

## 6 Resultados

Foram realizados tratamentos eletro-térmicos em amostras de vidros boro-silicato e sodo-cálcico e em alumina. A partir dos substratos tratados, foram realizadas análises microscópicas e confeccionados circuitos para caracterização em microondas. Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos.

Primeiramente, são mostradas simulações que ajudaram a comprovar as alterações produzidas pela aplicação do tratamento no vidro. É apresentada uma breve discussão sobre os resultados de simulações em boro-silicato, comparando o vidro com e sem camada de depleção. A partir desses resultados, discutem-se aspectos do dimensionamento dos circuitos utilizados para a caracterização em microondas, visando a maximizar os efeitos do tratamento.

Em seguida, são considerados, separadamente, a alumina e os vidros. Para cada um, são apresentadas as características e resultados dos tratamentos eletro-térmicos realizados e a análise microscópica das amostras tratadas. No caso dos vidros, são extraídos os dados da camada de depleção utilizados nas simulações. Por fim, são apresentados os circuitos utilizados e os resultados de simulação e experimentais obtidos.

As medidas experimentais dos parâmetros de espalhamento foram realizadas no Laboratório de Microondas e Sistemas Ópticos do CETUC/PUC-Rio, utilizando um analisador de redes HP 8720 (que opera de 50 MHz a 20 GHz) e *kit* de calibração HP mecânico até 20 GHz..

### 6.1. Simulações Iniciais

O aplicativo CST Microwave Studio® permite a simulação eletromagnética tridimensional de estruturas de microondas, considerando as características (inclusive perdas e dispersão) dos diferentes materiais envolvidos.

Primeiro constrói-se um modelo tridimensional da estrutura que se quer analisar. Em seguida, são definidas as propriedades eletromagnéticas dos materiais envolvidos, as portas da estrutura e as condições de contorno do

problema. Por fim, são definidos os parâmetros de simulação, como faixa de frequência, precisão e parâmetros de convergência. A partir deste modelo, o aplicativo calcula os campos eletromagnéticos por um método proprietário de diferenças finitas, fornecendo como resultado os parâmetros de espalhamento das portas da estrutura, constante dielétrica efetiva, coeficiente de atenuação, impedância característica etc.

A Figura 21 mostra o corte lateral da estrutura considerada para representar a linha de transmissão CPW sobre um substrato que sofreu tratamento eletro-térmico. Nesta figura podem-se observar a largura  $W$  da linha central e a largura  $G$  do espaçamento (*gap*) entre linha central e planos de terra laterais.

A camada de depleção de íons é representada por um filme fino com espessura  $d$  sob a superfície do substrato correspondente ao anodo, onde é confeccionada a linha CPW, em toda a área de circuito simulada. Foram consideradas as seguintes aproximações para a camada de depleção: é homogênea, tem espessura uniforme e bem delimitada. Essas afirmações não são necessariamente verdadeiras, mas representam uma aproximação aceitável para a verificação da existência de efeitos nas características de propagação das linhas.

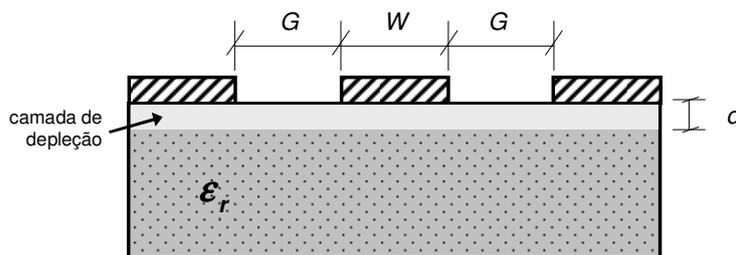


Figura 21. Esquema do corte transversal de uma linha CPW sobre um substrato com camada de depleção de íons e ilustração das linhas de campo elétrico.

A definição das características dielétricas na faixa de microondas do material para modelar a camada de depleção é fundamental para uma simulação precisa. Contudo, essa caracterização nunca foi realizada e não pode ser feita experimentalmente de forma direta. Além disso, não existe na literatura nenhuma referência que indique um caminho para representar como as concentrações de íons alcalinos influenciam as propriedades dielétricas.

Entretanto, o quartzo constitui uma boa aproximação para as características dielétricas do vidro na situação ideal de depleção total dos íons [6]. Decidiu-se,

deste modo, considerar a camada de depleção como sendo composta de quartzo. Essa situação representa a condição ideal de depleção completa de íons nesta camada. Embora essa não seja uma premissa realista para uma estrutura planar de microondas real, o modelo passa a ser representativo da situação ideal, onde os efeitos da camada de depleção seriam máximos. Então, os resultados obtidos com essas simulações podem ser considerados como o limite superior de alterações obtidas com o tratamento eletro térmico.

Procurou-se verificar a confiabilidade das simulações, por meio de comparação com o único resultado experimental disponível na literatura [6]. Foram modeladas linhas de transmissão CPW sobre um substrato de boro-silicato sem camada de depleção, sobre um substrato estratificado com uma camada de 21,5  $\mu\text{m}$  (representada por quartzo, conforme as aproximações adotadas acima) e sobre um substrato homogêneo de quartzo. Este último é considerado em [6] como uma referência ao caso hipotético de depleção total de íons em todo o substrato.

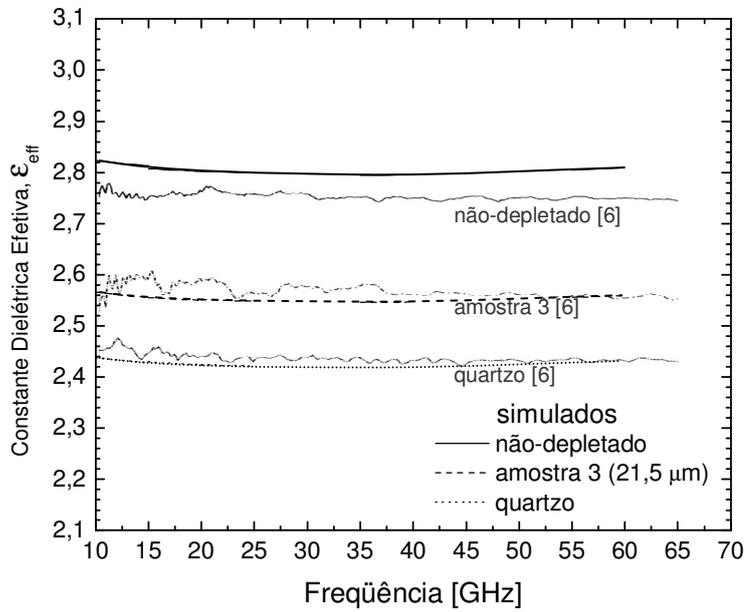
A largura da fita central da linha CPW é  $W = 75 \mu\text{m}$ , enquanto o espaçamento entre linha e planos de terra laterais é  $G = 25 \mu\text{m}$ . Outros dados necessários para a simulação não são fornecidos no artigo considerado, e foram adotados os valores dos materiais utilizados no resto deste trabalho.

As linhas foram simuladas de 10 a 70 GHz. Devido à complexidade da estrutura e à banda muito larga, a simulação teve de ser dividida em diversas etapas com banda estreita, sendo que os parâmetros de simulação (e.g. definição da malha de diferenças finitas) foram adequados para cada etapa.

