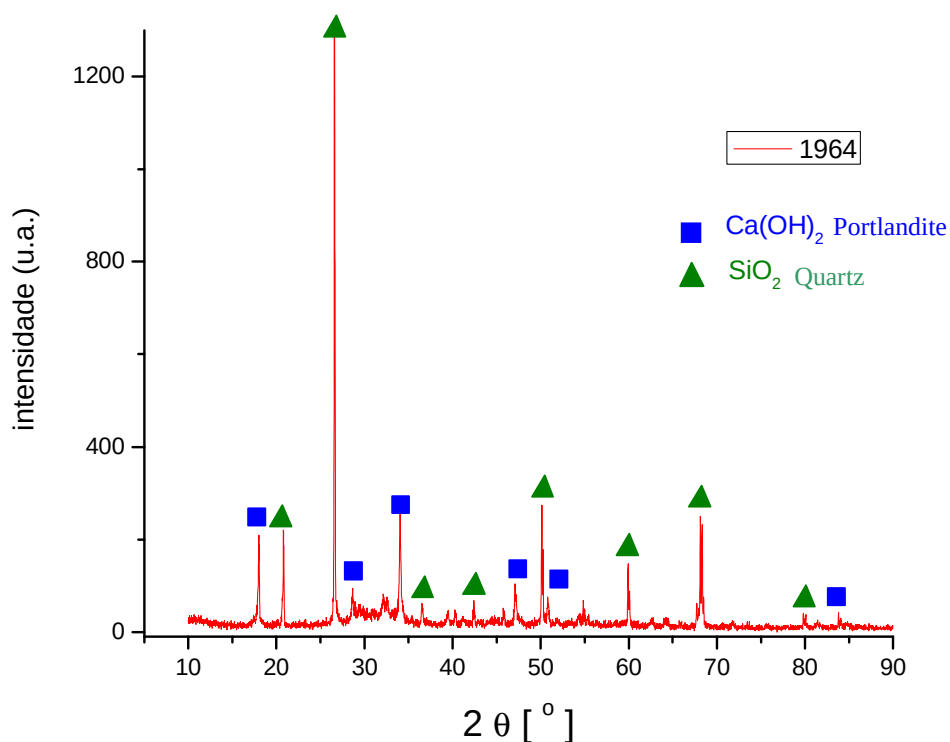


Figura 4.3 - Difratoograma da amostra de argamassa estrutural do isolador de vidro fabricado no ano de 1964.

A principal fase cristalina da argamassa estrutural do isolador de vidro para alta tensão fabricado no ano de 1990 é denominada Katoite $\text{Ca}_3\text{Al}_2(\text{OH})_{12}$ e pode ser visto na Figura 4.4.

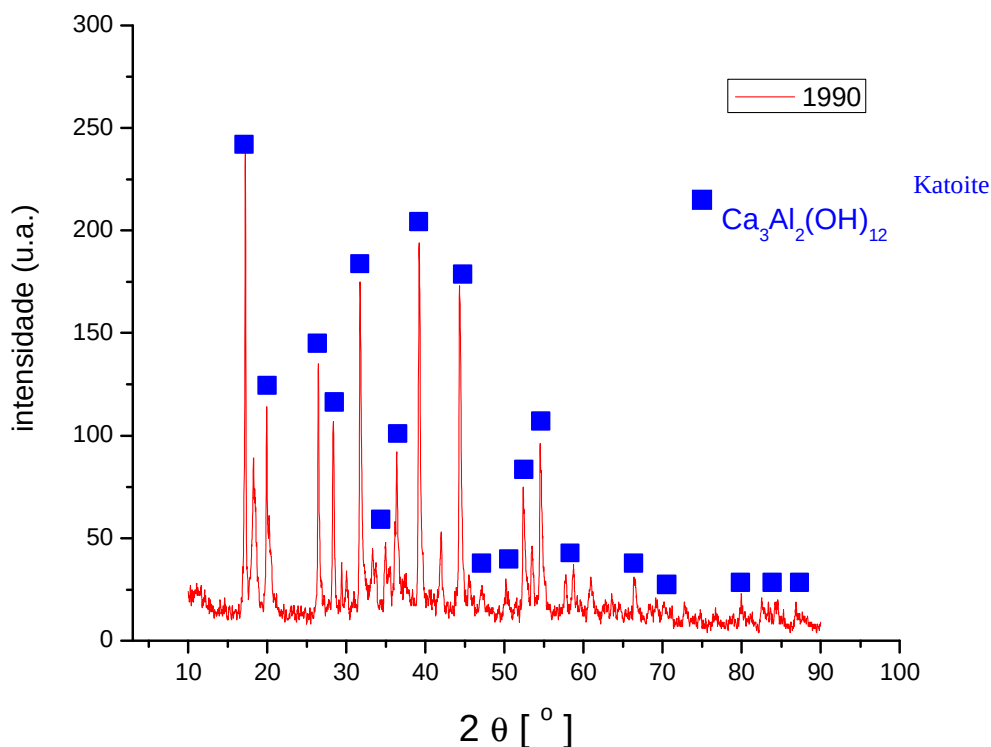


Figura 4.4 - Difratoograma da amostra de argamassa estrutural do isolador de vidro fabricado no ano de 1990.

Os resultados obtidos nos ensaios de difração de raios-X apresentam uma mudança das argamassas dos isoladores fabricados nos anos de 1984 e 1990 quando comparadas com as argamassas dos isoladores fabricados de 1964 até 1976. Essa variação das fases cristalinas é coerente com as mudanças das composições desses materiais verificadas por fluorescência de raios-X.

4.3 Análise Microestrutural por Espectroscopia de Infravermelho

Os espectros de infravermelho apresentam diferenças nas composições das argamassas estruturais dos isoladores de vidro de alta tensão. As amostras das argamassas estruturais retiradas dos isoladores fabricados nos anos 1964, 1970, 1973 e 1976 apresentam uma banda de absorção que não está presente nos espectros de infravermelhos das amostras de argamassa estrutural retirada dos isoladores fabricados nos anos de 1984 e 1990. Os espectros de infravermelho das amostras de argamassa estrutural retirada dos isoladores de vidro de alta tensão fabricados nos anos de 1964, 1970, 1973, 1976, 1984 e 1990 são apresentados na Figura 4.5.

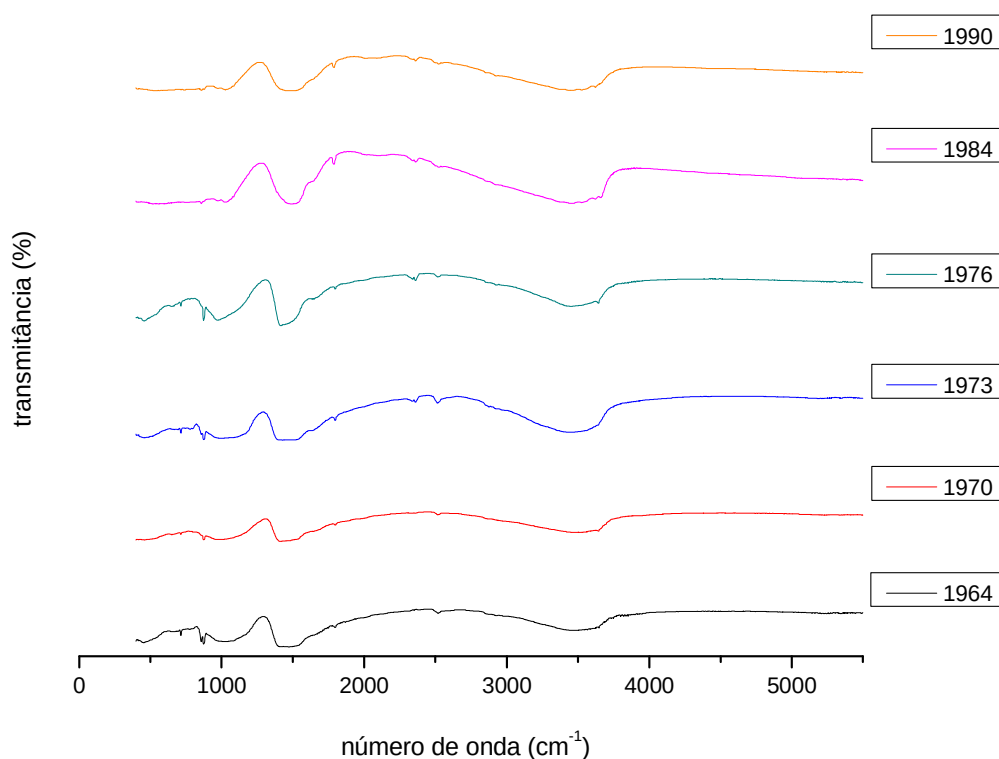


Figura 4.5 - Espectroscopia de infravermelho das amostras de argamassa estrutural dos isoladores de vidro para alta tensão fabricados nos anos de 1964, 1970, 1973, 1976, 1984 e 1990.

As bandas de absorção das argamassas estruturais dos isoladores de vidro fabricados nos anos de 1964, 1970, 1973 e 1976 apresentam uma banda de absorção na faixa de $790\text{-}400\text{ cm}^{-1}$, o que não ocorre nas amostras de argamassa estrutural dos isoladores de vidro fabricados nos anos de 1984 e 1990.

Para melhor visualização da diferença de absorção nessa banda os espectros de infravermelho foram sobrepostos e detalhados nessa região. O detalhe da banda de absorção pode ser observado na Figura 4.6.

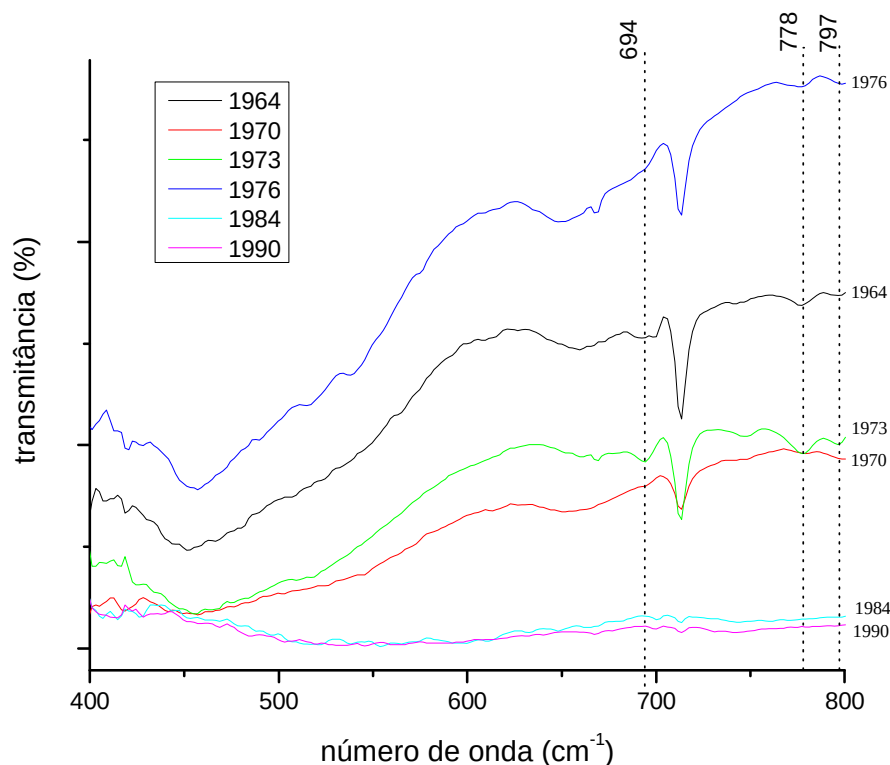


Figura 4.6 - Espectroscopia de infravermelho das amostras da argamassa estrutural detalhando banda na faixa espectral de 400-800 cm^{-1} .