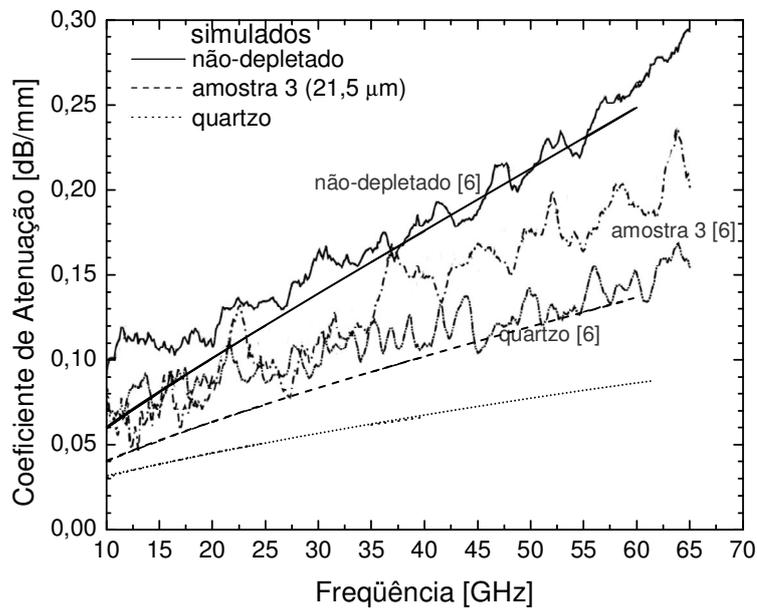
A Figura 22 apresenta a comparação dos resultados simulados e experimentais [6]. Na Figura 22(a), pode-se verificar excelente concordância entre a simulação e as medidas para os valores de constante dielétrica efetiva.

A Figura 22(b) compara os resultados para o coeficiente de atenuação. Os valores simulados estão bastante próximos aos medidos no caso do vidro boro-silicato sem depleção de íons; entretanto a concordância não é muito boa para o quartzo. Acredita-se que essa diferença se deva ao fato de que os nem todos os dados são fornecidos, em particular as perdas no quartzo e no alumínio da estrutura experimental. Foram então, utilizados os valores padrão da biblioteca de materiais do aplicativo CST. Além disso, variações na metalização de alumínio

(pureza e espessura) também podem proporcionar alterações no valor de atenuação medido.



(a)



(b)

Figura 22. Simulação de resultados experimentais obtidos na literatura [6] para: (a) constante dielétrica efetiva e; (b) coeficiente de atenuação de uma linha de transmissão CPW.

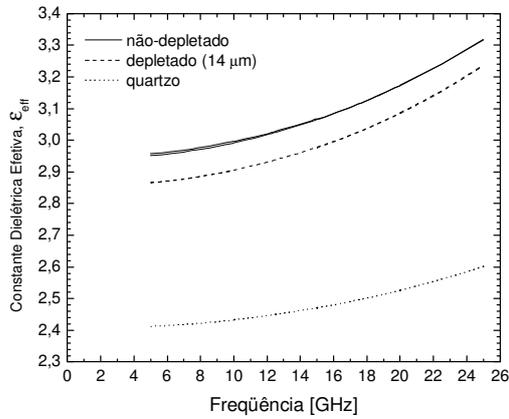
Verifica-se na Figura 22 que o resultado obtido para modelo de vidro polarizado é coerente com o experimental. No caso da constante dielétrica efetiva, a curva mostra excelente concordância com o resultado experimental de referência. No caso da avaliação das perdas, o modelamento inadequado das perdas do quartzo atrapalha a interpretação. Mesmo assim, o comportamento de translação da curva simulada é totalmente coerente com a translação da curva experimental para o vidro polarizado.

Conclui-se dos resultados da Figura 22 que o modelo adotado para a representação da camada de depleção nas simulações é suficientemente adequado para uma avaliação genérica dos efeitos da polarização no vidro sobre seu desempenho em microondas.

Em seguida, foram simuladas linhas CPW com dimensões diferentes, tendo em vista decidir qual a configuração mais apropriada para a observação dos efeitos em microondas da camada de depleção. Foram escolhidas duas estruturas com impedância próxima a  $50 \Omega$ , uma com linha central e espaçamento largos e outra com linha central e espaçamento estreitos. A intenção é avaliar se é mais importante manter uma seção transversal maior da linha central sobre a camada de depleção ou se é mais eficaz reduzir a largura do espaçamento, concentrando as linhas do campo elétrico dentro desta camada. As dimensões escolhidas foram para a linha larga foram  $W = 500 \mu\text{m}$  e  $G = 210 \mu\text{m}$  e para a linha estreita  $W = 250 \mu\text{m}$  e  $G = 45 \mu\text{m}$ . Foi considerada uma espessura  $d = 14 \mu\text{m}$  para a camada de depleção, o que se mostrou de acordo com os resultados obtidos na análise microscópica da seção 6.3.2.

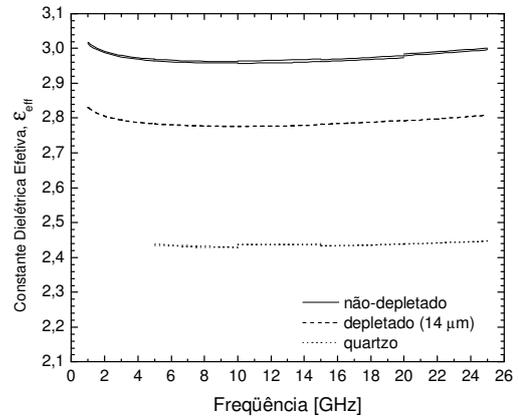
Os resultados obtidos se encontram na Figura 23, onde se podem comparar lado a lado a constante dielétrica efetiva, o coeficiente de atenuação e a impedância característica nos dois casos.

Linha CPW para condutor central largo  
com  $W = 500 \mu\text{m}$  e  $G = 210 \mu\text{m}$

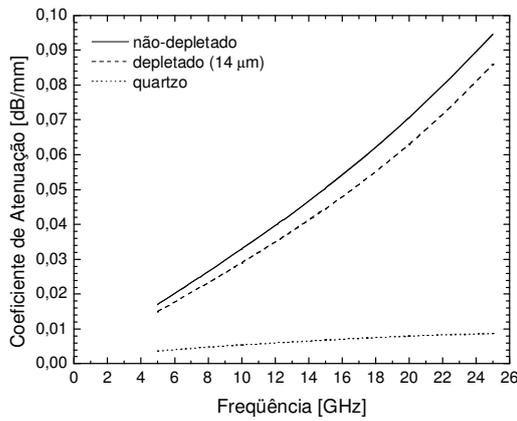


(a)

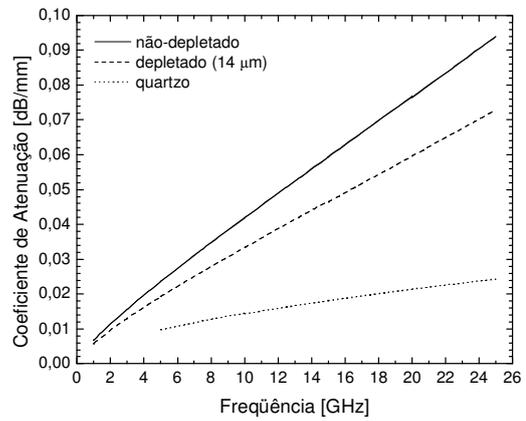
Linha CPW de espaçamento estreito  
com  $W = 250 \mu\text{m}$  e  $G = 45 \mu\text{m}$



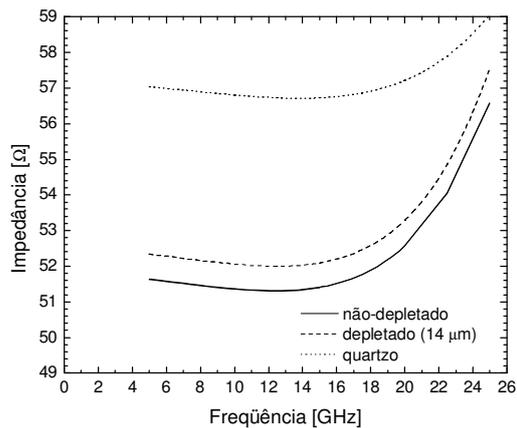
(b)



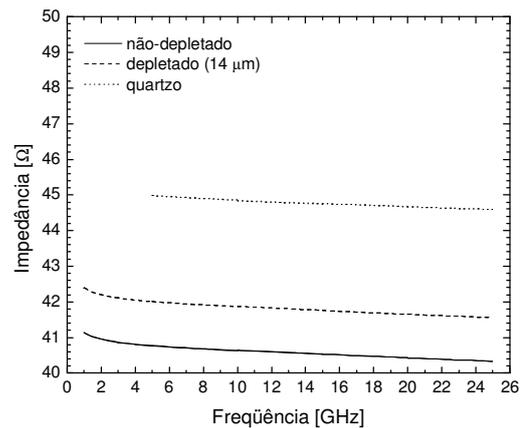
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 23. Simulação das características de duas linhas CPW para condutor central largo com  $W = 500 \mu\text{m}$  e  $G = 210 \mu\text{m}$  e linha de espaçamento estreito com  $W = 250 \mu\text{m}$  e  $G = 45 \mu\text{m}$ : constante dielétrica efetiva (a) e (b); coeficiente de atenuação (c) e (d) e impedância característica (e) e (f) respectivamente.

A linha com espaçamento estreito apresenta efeitos bem mais sensíveis, mostrando-se mais apropriada para a caracterização dos resultados do tratamento termo elétrico.

Esse resultado pode ser entendido avaliando as linhas do campo elétrico em uma linha de transmissão CPW, conforme ilustra a Figura 24. Nesta figura, observa-se a linha CPW sobre um substrato com camada de depleção de íons e o confinamento das linhas de campo dentro da camada de depleção.

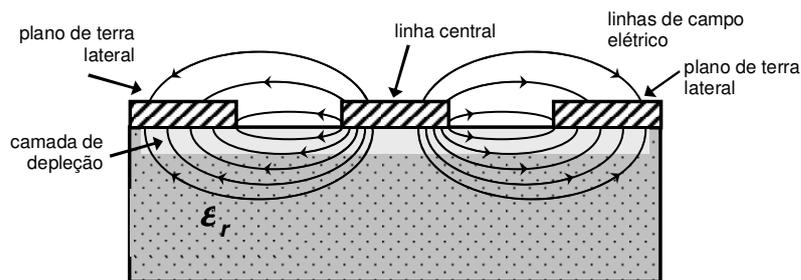


Figura 24. Esquema do corte transversal de uma linha CPW sobre um substrato com camada de depleção de íons e ilustração das linhas de campo elétrico.

A camada de depleção é muito fina, da ordem de alguns microns, localizada imediatamente abaixo da superfície do substrato onde estão os condutores. Quanto mais linhas de campo estiverem dentro da camada de depleção, maior será seu efeito sobre o sinal RF. Portanto, linhas com espaçamento lateral reduzido são mais sensíveis aos efeitos da camada de depleção, de acordo com os resultados apresentados na Figura 23.

Esses resultados indicam as diretrizes para o dimensionamento das linhas CPW mais adequadas para a caracterização da redução de perdas nos substratos vítreos.

A partir das máscaras de fotolito utilizadas para a fabricação dos circuitos (seção 5.3), a dimensão mínima factível no processamento disponível na PUC-Rio foi 45  $\mu\text{m}$ .

Entretanto, devido a dificuldades de realização no CETUC, e devido à baixa aderência dos filmes de alumínio evaporados sobre o vidro (comentados na seção 5.1), essas linhas apresentaram baixa reprodutibilidade. Além disso, a fragilidade do filme fazia com que linhas muito estreitas fossem destruídas durante a montagem, o que limitou na prática a realização de circuitos com metalização de alumínio a dimensões maiores, da ordem de 0,5 mm.

O método de calibração TRL-multilinhas (seção 5.2) utilizado para caracterizar as propriedades dielétricas dos vidros necessita que todas as linhas sejam idênticas. As diferenças nas dimensões das linhas causadas pela baixa reprodutibilidade na fabricação e as eventuais falhas na metalização (seja pela deposição ou danificação na montagem) tornavam essas linhas inadequadas para esse tipo de calibração, corroborando a limitação prática a dimensões transversais da ordem de 0,5 mm.

Por fim, foi realizado um estudo de como a linha CPW com  $W = 250 \mu\text{m}$  e  $G = 45 \mu\text{m}$  se comportaria na presença de uma camada de depleção com diferentes espessuras. Observa-se na Figura 25 um efeito progressivo na alteração das propriedades da linha à medida que a espessura da camada de depleção aumenta, conforme era esperado.

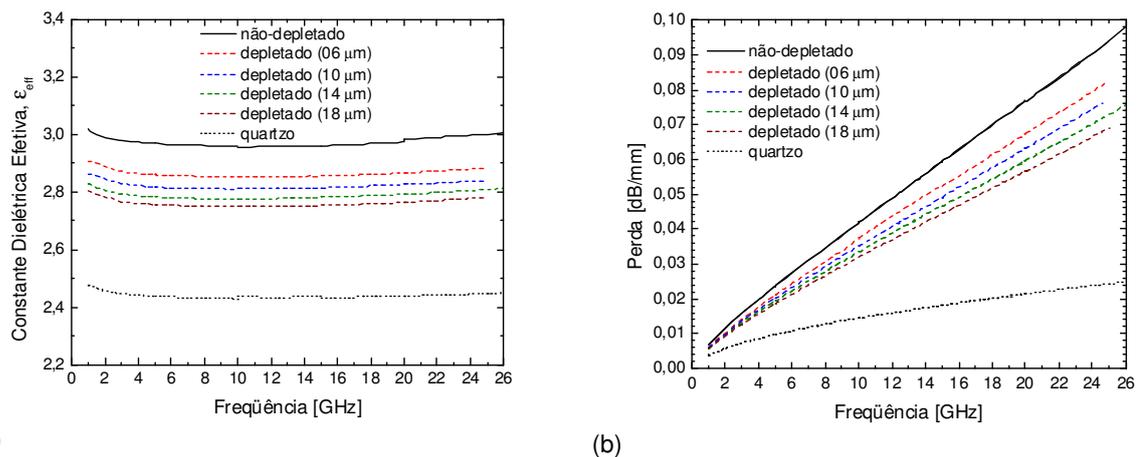


Figura 25. Simulação das características de linhas CPW com  $W = 250 \mu\text{m}$  e  $G = 45 \mu\text{m}$  para diversos valores da espessura da camada de depleção: (a) constante dielétrica efetiva; e (b) coeficiente de atenuação.

## 6.2. Alumina

Nesta seção são apresentados todos os procedimentos realizados para o tratamento eletro-térmico e caracterização da alumina. Ao longo das etapas, os resultados obtidos são apresentados e discutidos.

### 6.2.1. Tratamentos eletro-térmicos

Amostras de alumina da marca Piconics, conforme especificadas na seção 4.2.1, foram submetidas ao tratamento eletro-térmico descrito no capítulo 3. A montagem utilizada encontra-se na Figura 26.