As bandas identificadas no espectro de infravermelho detalhado são bandas de absorção do SiO_2 , que são apresentadas nas amostras da argamassa estrutural dos isoladores de vidro fabricados nos anos de 1964, 1970, 1973 e 1976.

O íon $(\text{OH})^-$ é caracterizado por formar uma banda na faixa de 3700-3500 cm^{-1} , essa banda não pode ser observada devido as sobreposições de bandas no espectro de infravermelho [24].

As bandas de 3645-1622 cm^{-1} são traços da quantidade de água presente.

Destaca-se que os resultados obtidos nas técnicas avançadas de caracterização dos materiais utilizadas estão bem coerentes e se complementam. A presença da banda de absorção na faixa de 400-800 cm^{-1} nas amostras de argamassa retirada dos isoladores fabricados nos anos de 1964 até 1976 é devido à presença da grande quantidade de quartzo, que foi detectada por fluorescência e difração de raios-X.

4.4 Análise de Microdureza

Na tentativa de relacionar as características físicas com as propriedades mecânicas das argamassas estruturais foram realizadas análises de microdureza. A região das amostras que sofreram penetração no ensaio de microdureza pode ser visto na Figura 4.7.

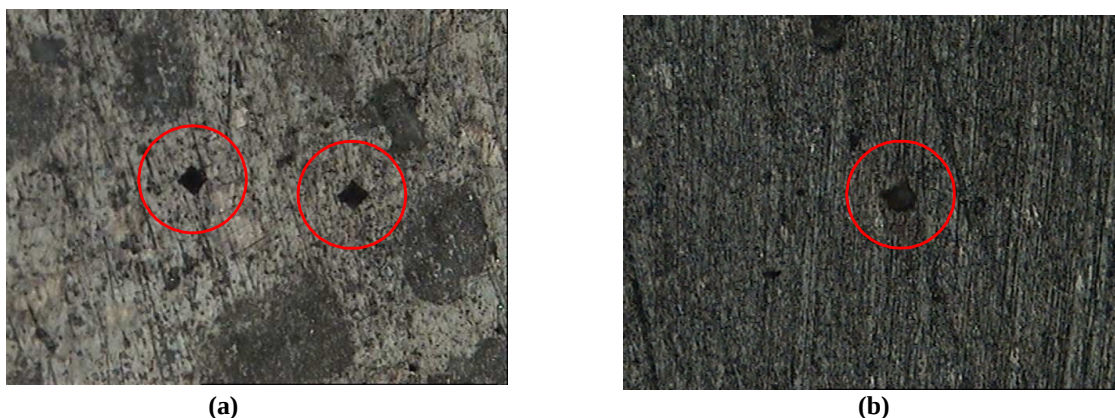


Figura 4.7 – Micrografia óptica 400 x, argamassa estrutural do isolador de vidro, fabricado no ano de 1964 (a); fabricado em 1990 (b).

As micrografias da Figura 4.7 apresentam indicativos das diferenças de dureza entre as argamassas estruturais dos isoladores em função do ano de fabricação. As penetrações foram feitas com condições idênticas em ambas as amostras, dessa forma destaca-se a diferença na forma da indentação em cada amostra. Na amostra de argamassa do isolador fabricado em 1964 a forma da indentação está bem definida, indicando uma boa penetração.

A relação da propriedade mecânica das argamassas estruturais em função do ano de fabricação é mostrada na Figura 4.8.

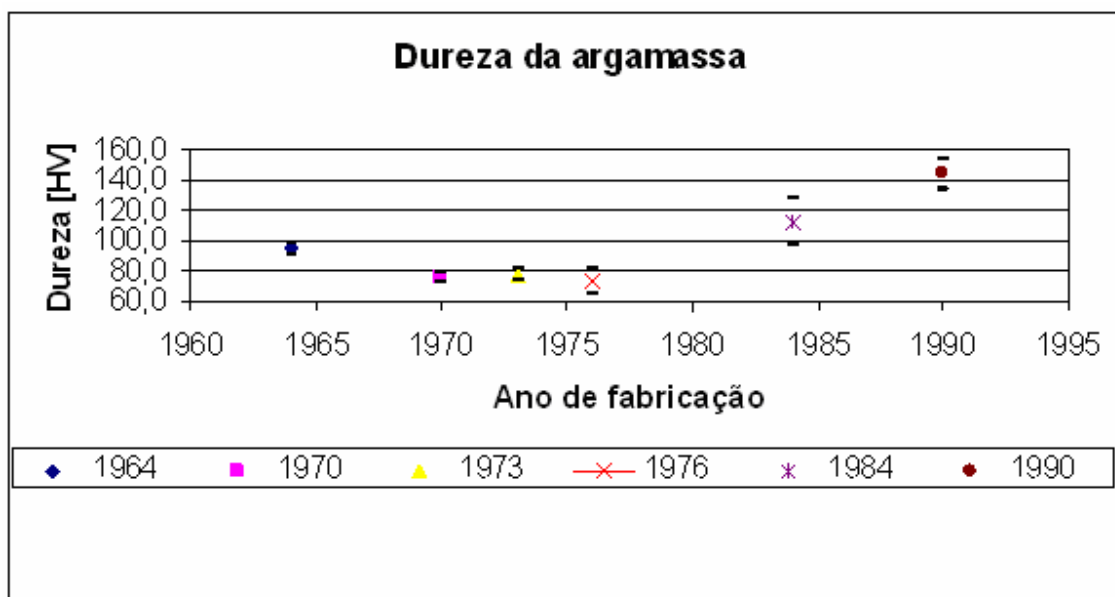


Figura 4.8 – Dureza da argamassa em função do ano de fabricação.

A dureza superficial das amostras de argamassa estrutural apresenta uma relação com o ano de fabricação dos isoladores, que está diretamente ligada às características microestruturais das amostras verificadas nos resultados anteriores. As amostras de argamassa estrutural dos isoladores de vidro fabricados em 1984 e 1990 apresentam uma dureza superficial maior do que as amostras de argamassa estrutural dos isoladores de vidro fabricados de 1964 a 1976. Esse aumento de dureza em função do ano de fabricação pode ser devido ao aumento da quantidade de Al_2O_3 adicionado na composição das argamassas fabricadas nos anos de 1984 e 1990, que foram caracterizadas nos ensaios de fluorescência de raios-X. A alumina (Al_2O_3) é um material bem conhecido por possuir uma elevada dureza.

4.5 Caracterização Mecânica da Argamassa para Fixação do Novo Pino Metálico

Com o isolador de vidro utilizado em linhas de transmissão que foi condenado segundo os setores elétricos devido à corrosão do pino metálico pronto para receber um novo pino, foram realizados testes para caracterização de uma nova argamassa estrutural para fixar um pino metálico novo ao disco de vidro dos isoladores. O isolador de vidro utilizado nas linhas de transmissão pronto para receber um pino metálico novo pode ser visto na Figura 4.9.



Figura 4.9 - Isolador de vidro sem pino metálico que sofreu corrosão.

Para a fixação do pino metálico ao disco de vidro temperado do isolador é necessária a aplicação de uma argamassa que tenha resistência mecânica suficiente para suportar cargas devido ao peso dos cabos condutores e à ação do vento. Foram testados diferentes tipos de argamassas e grout para fixação do pino metálico no isolador de vidro. Os materiais estudados estão indicados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 Materiais usados para testes.

Argamassa	Grout
Quartzolit	Quartzolit
Portokoll	Sika

Foram realizados ensaios no estado anidro, fresco e endurecido nesses materiais.

➤ Dados no estado anidro:

Foram realizados ensaios dos materiais no estado anidro, ou seja, antes da adição de água. O resultado dos ensaios de densidade no estado anidro (material sem adição de água) pode ser visto na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Resultados dos ensaios de densidade no estado anidro.

Material	Densidade (g/cm ³)
Grout quartzolit	1,6
Sika grout	1,8
Argamassa quartzolit	1,6
Argamassa portokoll	1,7

Os testes de densidade no estado anidro foram realizados no intuito de caracterizar os materiais utilizados em função do preenchimento de vazios. Com base nos dados obtidos observa-se que os materiais utilizados não apresentam variação significativa de suas densidades.

A composição granulométrica foi realizada definir um tamanho de grão adequado que não interfira na introdução do pino metálico. O resultado do teste granulométrico pode ser visto na Figura 4.10.

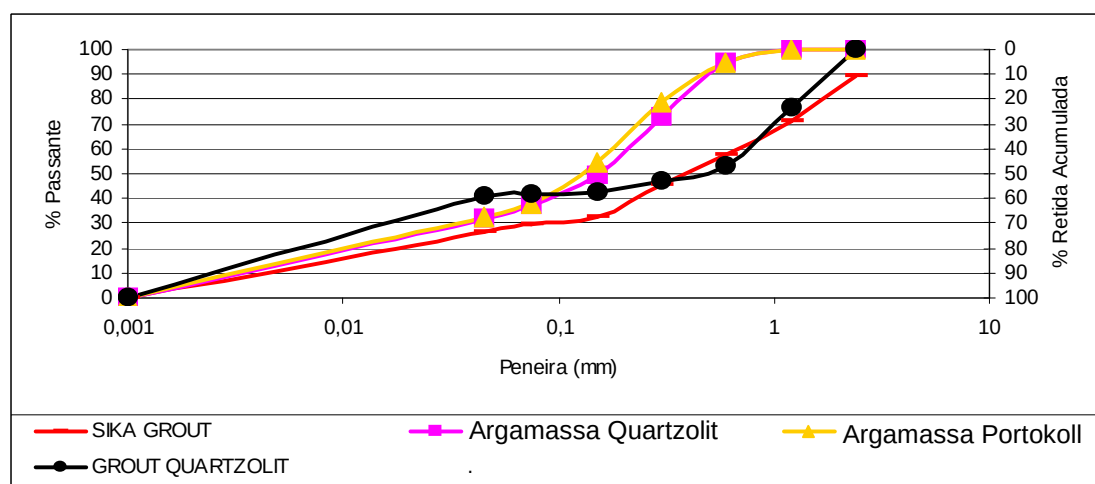


Figura 4.10 – Curva granulométrica dos materiais.

Os resultados obtidos demonstraram que até 0,1mm de abertura os materiais utilizados são similares quanto à distribuição do tamanho de grão. Com abertura de 0,1 mm a 1 mm os materiais argamassa quartzolit e argamassa portokoll apresentam maior quantidade de materiais passantes, ou seja, possuem maior quantidade de materiais com tamanho de grão menor, dessa forma se apresentam como os materiais mais adequados para fixar o pino metálico sem apresentar grandes obstáculos na introdução do pino.

➤ Dados no estado fresco:

No estado fresco foi realizado o ensaio de espalhamento, esse ensaio define qual a melhor relação água / material seco para obter uma boa trabalhabilidade com menor quantidade de água possível, pois já é sabido que maior quantidade de água, menor resistência mecânica final. Os resultados dos testes de espalhamento podem ser vistos na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Ensaio de espalhamento

Material	Argamassa portokoll	Grout quartzolit	Argamassa quartzolit	Sika Grout
Água/Mat Seco	Espalhamento (cm)	Espalhamento (cm)	Espalhamento (cm)	Espalhamento (cm)
0,08	---	---	---	175
0,09	---	21	---	256
0,095	---	21,5	---	---
0,1	---	---	---	285
0,1025	---	26	---	---
0,1125	---	29,75	---	---
0,16475	15,75	---	---	---
0,18975	16,75	---	---	---
0,19	---	---	175	---
0,21475	19,5	---	210	---
0,22	---	---	---	---
0,24475	25,5	---	262,5	---
0,25	---	---	---	---
0,26475	0,26475	---	---	---

Os resultados dos ensaios de espalhamento foram agrupados em formato de gráfico para melhor visualização. O gráfico pode ser visto na Figura 4.11.

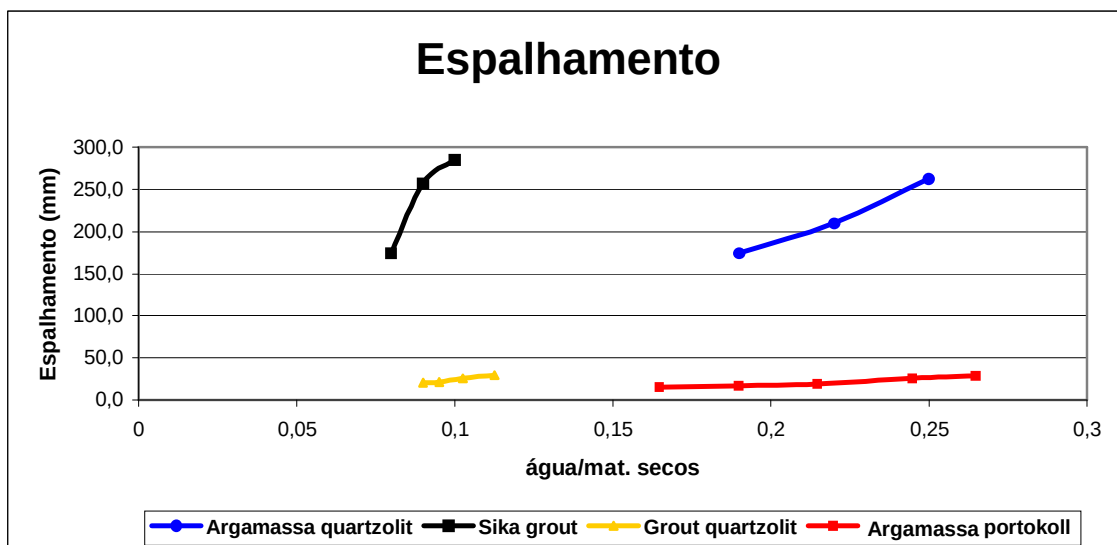


Figura 4.11 – Teste de espalhamento dos materiais.

Com os dados do ensaio de espalhamento pode-se notar que o material sika grout apresenta o melhor espalhamento com menor quantidade de água e a argamassa quartzolit apresenta o melhor espalhamento com uma quantidade de água maior.

➤ Dados no estado endurecido

Para os ensaios no estado endurecido foi selecionada a argamassa quartzolit, pois apresenta um bom desempenho no ensaio granulométrico e um bom espalhamento. Com os corpos de prova preparados, foram realizados ensaios de flexão três pontos e compressão com idades diferentes. As amostras foram levadas a uma câmara úmida até o dia do ensaio.

Inicialmente foi realizado o ensaio de flexão três pontos, o qual rompe o corpo de prova em duas partes iguais. O ensaio de flexão três pontos pode ser visto na Figura 4.12.



Figura 4.12 – Ensaio de flexão três pontos.

O ensaio de flexão três pontos foi realizado em amostras com 14 e 30 dias de idade. Os resultados podem ser vistos na Figura 4.13.

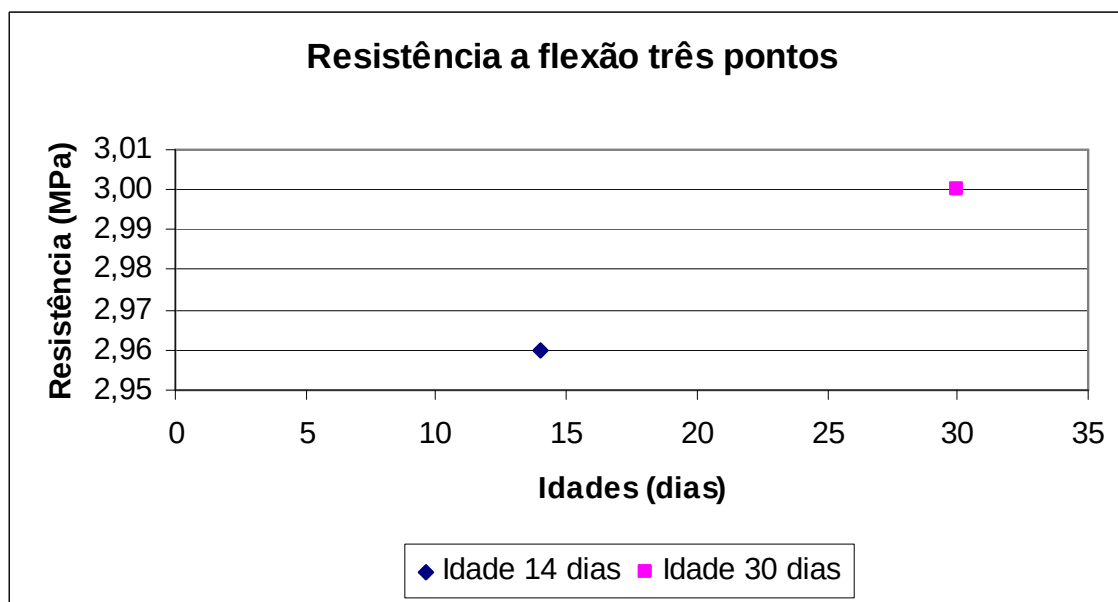


Figura 4.13 – Ensaio de flexão três pontos da argamassa quartzolit.

Com os dados obtidos dos ensaios de flexão três pontos, nota-se que a resistência mecânica a flexão da argamassa quartzolit sofre uma pequena variação em função do tempo de cura.

Após cada ensaio de flexão três pontos foram realizados ensaios de compressão das metades de cada amostra que foram rompidas no ensaio de flexão três pontos. O ensaio de compressão pode ser visto na Figura 4.14.

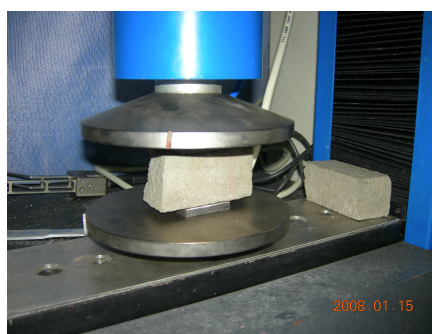


Figura 4.14 – Ensaio de compressão.

Os resultados dos ensaios de compressão da argamassa quartzolit podem ser vistos na Figura 4.15.

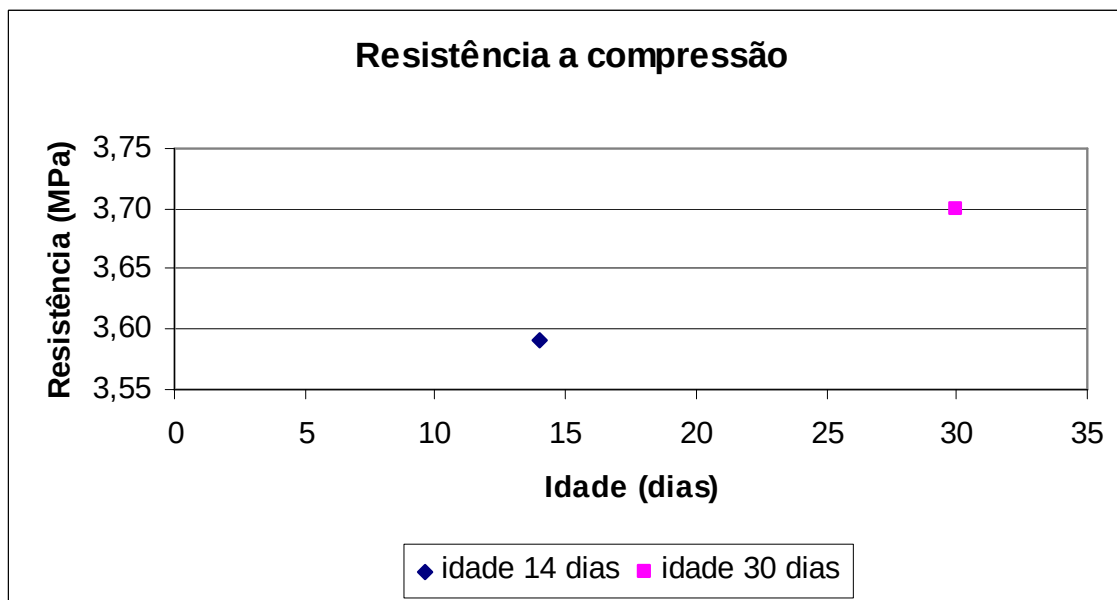


Figura 4.15 – Ensaio de compressão da argamassa quartzolit.

Os resultados dos ensaios de resistência a compressão determinam que não existe uma variação significativa da resistência mecânica em função da idade da argamassa quartzolit.

Realizada a caracterização mecânica da argamassa quartzolit será realizado o teste de fixação do novo pino metálico ao isolador de vidro com esse material.

4.6 Ensaio de Resistência Mecânica a Tração do Isolador com o Pino Metálico Novo

Foram realizados ensaios de tração dos isoladores de vidro para verificar a resistência mecânica a tração da fixação dos pinos metálicos aos discos de vidro dos isoladores utilizando a argamassa quartzolit. Os ensaios foram realizados com argamassas de 03, 07, 14 e 28 dias de idade. O ensaio de tração pode ser visto na Figura 4.16.



Figura 4.16 – Ensaio de tração da fixação do pino com argamassa quartzolit.

O ensaio de tração da fixação do pino metálico com argamassa quartzolit foi realizado em amostras com 03, 07, 14 e 28 dias de idade para avaliar a variação de resistência mecânica em função do tempo. Os resultados podem ser vistos na Figura 4.17.