As amostras possuem dimensões 25,4×25,4×0,635 mm. A rigidez dielétrica da alumina limita a tensão aplicada a 10 kV/mm [36], ou seja, aproximadamente 6 kV nas amostras utilizadas (valor de referência em temperatura ambiente).

A tensão máxima que pode ser aplicada nesta montagem é definida pela rigidez dielétrica do ar entre os eletrodos, portanto o afastamento entre estes é fundamental. Por outro lado, deseja-se maximizar a área do anodo, que é a área aproveitável da alumina polarizada.

Em todos os experimentos, foram utilizados um par anodo-catodo de aço com dimensões 21×21 mm, alinhados entre si e centralizados na área da alumina.

A face metalizada (NiCr-Au) da alumina fica em contato com o anodo, pois é nessa face que serão confeccionados os circuitos de microondas, portanto é onde se deseja criar a camada de depleção. Foi necessário remover a metalização nas bordas da alumina, para melhorar o isolamento entre os eletrodos e impedir a formação de arcos voltaicos. Esse procedimento foi realizado por fotolitografia, pelo mesmo processo de fabricação dos circuitos (seção 5.3). Para isso foi confeccionada uma máscara com o formato do anodo. Toda a região metalizada remanescente atuará como anodo. A face do catodo foi coberta com um filme fino de alumínio por evaporação. A utilização de eletrodos depositados sobre o material garante maior uniformidade espacial no processo.

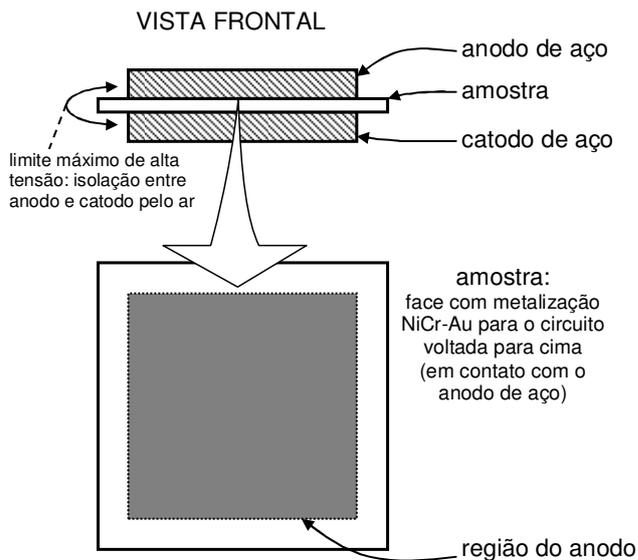


Figura 26. Esquema do arranjo experimental para polarização eletro-térmica das amostras de alumina.

Inicialmente, foi observado o comportamento da corrente quando uma tensão é aplicada à alumina na temperatura ambiente. Nesta situação, o conjunto anodo-alumina-catodo (conforme ilustrado na Figura 26) funciona apenas como um capacitor de placas paralelas. A corrente medida foi da ordem de 2 nA e se trata da corrente de fuga da alumina. Observou-se um pico de corrente no início da aplicação da tensão, associado ao efeito de carga capacitivo; e um pico negativo no momento da retirada da tensão, corresponde à descarga do capacitor. A corrente medida apresentou-se bastante ruidosa, provavelmente por estar próxima ao limite da sensibilidade dos equipamentos.

Em seguida, foram realizados testes com a alumina em temperaturas entre 270°C e 300°C. Diversos valores de tensão foram aplicados à alumina, entre 100 V e 5,0 kV. A maior tensão aplicada com sucesso no tratamento foi 4,0 kV: valores superiores apresentaram ruído e descargas indesejadas pela formação de arcos elétricos através do ar (efeito corona).

A Figura 27 apresenta o registro de tensão aplicada e comportamento da corrente medida teste durante um tratamento eletro-térmico de amostra de alumina a 290°C. A duração foi de 05h50' e a tensão foi 3,5 kV, aplicada em dois degraus progressivos (inicialmente 3,0 kV e elevada para 3,5 kV após 22'). Foi realizada uma tentativa de elevar a tensão para 4,0 kV após 340 minutos de tratamento, mas foram observados arcos voltaicos entre os eletrodos.

O comportamento de decaimento de corrente observado na Figura 27 é característico de corrente de polarização eletrotérmica [5], [7], [9] e análogo ao comportamento da corrente na polarização de vidros. A escala de tempo de decaimento e a intensidade de corrente são característicos de cada material.

Esse resultado é muito importante, pois é característico de polarização térmica de materiais e indica que este processo pode ser realizado na alumina. Trata-se de uma observação nova, sobre a qual ainda não se tem notícia na literatura especializada.

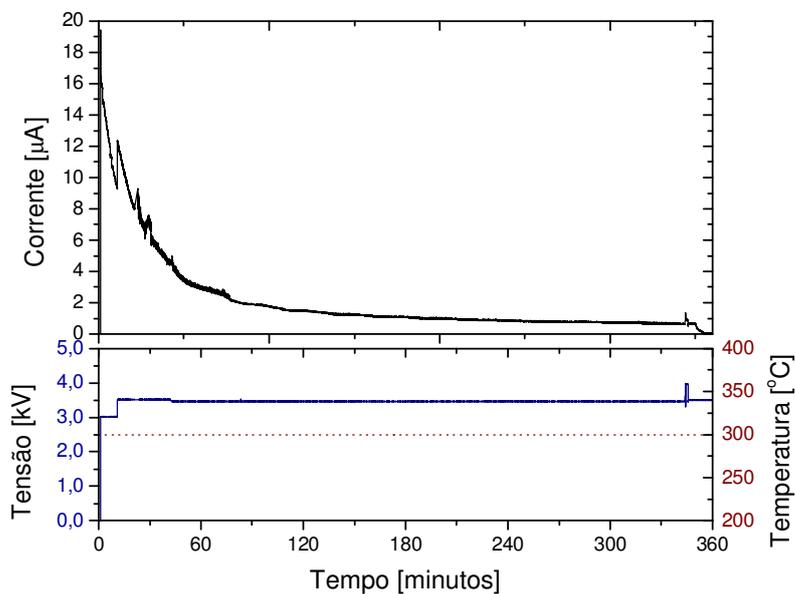


Figura 27. Tensão e comportamento da corrente durante tratamento eletro-térmico de amostra de alumina a 290°C. Duração 05h50'; tensão 3,5 kV, aplicada em dois degraus progressivos.

A Figura 28 mostra o registro de tensão aplicada e comportamento da corrente medida teste durante um tratamento eletro-térmico repetido em diversas amostras de alumina a 290°C. Foram utilizadas durações de 08h40', 10h30' e 24h20', mas apenas as 10 primeiras horas estão registradas na figura.

Durante o tratamento, a resistividade da camada de depleção vai aumentando gradativamente à medida que os íons (portadores de carga) são removidos [5], [7]. A tensão final de 4,0 kV foi aplicada em degraus progressivos, para aproveitar esse aumento de resistividade e evitar a formação de tunelamento

de corrente dentro do material (*thermal runaway*), que pode danificar uma região do substrato e estragar o processo de polarização. No detalhe da Figura 28 pode-se observar o comportamento nos primeiros 50 minutos.

Observa-se excelente reprodutibilidade em todos os processos correspondentes às curvas apresentadas na Figura 28. Uma única amostra apresentou valores inferiores (mas praticamente proporcionais) de corrente: essa amostra não utilizava catodo depositado de alumínio, apenas o contato com o catodo de aço. Conclui-se que o catodo depositado permite maior controle e uniformidade do processo. Amostras com eletrodos de áreas menores foram testadas e a corrente final gerada foi proporcional à área do catodo, i.e., o processo está associado a uma densidade de corrente por área polarizada.

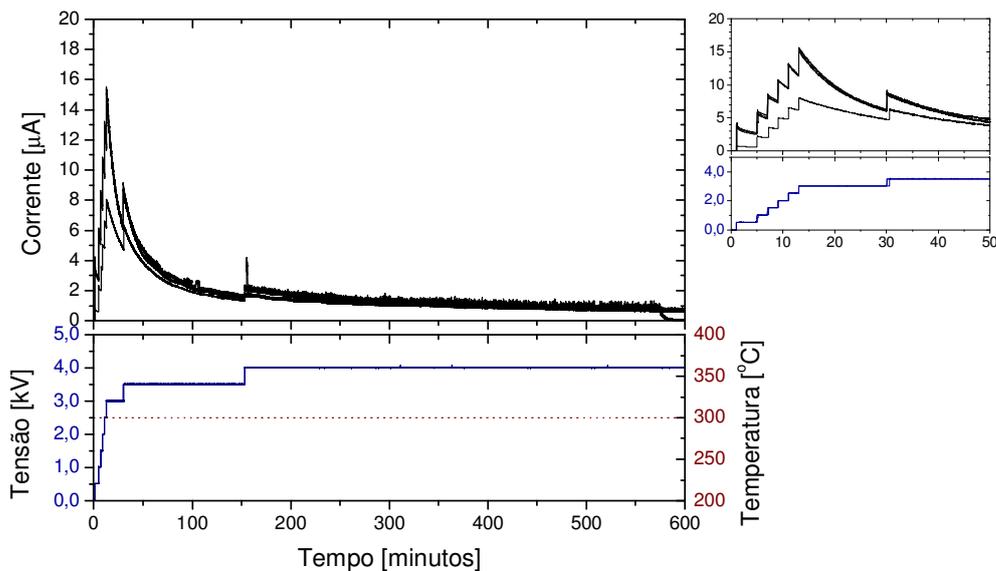


Figura 28. Tensão e comportamento da corrente durante tratamento eletro-térmico de diversas amostras de alumina a 290 °C. Durações 08h40', 10h30', 24h20'; tensão 4,0 kV, aplicada em degraus progressivos. Detalhe: comportamento nos primeiros 50 minutos.

Esses resultados também são significativos, pois deles conclui-se que esse processo é controlável e reprodutível, e que pode ser realizado em temperaturas semelhantes às utilizadas para a polarização de vidros, corroborando a interpretação de que trata-se da polarização da alumina.

Na Figura 29 é mostrado o catodo de alumínio depositado sobre a alumina, após um dos tratamentos eletro-térmicos representados na Figura 28. Foi

observado que o tratamento provoca oxidação do alumínio do catodo, e são formadas manchas claras e foscas na metalização. Essas amostras ainda serão levadas para análise de composição no MEV-EDS para tentar identificar a presença da deposição de óxidos alcalinos na metalização do catodo após o tratamento. Apesar disso, após remoção da metalização do catodo, nenhuma alteração foi observada na superfície da alumina.

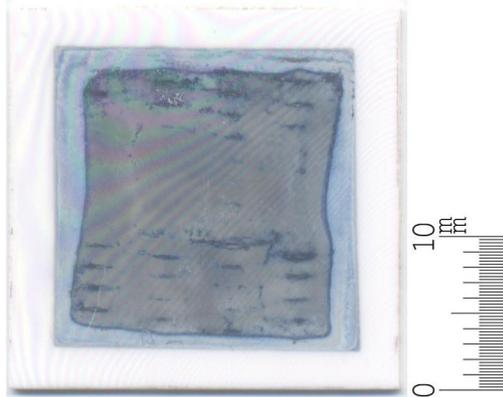


Figura 29. Catodo metalizado de amostra de alumina após o tratamento eletro-térmico, mostrando alterações no aspecto da metalização. Escala 2:1.

Por outro lado, houve alterações significativas na metalização comercial no lado do anodo. Em primeiro lugar, a metalização NiCr-Au deixou de responder uniformemente aos ataques químicos para a confecção dos circuitos. O procedimento de retirada do ouro teve o tempo de reação aumentado e não mais se deu de forma homogênea em toda a superfície: o ataque químico acontecia mais rápido em regiões localizadas e foi observada a formação de crateras na metalização. Esses efeitos impediram a confecção de circuitos (seção 5.3) sobre a metalização comercial após o tratamento térmico, pois há perda de definição no processo e não é mais possível transferir a geometria do circuito para a metalização.

Após alguns testes concluiu-se que dois fenômenos ocorrem na metalização durante o tratamento eletro-térmico, induzidos também pela aplicação concomitante de alta tensão e temperatura elevada: eletromigração no filme de ouro [59], [60] e difusão de níquel e cromo no filme de ouro [61], [62]. São dois fenômenos induzidos de transporte de massa. A eletromigração faz com que a espessura de filme de ouro fique menos uniforme, mas deve ocorrer de forma

reduzida pela utilização de um anodo de aço do mesmo tamanho do anodo de filme depositado. A difusão faz com que os filmes de NiCr e ouro se misturem, e esse é o principal motivo que impede a fabricação dos circuitos por fotolitografia após o tratamento eletro-térmico.

Para contornar esse problema, duas soluções foram implementadas. A primeira consiste em retirar toda a metalização da alumina e realizar os circuitos com filme de alumínio depositado por evaporação no Laboratório de Filmes finos do Departamento de Física da PUC-Rio, do mesmo modo como é realizado com os vidros (seção 5.3).

A segunda solução é fabricar os circuitos na metalização comercial NiCr-Au da alumina antes do tratamento eletro-térmico, levando o substrato ao forno já com os circuitos ressoadores impressos. A montagem da Figura 26 é então modificada pela da Figura 30 para melhor entendimento. A face da alumina que tem os circuitos é utilizada como anodo. Os circuitos foram fabricados dentro da área de contato do anodo de aço (21×21 mm). Durante a polarização térmica, toda essa região (parte metalizada dos circuitos e os espaçamentos) estará recoberta pelo bloco de aço e atuará como anodo.

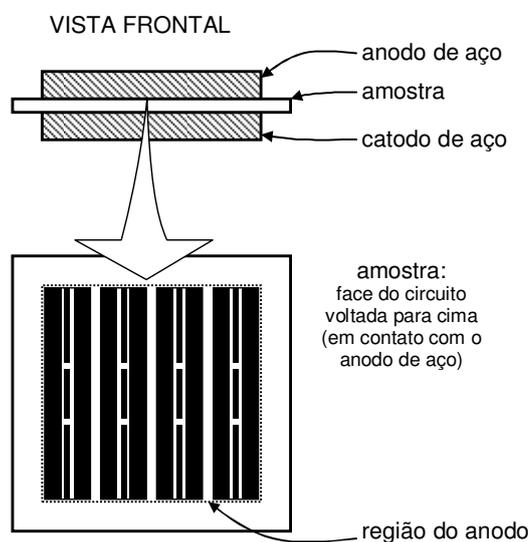


Figura 30. Esquema do arranjo experimental para polarização eletro-térmica dos ressoadores em alumina.

Embora os espaçamentos entre as linhas não estejam metalizados, considera-se que essa região também sofre os efeitos do tratamento eletro-térmico. As premissas para essa consideração são: o processo se dá pela aplicação de

campo elétrico, não pela passagem (injeção) de corrente e; durante o processo não há passagem de íons pelo anodo para a amostra e vice-versa. O que se acredita ocorrer é que a camada de depleção seja mais fina nas regiões não metalizadas do anodo, pois a aplicação do campo elétrico não será uniforme.