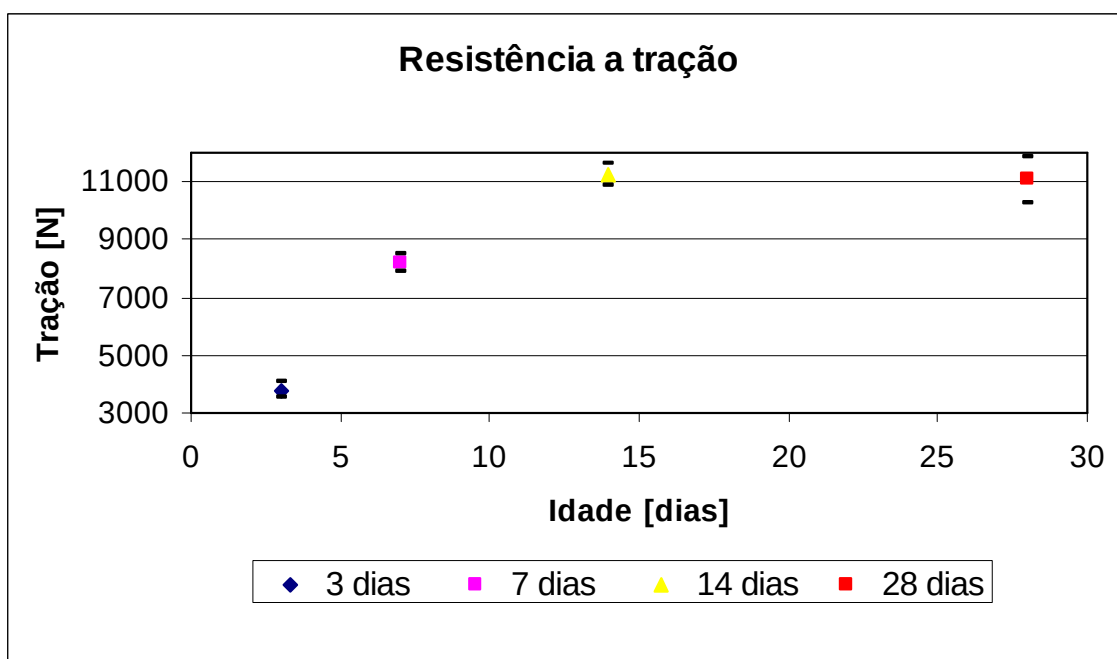


Figura 4.17 – Ensaio de tração com idades diferentes para argamassa quartzolit.

Com base nos resultados apresentados na Figura 4.17 fica claro que a argamassa quartzolit não foi adequada para fixar o pino metálico ao disco de vidro do isolador, pois suportou no máximo uma carga de aproximadamente 11000 N. As normas

regulamentadoras dos setores elétricos exigem uma resistência mínima de 80000 N. Dessa forma, é necessário testar outros materiais para fixar o pino metálico à parte vítrea do isolador.

Avaliando os resultados dos testes no estado anidro e fresco, nota-se que o material grout apresenta boas características para fixar o pino metálico ao isolador de vidro, portanto será realizada a caracterização das propriedades mecânicas do grout e em função desses resultados, testes de fixação do pino metálico ao disco de vidro utilizando esse material.

Inicialmente foi realizado o ensaio de flexão três pontos, o qual rompe o corpo de prova em duas partes iguais. O ensaio de flexão três pontos pode ser visto na Figura 4.18.



Figura 4.18 – Ensaio de flexão três pontos do grout quartzolit.

Os resultados dos ensaios de flexão três pontos do grout quartzolit foram comparados com os resultados dos ensaios de flexão três pontos da argamassa quartzolit. Os resultados podem ser vistos na Figura 4.19.

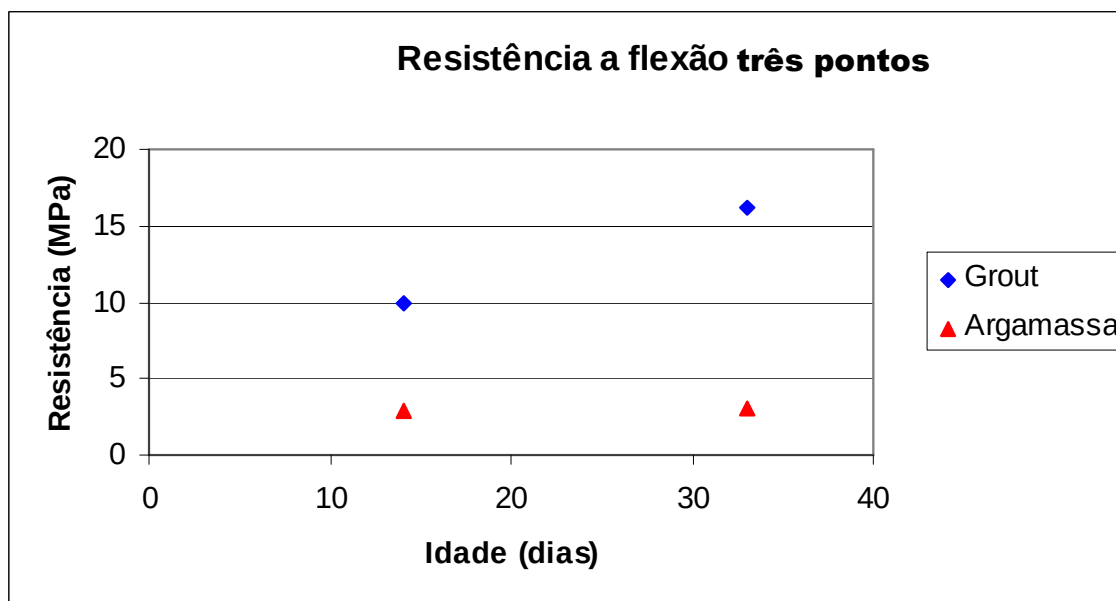


Figura 4.19 – Ensaio de flexão três pontos do grout quartzolit e da argamassa quartzolit.

Com base nos resultados de flexão três pontos do grout quartzolit e argamassa quartzolit, fica evidente que o material grout possui uma resistência mecânica a flexão maior que a argamassa quartzolit. Nota-se que a resistência mecânica do grout quartzolit aumentou em função da idade.

Após cada ensaio de flexão três pontos foram realizados ensaios de compressão das metades de cada amostra que foram rompidas no ensaio de flexão três pontos. O ensaio de compressão pode ser visto na Figura 4.20.



Figura 4.20 – Ensaio de compressão do grout quartzolit

Os resultados dos ensaios de compressão do grout quartzolit foram comparados com os resultados dos ensaios de compressão da argamassa quartzolit. Os resultados podem ser vistos na Figura 4.21.

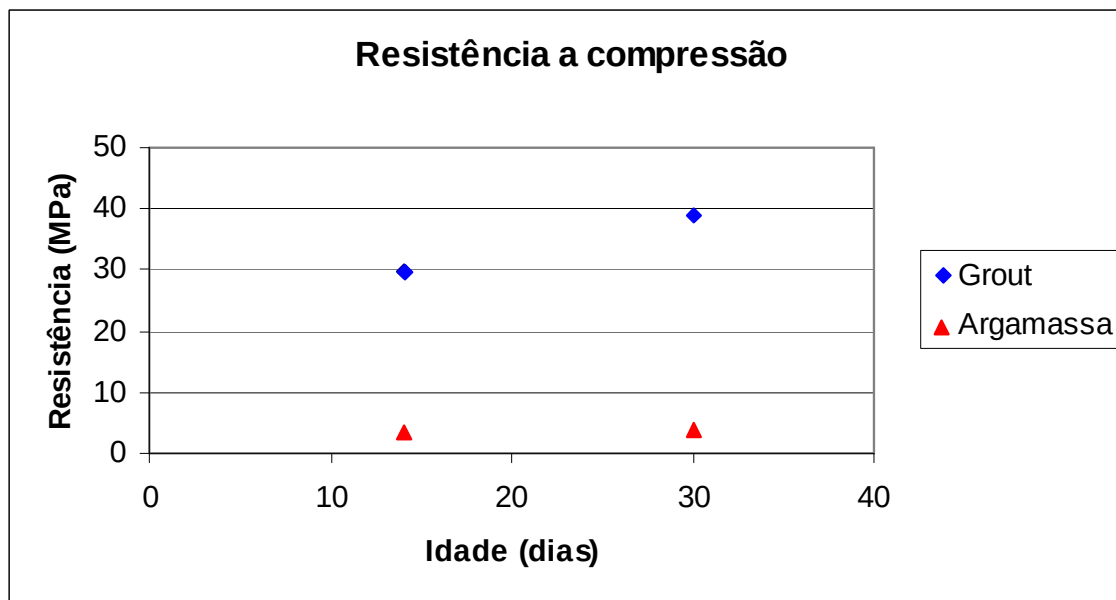


Figura 4.21 – Ensaio de compressão do grout quartzolit e da argamassa quartzolit.

Os resultados dos ensaios de compressão provam que o grout quartzolit apresenta resistência mecânica maior quando comparado com a argamassa quartzolit. Fica claro que existe uma variação da resistência mecânica do grout quartzolit em função da idade.

Com melhores características mecânicas que a argamassa quartzolit, o grout quartzolit será empregado para fixação do pino metálico ao disco de vidro do isolador.

Os detalhes para fixação do pino metálico ao disco de vidro utilizando grout quartzolit são equivalentes ao processo utilizando argamassa quartzolit. O ensaio de tração pode ser visto na Figura 4.22.

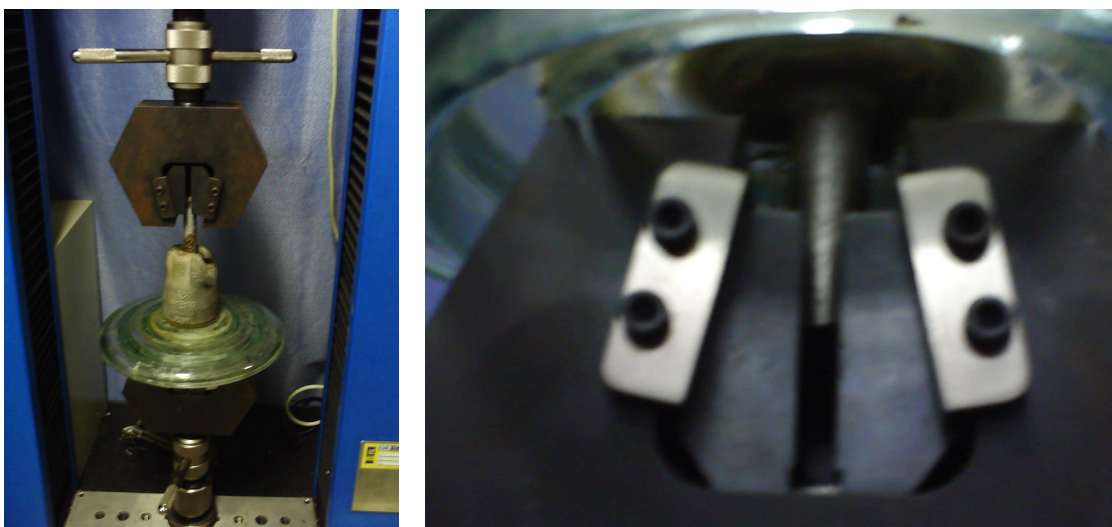


Figura 4.22 – Ensaio de tração da fixação do pino com grout quartzolit.