### 6.2.2. Caracterização em microondas

Foram dimensionados quatro diferentes ressoadores em alumina para os testes e caracterização do efeito de sintonia. As dimensões físicas, características elétricas e frequências de ressonância calculadas se encontram na Tabela 8. É preciso ressaltar que essa frequência de ressonância é apenas uma estimativa obtida por expressões analíticas aproximadas, servindo somente como apoio ao projeto. Embora todos os ressoadores tenham o mesmo comprimento físico da linha central, as frequências de ressonância variam de acordo com a constante dielétrica efetiva da linha de transmissão.

Tabela 8. Características dos ressoadores lineares dimensionados para o substrato de alumina.

	<b>Ressorador Tipo CPW1</b>	<b>Ressorador Tipo CPW2</b>	<b>Ressorador Tipo CPW3</b>	<b>Ressorador Tipo MS1</b>
Largura da linha central $W$ [ $\mu\text{m}$ ]	700	700	50	700
Largura do <i>gap</i> lateral $G$ [ $\mu\text{m}$ ]	260	50	50	–
Comprimento do ressoador $L$ [mm]	10	10	10	10
Largura total do circuito [mm]	5	5	5	5
Comprimento total do circuito [mm]	20	20	20	20
Impedância característica $Z$ [ $\Omega$ ]	50,3	31,7	62,1	48,9
Constante dielétrica efetiva $\epsilon_{\text{eff}}$	4,85	5,05	5,18	6,97
Frequência de ressonância estimada (fundamental) $f_{R1}$ [GHz]	6,81	6,67	6,59	5,68

Foram adotados três tipos de ressoadores na configuração CPW: tipo CPW1, com linha central e espaçamento (*gap*) largos; CPW2, com linha larga e

espaçamento estreito e; CPW3, com linha e espaçamento estreitos. O quarto ressoador, MS1, foi escolhido na configuração *microstrip* com impedância  $50 \Omega$ . A largura da linha condutora de MS1 é a mesma dos ressoadores CPW1 e CPW2.

A Figura 31 ilustra a máscara confeccionada com a topologia dos ressoadores lineares da Tabela 8 dimensionados para fabricação em alumina. Todos os circuitos ficaram compreendidos em uma área de  $20 \times 21$  mm, inferior à área do anodo de aço. A fabricação dos diferentes tipos de ressoadores no mesmo substrato de alumina permite comparar os resultados obtidos em igualdade de condições, uma vez que todos os ressoadores terão recebido o mesmo tratamento eletro-térmico.

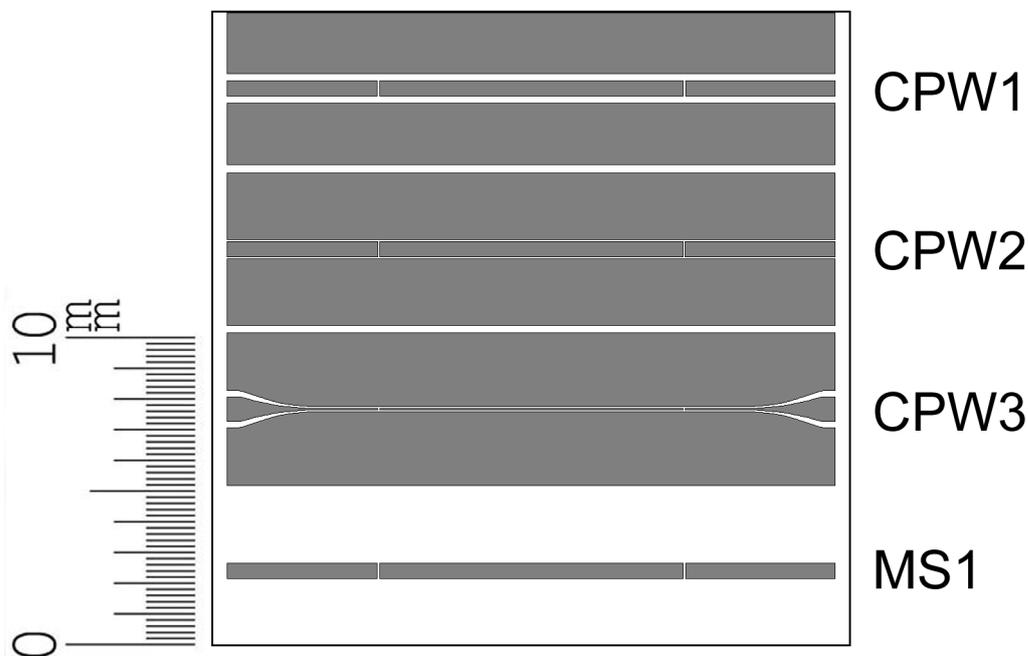


Figura 31. Representação da máscara com a topologia dos ressoadores lineares dimensionados para confecção nos substratos de alumina. Escala: 4:1.

A transição coaxial-planar, dos cabos do equipamento e conector do circuito para o circuito planar CPW ou *microstrip*, é realizada por conectores RADIALL (R125.501.001) padrão SNA/3,5 mm (seção 5.3), ilustrado na Figura 32. O acesso aos circuitos planares da Figura 31 é realizado por uma lingüeta plana na ponta do eixo coaxial do conector. Essa lingüeta tem  $450 \mu\text{m}$  de largura e pousa sobre a Lina na extremidade do circuito, fazendo a conexão RF por contato e pressão.

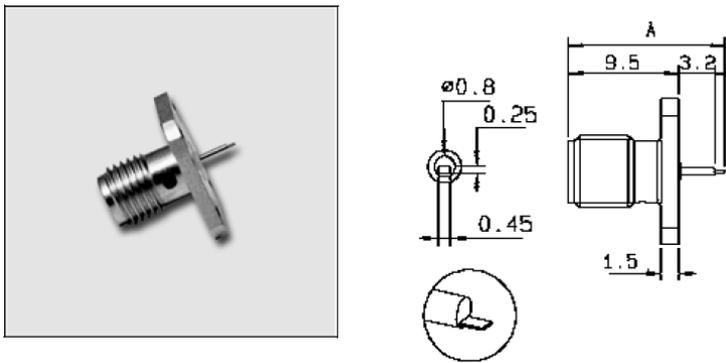


Figura 32. Conector RADIAL padrão SNA/3,5 mm utilizado na montagem dos circuitos planares. Cotas em milímetro.

Deste modo, não é possível realizar o contato em linhas planares muito estreitas (menores que a largura da lingüeta), em particular no caso da configuração CPW, em que a lingüeta do conector tocaria os planos de terra laterais, realizando um curto-circuito. Esta limitação aparece especificamente no caso da linha CPW3 apresentada na Tabela 8 e ilustrada na Figura 31.

A solução encontrada foi a realização de uma linha afilada (*taper*), para adaptar a geometria da linha CPW3 à largura do conector. Note que não se trata propriamente de uma adaptação de impedâncias, mas uma adaptação de geometrias. Uma vantagem da configuração CPW é que as larguras  $W$  do condutor central e  $G$  do espaçamento (*gap*) lateral podem ser variadas conjuntamente para permitir melhor adaptação e combinadas para diminuir a variação da impedância ao longo da adaptação. De fato, a qualidade dessa adaptação não deve interferir na frequência de ressonância do ressoador, apenas nas perdas de adaptação do circuito.