O ensaio de tração da fixação do pino metálico com grout quartzolit foi realizado em uma amostra com idade de 14 dias. Esse ensaio de resistência mecânica à tração do isolador de vidro com o pino metálico novo fixado com grout quartzolit foi realizado até uma carga máxima de 76767 N. Não foi possível submeter o isolador a cargas mais elevadas devido a danos ocorridos com os mordentes da garra da máquina de tração. Após o ensaio o isolador não apresentava nenhum dano visível. Dado o estado do isolador de vidro, deduziu-se que o mesmo suportaria cargas superiores a 76767 N, que está bem próxima da carga mínima exigida pelos setores elétricos (80000 N). Destaca-se que o material utilizado apresentou um aumento da resistência mecânica em função do tempo de cura nos ensaios de flexão três pontos e compressão, e como o ensaio foi realizado com um isolador com idade de 14 dias, fica entendido que com maior tempo de cura, o isolador atinge uma resistência mecânica à tração muito superior ao exigido pelos setores elétricos.

4.7 Avaliação da Aplicação de Nanotecnologia na Redução de Acúmulo de Poluentes

Para avaliar a aderência da gota sobre a superfície do isolador, a lâmina de vidro foi inclinada de forma gradual e verificado em qual ângulo de inclinação da lâmina a gota começava a deslizar, em cada seção, como mostrado na Figura 4.23.



Figura 4.23 – Teste da propriedade hidrofóbica do filme ultrafino da Nanotec.

A última gota, a qual estava sobre a superfície tratada com duas camadas do filme ultrafino hidrofóbico só foi deslizar com um ângulo de inclinação de 80° enquanto que a gota que estava sobre a superfície tratada com uma camada do produto não deslizou nem com um ângulo de inclinação de 90° .

No término da aplicação do filme ultrafino hidrofóbico e preparação das cadeias de isoladores de vidro das linhas de transmissão, foram realizadas observações periódicas no intuito de caracterizar alguma melhoria ou mudança entre as superfícies que contém o filme e as superfícies que não foi aplicada o filme. Um detalhe foi observado após 60 dias de monitoramento e que coincidentemente foi no fim de uma chuva. As amostras dos isoladores que estavam com o filme apresentavam uma superfície repleta de gotas em contra partida, os isoladores que estavam sem o filme tinham sua superfície completamente secas. Esse detalhe pode ser observado na Figura 4.24.



Figura 4.24 – Cadeia de isoladores após 60 dias sem o filme (a); e com o filme (b).

Com as observações apresentadas, fica claro que a aplicação do filme ultrafino hidrofóbico altera a superfície dos isoladores de vidro das linhas de transmissão. Para compreensão do fenômeno observado, utiliza-se o entendimento do teste de inclinação realizado na placa de vidro. Nesse teste foi demonstrado que a gota de água permanece sobre a superfície da placa de vidro com aplicação de duas camadas do filme ultrafino hidrofóbico com uma inclinação de até 80° e com uma camada de até 90° . Dado esse fator fica claro que as gotas permaneçam na superfície dos isoladores devido ao baixo ângulo de inclinação. O fato da superfície vítrea do isolador sem a aplicação do filme ultrafino hidrofóbico estar completamente seco ocorre devido às gotas de água se espalharem sobre essa superfície (diferente do que ocorre na superfície vítrea do isolador com aplicação do filme ultrafino hidrofóbico) evaporando mais rapidamente.

Com relação aos testes de rigidez dielétrica dos isoladores sem e com aplicação do filme ultrafino hidrofóbico, nenhuma diferença significativa foi observada, tanto para os testes a seco como sob condições de chuva.

5. CONCLUSÕES

5.1 Conclusões

Na presente pesquisa foi realizada a recuperação dos isoladores de vidro condenados por corrosão dos pinos metálicos, focando o trabalho de pesquisa na argamassa de fixação do pino metálico ao disco de vidro, e visando a avaliação de redução do acúmulo de poluentes sobre a parte vítrea usando nanotecnologia.

De acordo com os resultados do estudo realizado nas argamassas estruturais dos isoladores de vidro para linhas de alta tensão, podemos concluir que a técnica de difração de raios-x determinou diferenças nas fases cristalinas entre as argamassas empregadas em isoladores fabricados nos anos de 1964 a 1976, em relação aos isoladores fabricados em anos posteriores, evidenciando assim que houve mudança no tipo de argamassa empregada. As mudanças significativas das fases cristalinas das argamassas se tornam presentes apenas no decorrer de duas décadas de fabricação dos isoladores, e está confirmada através de análise química por fluorescência de raios-X. As análises de infravermelho foram eficientes no intuito de confirmar as afirmações obtidas por difração de raios-x. Os resultados dos testes de microdureza apresentam uma relação entre as propriedades mecânicas e a microestrutura.

Com os dados obtidos fica evidente a diminuição das quantidades de SiO_2 e Ca(OH)_2 e aumento de Al_2O_3 e Fe_2O_3 na composição da argamassa estrutural dos isoladores de vidro. Esses resultados comprovam a substituição gradual da argamassa de cimento Portland para argamassa de cimento Aluminoso, de maior resistência mecânica à tração.

Para fixar um novo pino metálico ao disco de vidro, foi necessidade o estudo das propriedades reológicas das argamassas estruturais. Após uma série de experimentos das argamassas hidratadas, a pesquisa foi completada com ensaios mecânicos para determinar o tipo de argamassa mais interessante, que foi o grout quartzolit.

O processo de substituição do pino metálico do isolador de vidro para linhas de transmissão que sofreu corrosão foi realizado com sucesso.

Na obtenção de uma superfície auto-limpante com auxílio da nanotecnologia testado no presente trabalho, ficou evidente que existe um universo para ser explorado, como testes com isoladores de vidro com filme ultrafino hidrofóbico em campo. Os ensaios realizados

com o produto de nanotecnologia apresentam uma evidente alteração na superfície dos isoladores que contém o filme ultrafino em relação aos isoladores sem a presença do mesmo. O objetivo foi alcançado transformando a superfície vítrea do isolador em uma superfície hidrofóbica, de forma que as gotas de água formam sobre a superfície do isolador uma gota com ângulo bem elevado. Para determinar a eficiência do filme ultrafino como formador de uma superfície auto-limpante, redutor de acúmulo de poluente nos isoladores de vidro, é necessário à realização de ensaios complementares.

5.2 Trabalhos Futuros

Testar a reprodutibilidade do ensaio de resistência à tração do conjunto pino metálico, disco de vidro e campânula metálica fixados pela argamassa estrutural empregada;

Caracterização microestrutural da argamassa empregada utilizando as técnicas avançadas apresentadas nessa pesquisa;

Empregar os isoladores de vidro de alta tensão recuperados nas linhas de transmissão;

Realização de novos testes com filme ultrafino hidrofóbico nos isoladores de vidro para redução de acúmulo de poluentes.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] YANAGUIZAWA, J. A.; “Desenvolvimento e avaliação de um escudo polimérico para a quebra de isoladores de vidro por vandalismo em linhas de transmissão”, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Pernambuco, Recife-PE, 2003.
- [2] PAVLIK, B.L.; Tecnologia da ferragem para linhas de AT e EAT. 1.ed. São Paulo, Gente, 1989, 329p.
- [3] MELONI, A.E.M.; MORGENSTERN JR., A.; MELLO, D.R.; MAURÍCIO, M.R.D.; GARCIA, R.W.S.; Desenvolvimento de Novo Isolador Antipoluição com Perfil Aberto, Relatório Técnico CEPEL, 2003, 6 páginas.
- [4] COSTA JR, R.T.D.; BATISTA, J.T.; MELO, M.E.; Avaliação do Grau de Poluição em Instalações de Transmissão, Subestação e Distribuição, Relatório Técnico CEPEL, 1999, 4 páginas.
- [5] Materiais Autolimpantes: Composto se torna repelente à água conforme necessidade. Disponível em: <<http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=010160060913>>. Acesso em: 28 de Maio 2008.
- [6] Folha de Lótus: Inspiração para a micro e nanotecnologia. Disponível em: <http://lqes.iqm.unicamp.br/canal_cientifico/lqes_news/lqes_news_cit/lqes_news_2006/lqes_news_novidades_744.html>. Acesso em: 7 de Fevereiro 2008.
- [7] BERTIN, E.P.; Principles and practices of X-ray Spectrometric Analysis – London: Plenum Press, 1079 p, 1975.

- [8] LEDERER, C.M.; HOLLANDER, J.M.; PERLMAN, I., Table of Isotopes, 6a. ed. New York.
- [9] CALLISTER JR, W.D.; Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução Ed. LTC – 5ª edição. P. 02-03 (2002).
- [10] CULLITY, D.B.; Elements os X-Ray Diffraction, Addison – Wesley Publishing Company, INC, 2th Edition, Indiana, USA, 1978.
- [11] BLEICHER, L.; SASAKI, J.M.; Introdução à Difração de Raios-X em Cristais, Universidade Federal do Ceará, Setembro 2000.
- [12] PRADO, R.J.; Análise das Propriedades Químicas, Morfológicas e Estruturais de Filmes Finos de $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$ depositados por PECVD, Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo – Instituto de Física, São Paulo (2001).
- [13] Dureza Vickers (HV): Vantagens do ensaio vickers. Disponível em: <<http://www.em.pucrs.br/~eleani/Protegidos/16-%20vickers.doc>>. Acesso em: 5 de Março 2008.
- [14] Realmix concreto: Processo produtivo. Disponível em: <<http://www.realmixconcreto.com.br/processo/html/processo1.html>>. Acesso em: 20 de Janeiro 2008.
- [15] O grupo sika: Sika no Brasil. Disponível em: www.sika.com.br. Acesso em: 15 de Novembro 2007.
- [16] Argamassas colantes especiais: Porcelanato. Disponível em: <<http://www.portokoll.com.br/produtos.htm>>. Acesso em: 15 de Novembro 2007.
- [17] Weber quartzolit: Produtos. Disponível em: <www.quartzolit.com.br>. Acesso em: 15 de Novembro 2007.

- [18] CARASEK, H.; OLIVEIRA, A.M.; ARAÚJO, J.; Influência da Maturação da Cal Hidratada da Trabalhabilidade de Argamassas, In: Simpósio Brasileiro de Tecnologia das argamassas, 7. Recife, SBTA, 2007.
- [19] ALCANTARA, M.A.M.; LORRAIN, M.S.; BARBOSA, M.P.; Avaliação da Influência da Posição da Armadura no Desenvolvimento das Tensões de Aderência na Interface entre o Concreto Auto-Adensável e a Armadura, IBRACON - Volume V - Pré-Fabricados em Concreto - Trabalho CBC0165 - V.76.
- [20] Nanotec corporate: Nanotechnology surface protection treatments. Disponível em: <www.nanotec.com.au>. Acesso em: 10 de Novembro 2006.
- [21] NEWMAN, S.P.; CLIFFORD, S.J.; COVENEY, P.V.; GUPTA, V.; BLANCHARD, J. D.; SERAFIN, F.; BEN-AMOTZ, D.; DIAMOND, S.; Anomalous fluorescence in near-infrared Raman spectroscopy of cementitious materials. *Cemente and concrete research*, 35, (2005), 1620-1628.
- [22] CHINDAPRASIRT, P.; JATURAPITAKKUL, C.; SINSIRI, T.; Effect of fly ash fineness on microstructure of blended cement paste. *Construction and building materials*, (2006).
- [23] PAVLÍK, V.; UNCÍK, S.; The rate of corrosion of hardened cement pastes and mortars with additive of silica fume in acids. *Cemente and concrete research*, 27, (1997), 1731-1745.
- [24] ALPERT, N.L.; *Theory and Practice of Infrared Spectroscopy*. 2.ed. New York, Ed. Plenum Press, 1970, 380p.
- [25] LEITE, L.R.P.; YANAGUIZAWA, J.A.; SHINOHARA, A.H.; XAVIER, G.J.V.; Efeito da porosidade do cimento na tensão disruptiva de isoladores de vidro para linhas de transmissão. In: Congresso Brasileiro de Cerâmica, 49, 2005, São Pedro.

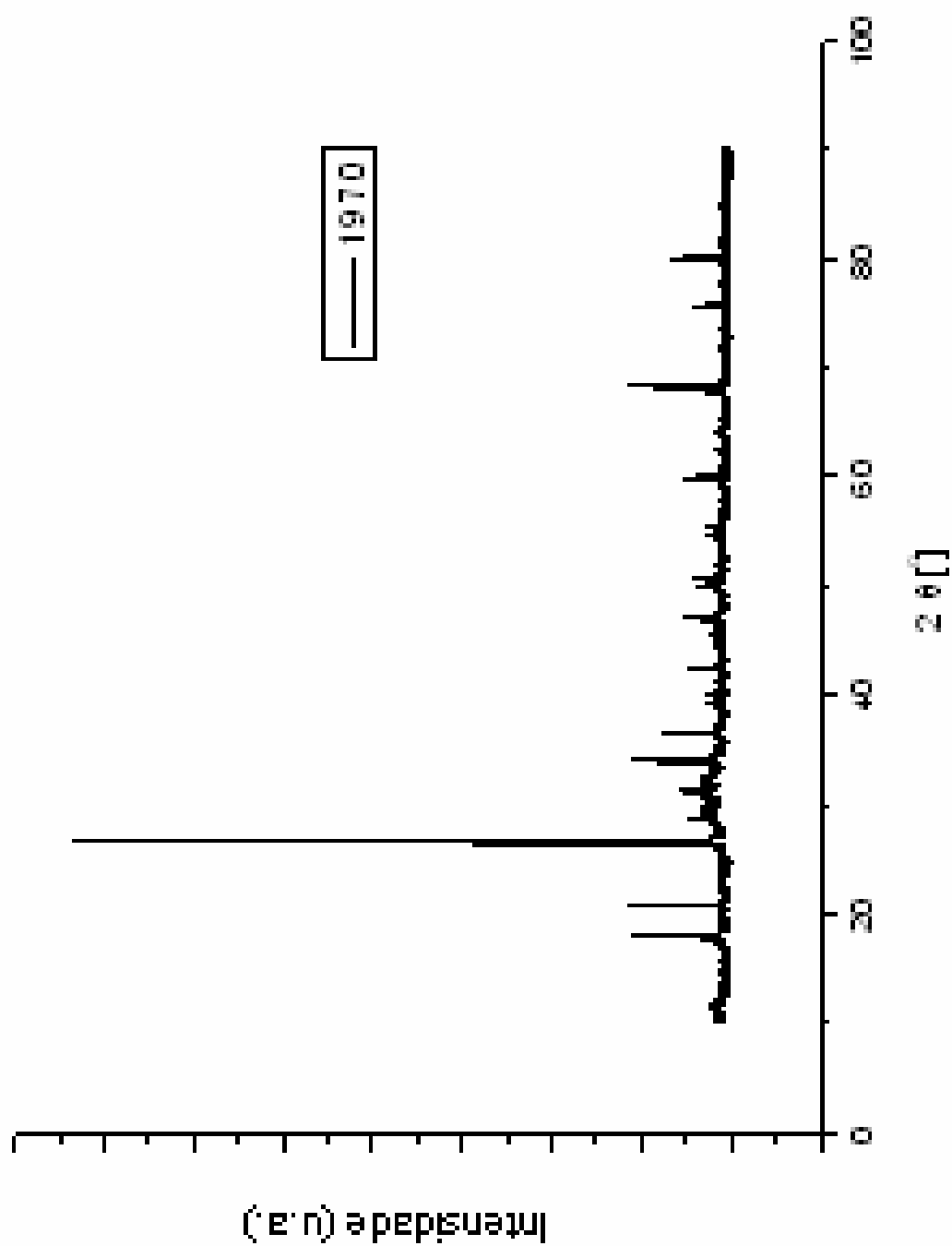
- [26] MIRANDA, J.M.; JIMÉNEZ, A. F.; GONZÁLEZ, J. A.; PALOMO, A.; Corrosion resistance in activated fly ash mortars. *Cement and concrete research*, 35, (2005), 1210-1217.
- [27] ALVES, J.D.; *Manual de Tecnologia do Concreto*. 2.ed. Goiânia, Ed. Universidade Federal de Goiás, 1982, 158p.
- [28] SMITH, B.C.; *Infrared spectral interpretation: a systematic approach*, CRC Press - 1999.
- [29] AMEMIYA, Y.; *Aplicações de métodos de Difração de raios-X: parte II Novas técnicas de Medição – Imaging Plate*, p. 59-68, 1993.
- [30] CHESF, Recife. SILT: Sistema de Informações de Linhas de Transmissão. Recife, 2001.
- [31] FUCHS, R.D.; *Transmissão de Energia Elétrica - Linhas aéreas*, v.1, LTC/EFEI, 1979.
- [32] DREXLER, K.E.; PETERSON, C.; PERGAMIT, G.; *Unbounding the Future - The Nanotechnology Revolution*, Quill, New York, 1991, 304 pages.
- [33] DREXLER, K.E.; *Nanosystems: Molecules, Machinery, Manufacturing and Computations*, John Wiley and Sons, New York, 1991, 556 pages.
- [34] LEWIS, K.J.; CRANDALL, B.C.; *Nanotechnology: Research and Perspectives*, MIT Press, Massachusetts, 1992, 381 pages.
- [35] GARDNER, J.W.; HINGLE, H.T.; *From Instrumentation to Nanotechnology*, Gordon & Breach Science, London, 1992.
- [36] VU, T.B.; GARCIA, N.; DRANSFELD, K.; *Nanosources and Manipulation of Atoms Under High Fields and Temperatures: Applications*, (NATO Asi Series. Series E : App.ied Sciences, Vol 235), Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1993.

- [37] BARD, A.J.; Integrated Chemical Systems: A Chemical Approach to Nanotechnology, Wiley-Interscience, New York, 1994, 324 pages.
- [38] NELSON, M.; SHIPBAUGH, C.; The Potential of Nanotechnology for Molecular Manufacturing, Elsevier Science Ltd, Amsterdam, 1995, 47 pages.
- [39] KRUMMENACKER, M.; LEWIS, J.; Prospects in Nanotechnology: Toward Molecular Manufacturing, John Wiley & Sons, New York, 1995, 297 pages.
- [40] REGIS, E.; Nano: The Emerging Science of Nanotechnology : Remaking the World-Molecule by Molecule, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1995.
- [41] D´AJUZ, A.; FONSECA, C.S.; CARVALHO, F.M.S.; Transitórios Elétricos e Coordenação de Isolamento, Editora EDUFF, 1987, 435 páginas.
- [42] MORITA, T.; ASSUMPÇÃO, R.M.; Manual de Soluções, Reagentes e Solventes, Editora Edgard Blucher LTDA, 1972, 629 páginas.
- [43] MONTENEGRO, I.N.S.; FILGUEIRA, A.R.M.; NETO, J.N.A.; Corrosão Atmosférica no Estado do Ceará, Anais do II CITENEL 2003, 20 páginas.
- [44] RAGO, F.; CINCOTTO, M.A.; Influência do Tipo de Cal Hidratada na Reologia de Pastas. São Paulo, BT/PCC – USP, 1999.
- [45] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBRNM 248. Agregados e Determinação da Composição Granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.
- [46] CARNEIRO, A.M.P.; Contribuição ao Estudo da Influência do Agregado nas Propriedades de Argamassas Compostas a partir de Curvas Cranulométricas. Tese – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

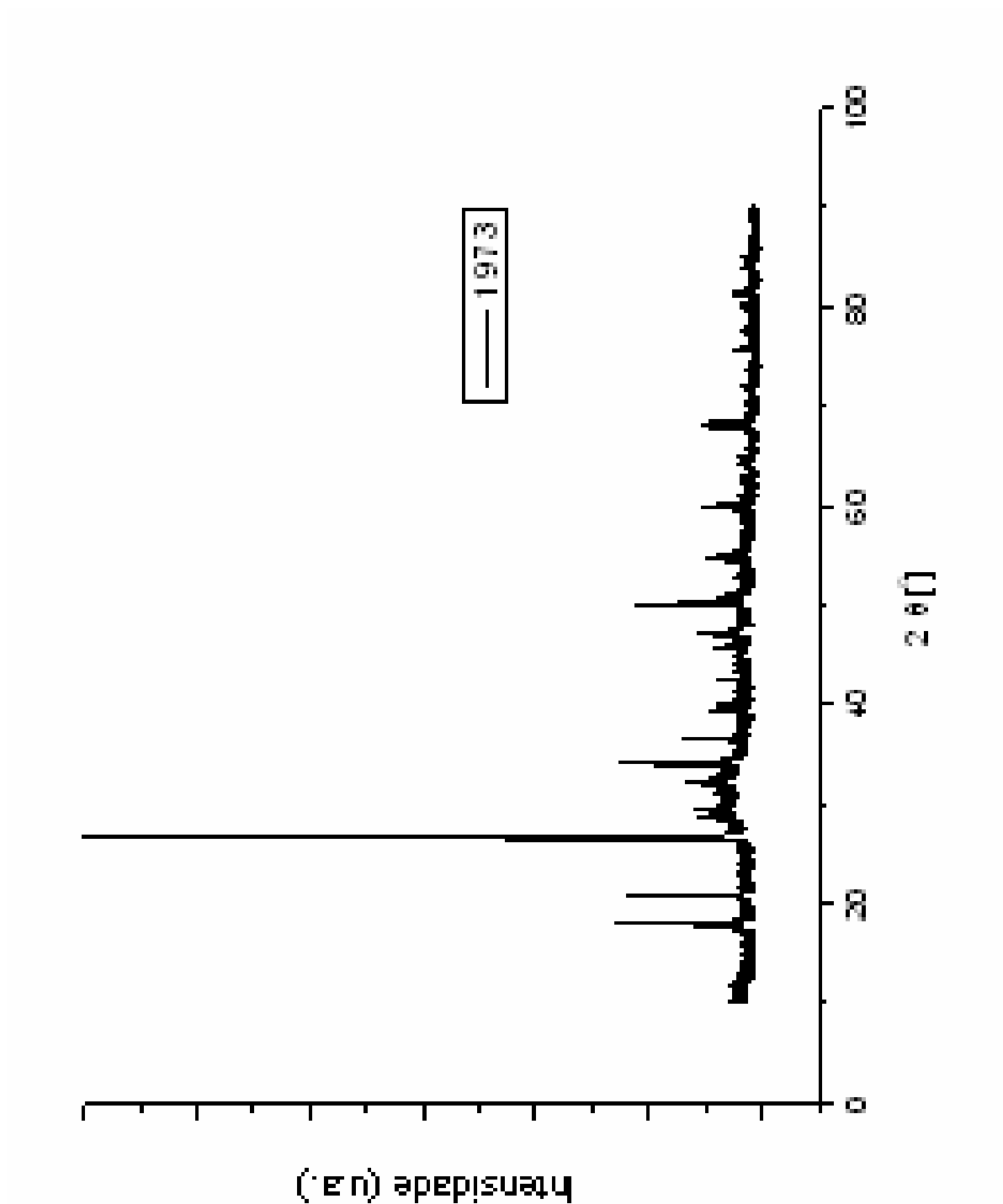
- [47] SARMIENTO, C.R.; FREIRE, W.J.; Argamassa de Cimento e Areia Combinada com Fibras de Bagaço de Cana-de-Açúcar, Eng. Agríc., Jaboticabal, v.17, n.2, p.1-8, dez. 1997.
- [48] LIMA, M.; OLIVEIRA, D.; MEIRA, G.; PADILHA, M.; LIRA, R.; Comportamento de Argamassas Submetidas à Ataque Ácido, II Congresso de Pesquisa e Inovação da Rede Norte Nordeste de Educação Tecnológica, João Pessoa - PB – 2007.
- [49] Jalali, S.; Betão Autocompactável - Influência dos Superplastificantes (Carboxilatos Modificados) na Fluidez e Deformabilidade das Pastas Ligantes; Engenharia Civil UM, Número 15, 2002, 16 páginas.