Foi procurada uma solução simples que fornecesse desempenho adequado em resposta ao problema. Considerando que a estrutura de CPW3 está no limite de resolução do procedimento de fotogração com fotolito utilizado e descrito na seção 5.3, não seria possível construir estruturas complexas de adaptação, pois as discontinuidades provocadas pela baixa resolução disponível degradariam o desempenho final. Após pesquisa na literatura, concluiu-se que a realização de um *taper* linear fornecia desempenho em frequência adequado e suficientemente próximo ao de estruturas mais elaboradas e de difícil projeto, como um *taper* biquadrático [63]. Um *taper* é uma linha afilada que realiza a adaptação física

entre duas linhas com dimensões diferentes. O *taper* linear foi projetado e implementado na máscara da Figura 31.

A máscara dimensionada e apresentada na Figura 31 foi confeccionada em fotolito e utilizada para a fabricação dos circuitos no LabSem. Esses circuitos foram montados e medidos. Não foi possível, porém, realizar com sucesso a fotolitografia dos circuitos do tipo CPW3, devido à sua linha central muito estreita.

As curvas do parâmetro de transmissão  $20 \times \log_{10}|S_{21}|$  dos ressoadores encontram-se na Figura 33. As medidas de transmissão no sentido inverso  $S_{12}$  foram idênticas às do sentido direto.

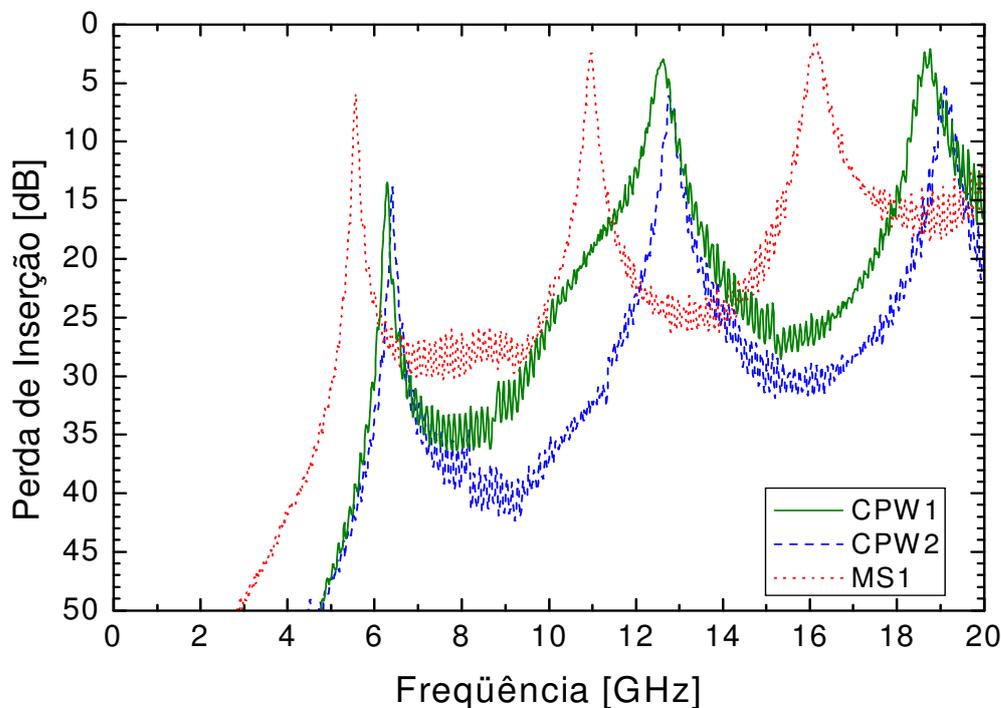


Figura 33. Parâmetro de transmissão ( $20 \times \log_{10}|S_{21}|$ ) dos ressoadores da Figura 31.

Nas curvas apresentadas na Figura 33, os dois aspectos mais importantes a serem observados são a frequência e a perda de inserção nos picos de ressonância [24]. A frequência de ressonância é determinada pelo comprimento da seção central do ressoador e pela constante dielétrica efetiva da estrutura; já a perda no pico de ressonância (e conseqüentemente a largura desse pico) está relacionada às perdas na estrutura.

As frequências fundamentais de ressonância medidas foram:  $f_{CPW1} = 6,29$  GHz;  $f_{CPW2} = 6,40$  GHz;  $f_{CPW1} = 5,56$  GHz. O valor estimado para essas frequências pela solução analítica da linha estão na Tabela 8:  $f_{CPW1}' = 6,81$  GHz;  $f_{CPW2} = 6,70$  GHz;  $f_{CPW1} = 5,68$  GHz. A diferença encontrada entre a frequência fundamental medida e a estimada é razoável, considerando que a esta última foi obtida a partir do valor de meio comprimento de onda efetivo calculado por expressões analíticas simplificadas.

Essa diferença não é relevante na avaliação do efeito de sintonização gerado pelo tratamento eletro-térmico, uma vez que a sintonia será medida pela comparação de frequências medidas com uma referência de frequência também experimental.

Para caracterizar o efeito de sintonia, parte-se da extração experimental da frequência de ressonância de um ressoador construído sobre alumina polarizada. O próximo procedimento é a aplicação de tensão entre a seção central do ressoador e os planos de terra (laterais no caso da CPW ou inferior no caso da *microstrip*) para verificar se há alteração da constante dielétrica efetiva e sintonização do componente (deslocamento dos picos de ressonância). Esse resultado é obtido pela nova frequência de ressonância extraída dos parâmetros de espalhamento da estrutura medidos sob a aplicação da tensão de controle. Esse procedimento está esquematizado na Figura 34.

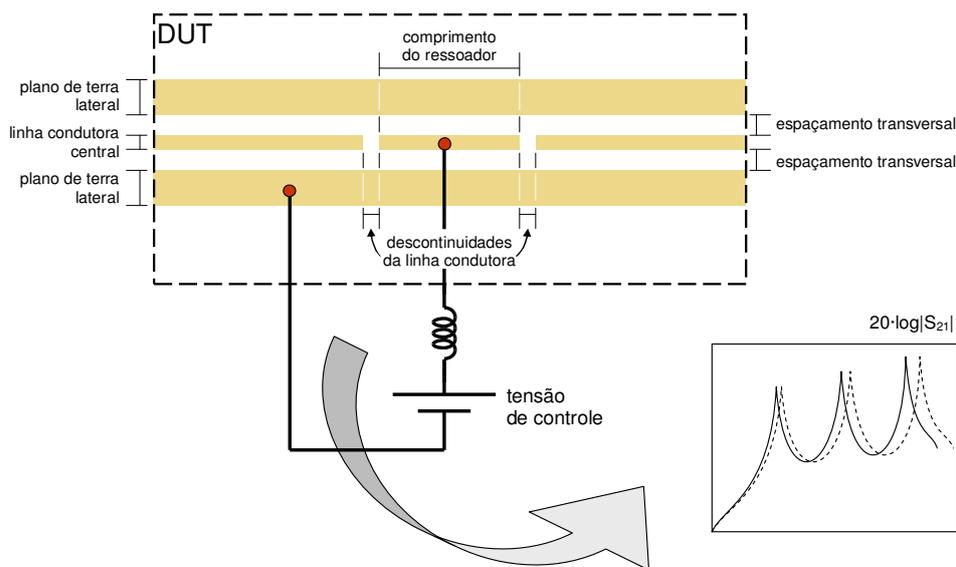


Figura 34. Esquema para a aplicação de uma tensão de controle em um ressoador linear CPW em alumina para o deslocamento dos picos de ressonância.