ANEXOS

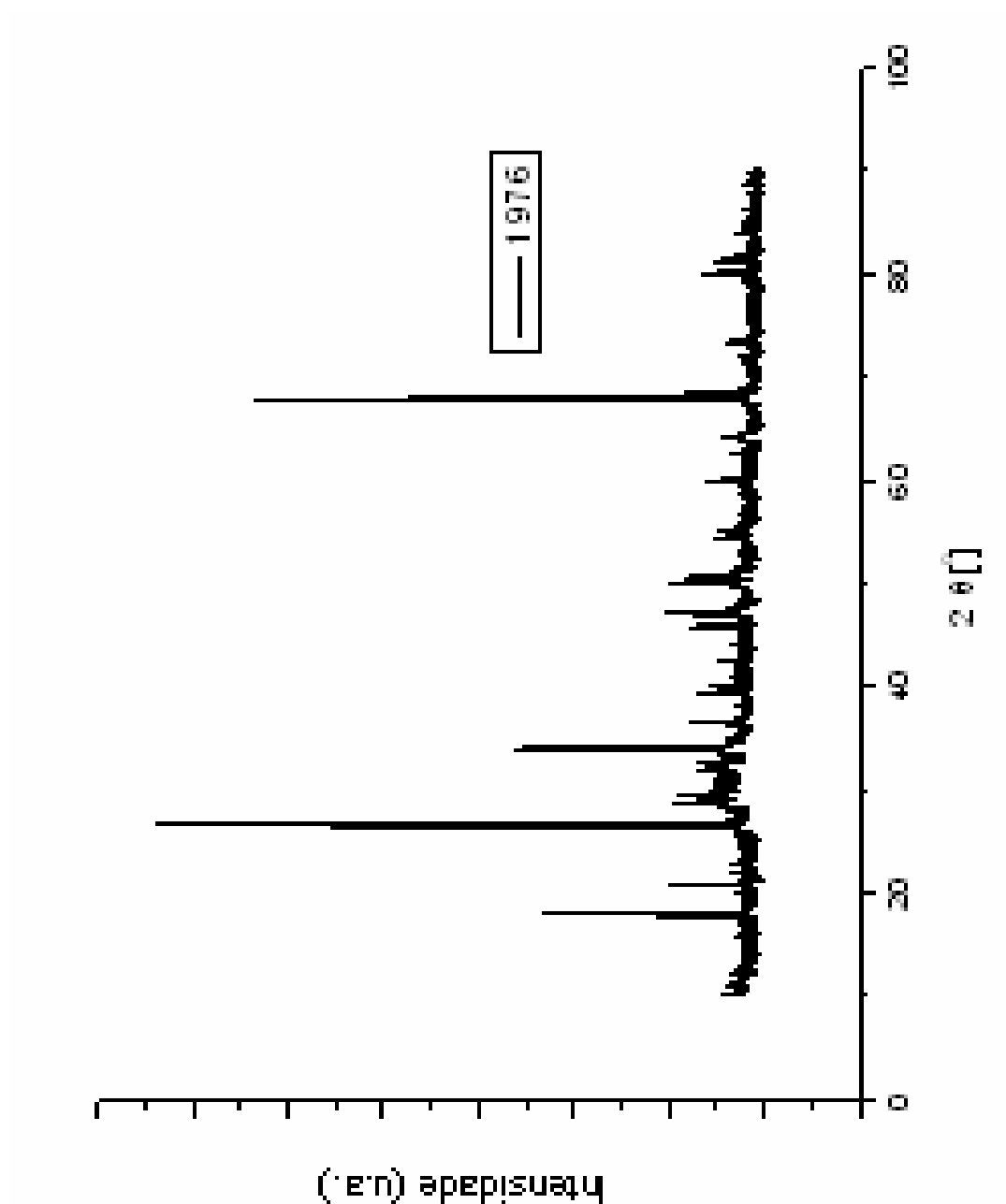
Anexo I - Identificação das fases cristalinas por difração de raios-X da argamassa estrutural do isolador de vidro fabricado no ano de 1970.



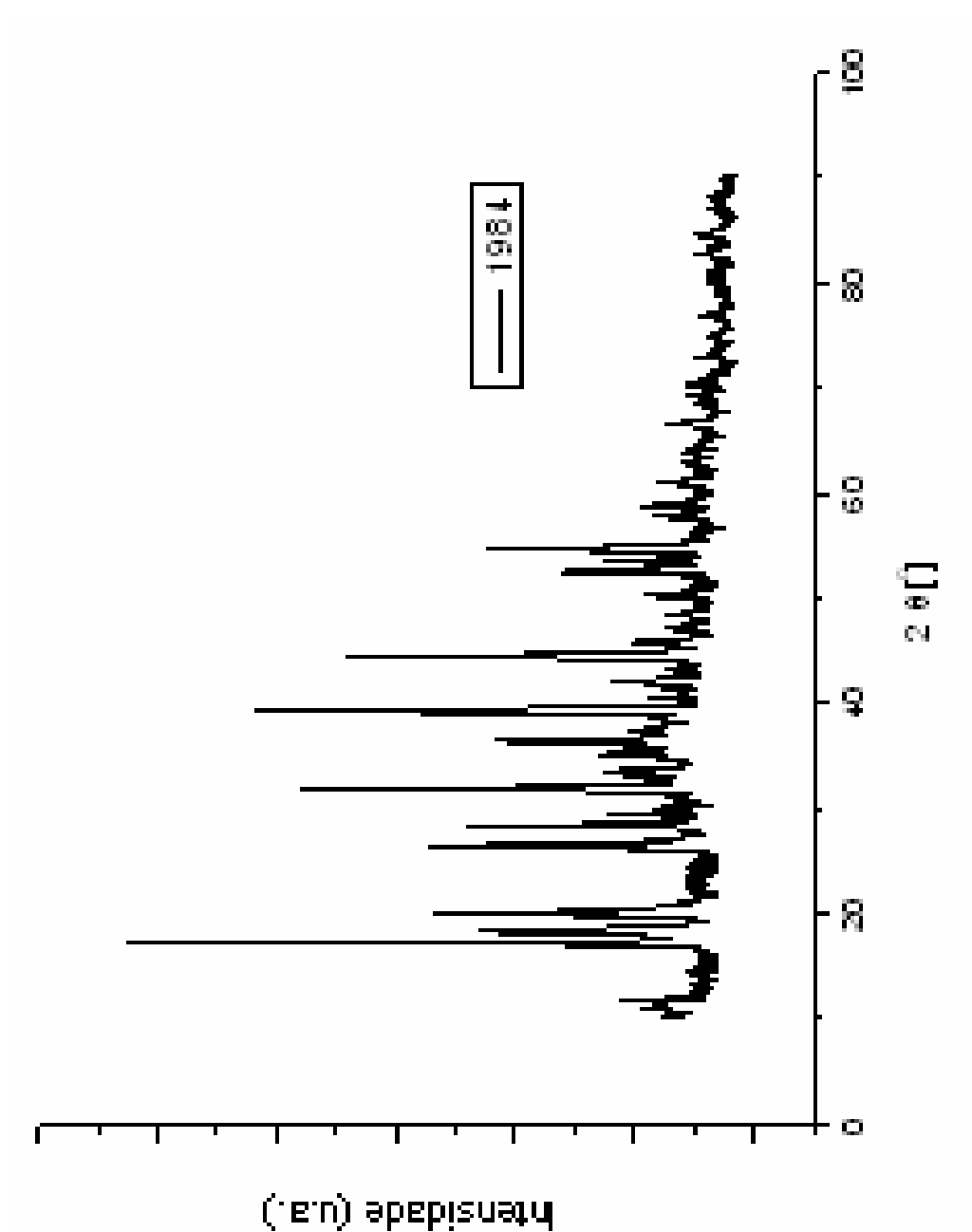
Anexo I - Identificação das fases cristalinas por difração de raios-X da argamassa estrutural do isolador de vidro fabricado no ano de 1973.



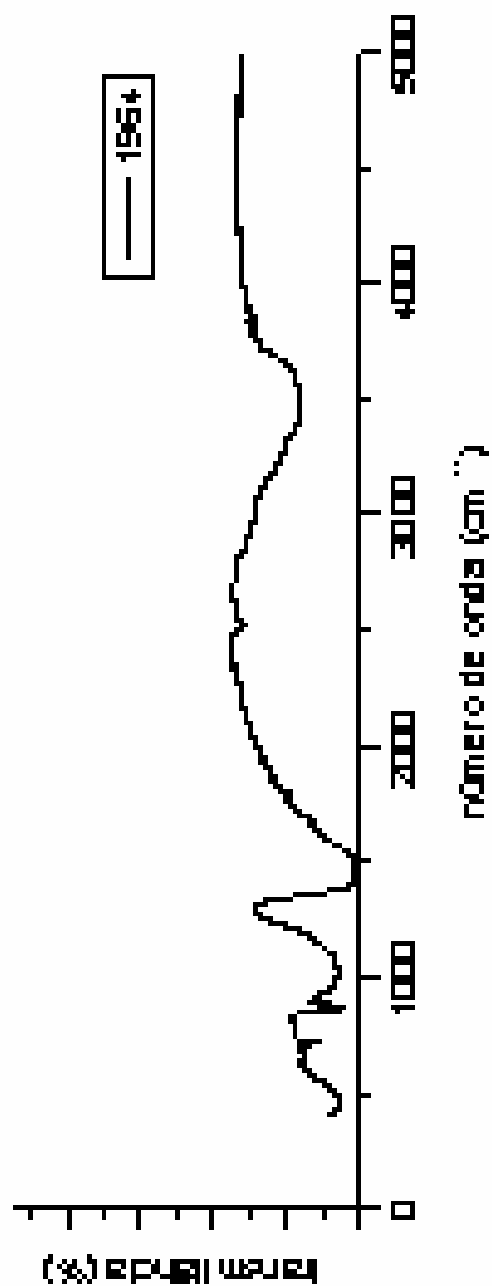
Anexo I - Identificação das fases cristalinas por difração de raios-X da argamassa estrutural do isolador de vidro fabricado no ano de 1976.



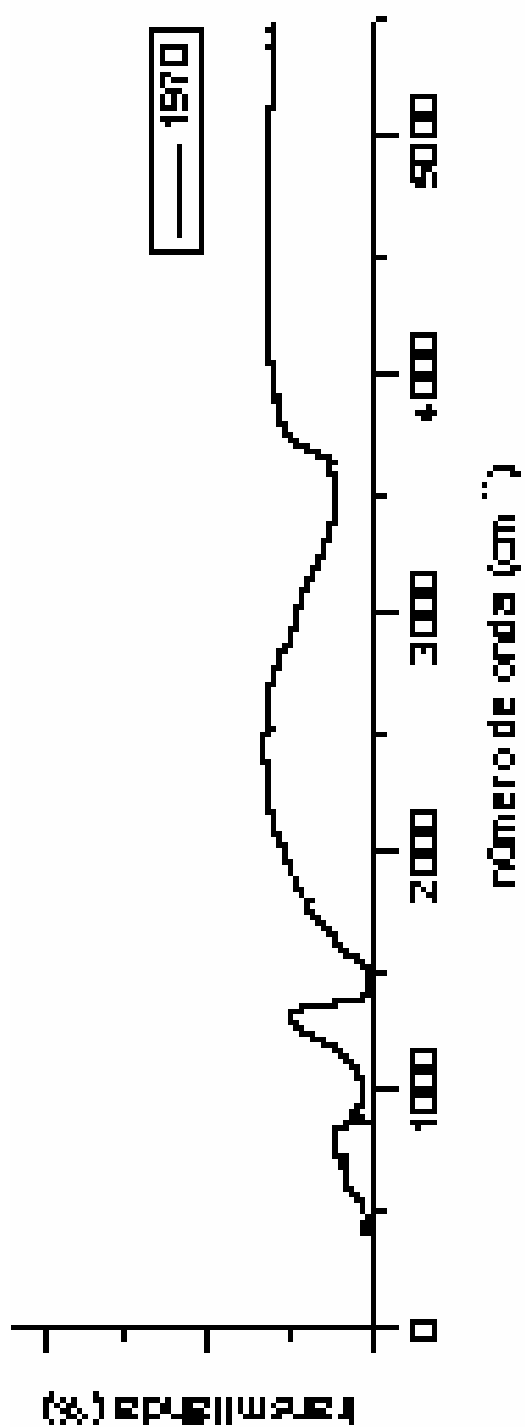
Anexo I - Identificação das fases cristalinas por difração de raios-X da argamassa estrutural do isolador de vidro fabricado no ano de 1984.



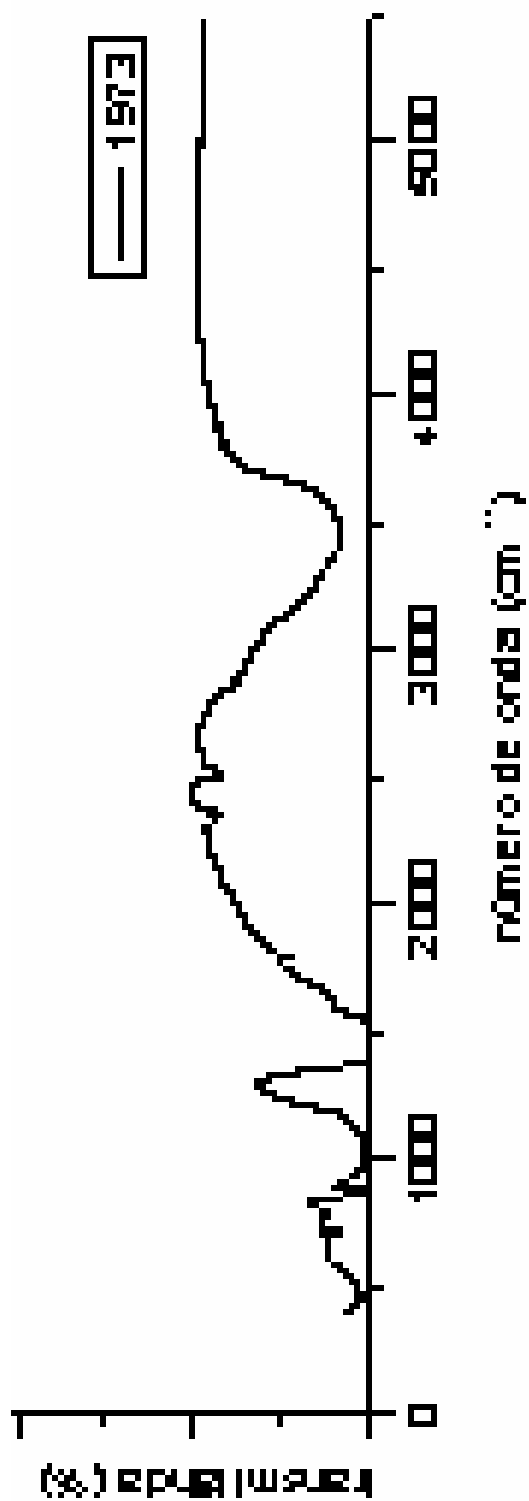
Anexo II - Análise microestrutural por espectroscopia de infravermelho da argamassa estrutural do isolador de vidro fabricado no ano de 1964.



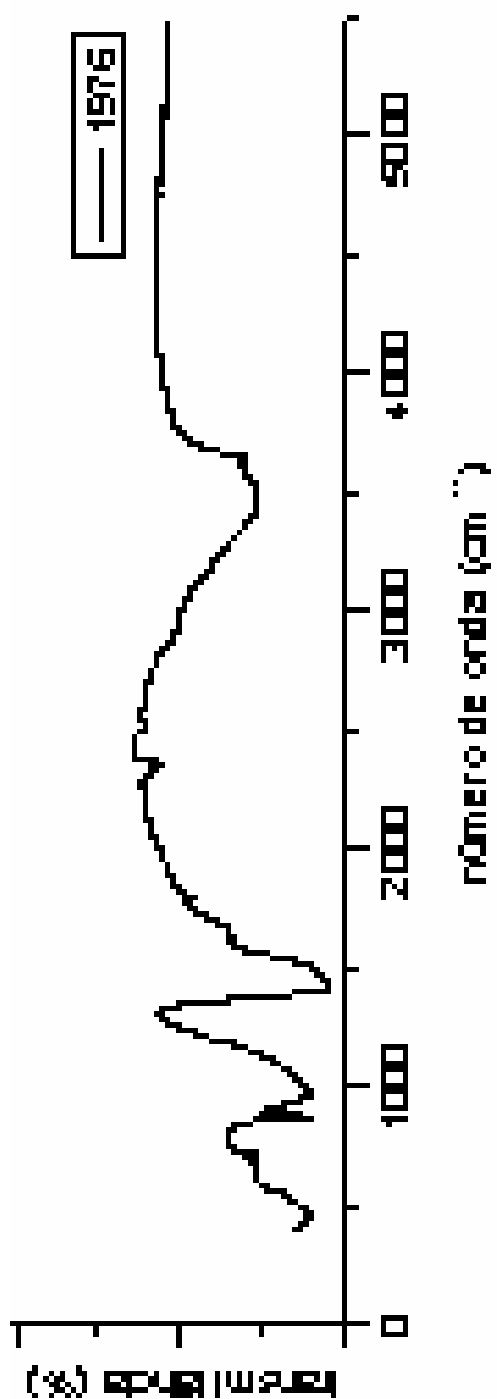
Anexo II - Análise microestrutural por espectroscopia de infravermelho da argamassa estrutural do isolador de vidro fabricado no ano de 1970.



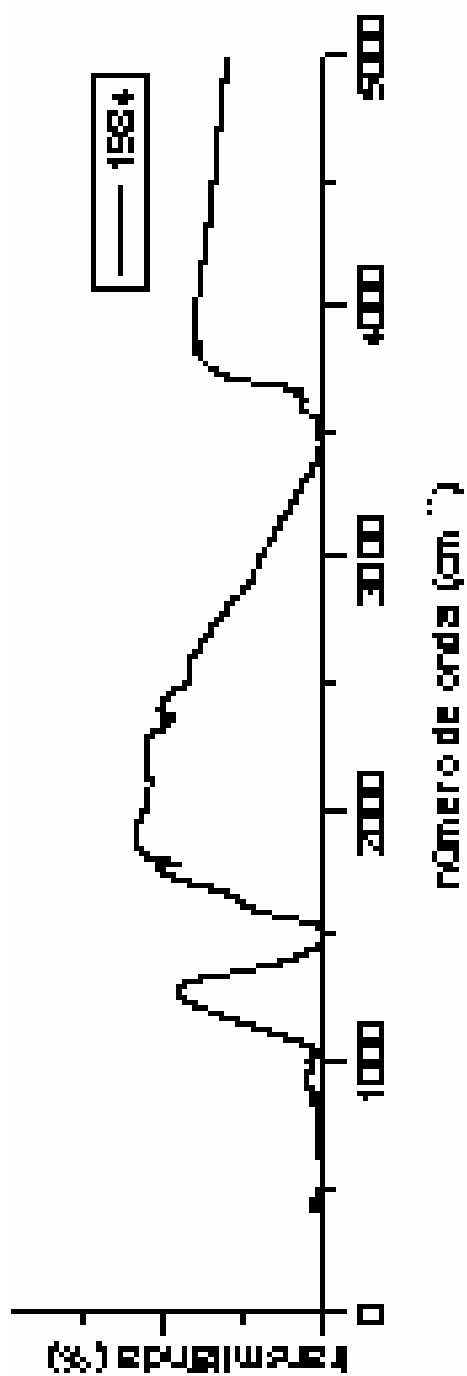
Anexo II - Análise microestrutural por espectroscopia de infravermelho da argamassa estrutural do isolador de vidro fabricado no ano de 1973.



Anexo II - Análise microestrutural por espectroscopia de infravermelho da argamassa estrutural do isolador de vidro fabricado no ano de 1976.



Anexo II - Análise microestrutural por espectroscopia de infravermelho da argamassa estrutural do isolador de vidro fabricado no ano de 1984.



Anexo II - Análise microestrutural por espectroscopia de infravermelho da argamassa estrutural do isolador de vidro fabricado no ano de 1990.