Na Figura 34, observa-se que a tensão de controle é aplicada ao trecho central do ressoador por meio de um indutor de RF. Esse indutor visa a bloquear a passagem de RF para a fonte DC. Uma foto da montagem do circuito de aplicação da tensão de controle ao ressoador é mostrada na Figura 35. O circuito de aplicação, com o indutor, foi construído em uma placa de circuito impresso comum e fixado a uma base de alumínio. A caixa com o ressoador é presa a essa base para a realização das medidas.

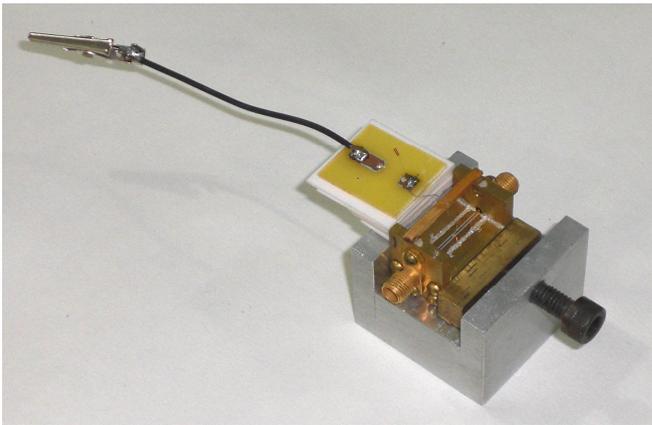


Figura 35. Foto da montagem do circuito de aplicação da tensão de controle ao trecho central do ressoador linear em substrato de alumina.

A Figura 36 ilustra o esquema da montagem experimental para a medida da resposta dos ressoadores sob a aplicação de alta tensão. A medida foi realizada em um analisador de redes escalar HP8757A. A tensão DC de controle foi provida por uma fonte de alta tensão Bertran, a mesma utilizada nos procedimentos de polarização eletro térmica, utilizando a montagem da Figura 35. Além do bloqueio de RF, outras providências importantes são necessárias para realizar esta medida de RF envolvendo alta tensão. O circuito medido (DUT) foi isolado em DC do analisador de redes por um “T” de polarização em cada porta. Essa precaução visa a evitar o vazamento de tensão DC para o analisador de redes em caso de curto no ressoador, o que poderia queimar o equipamento. Os “T”s de polarização devem fazer parte do procedimento de calibração do analisador, para eliminar sua influência nas medidas. A fonte de alta tensão foi alimentada por um *no-break* desconectado da rede, para evitar problemas de aterramento com o analisador de redes.

Por fim, a foto da montagem experimental para a medida da resposta dos ressoadores sob a aplicação de alta tensão é mostrada na Figura 37.

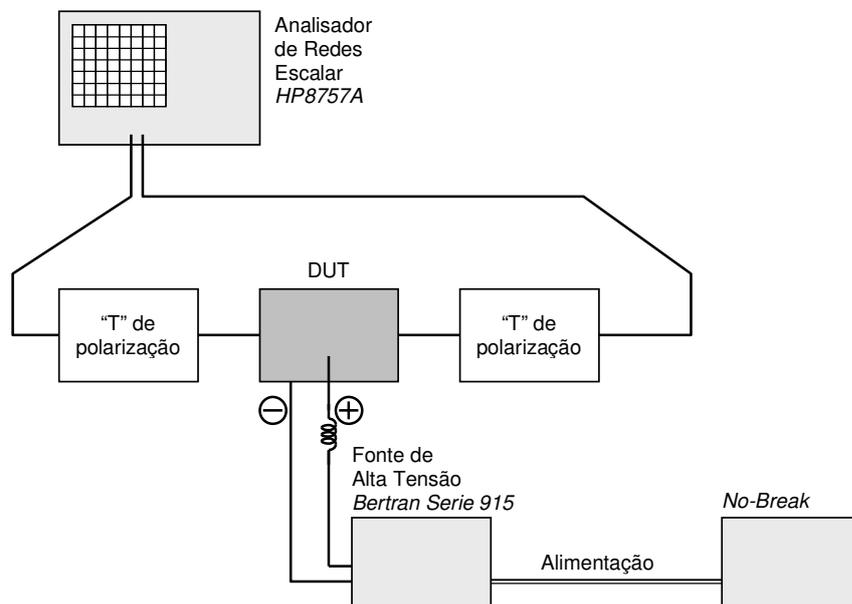


Figura 36. Esquema da montagem experimental para a medida da resposta dos ressoadores sob a aplicação de alta tensão.

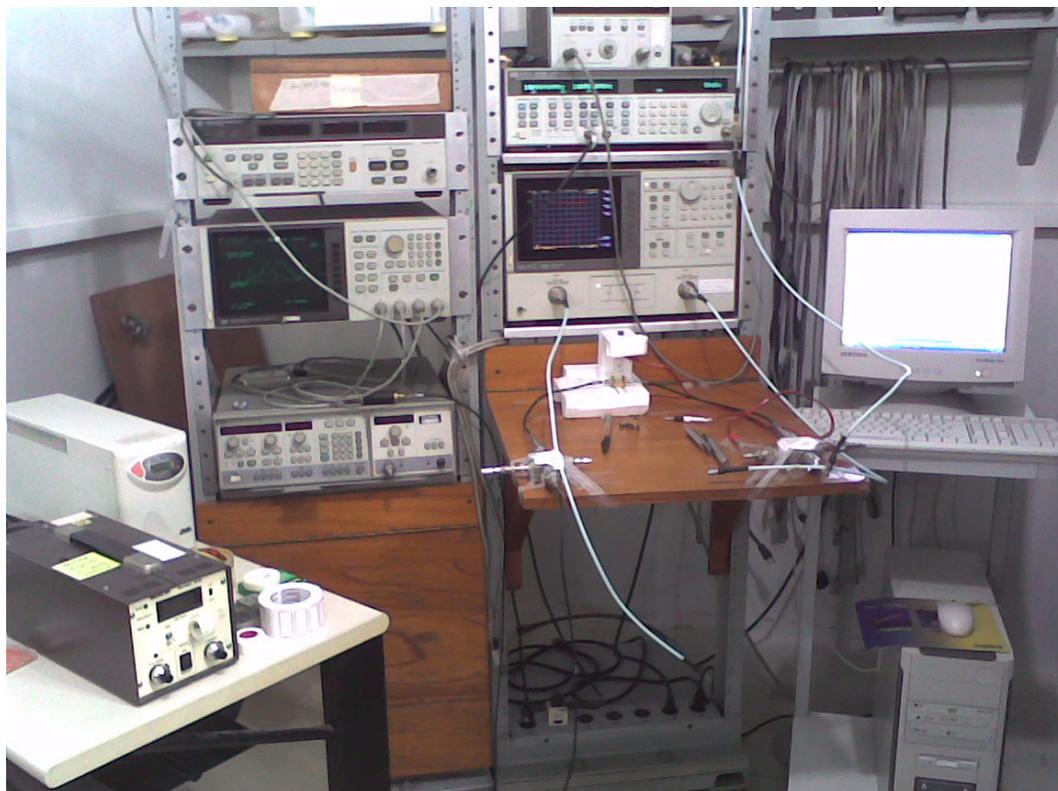


Figura 37. Foto da montagem experimental para a medida da resposta dos ressoadores sob a aplicação de alta tensão.

Os ressoadores lineares sobre a alumina que sofreu tratamento eletro-térmico foram testados utilizando a montagem da Figura 37. No teste, com aplicação de alta tensão até aproximadamente 1 kV, não foi observada alteração nos picos de ressonância da resposta de transmissão dos ressoadores. Acredita-se que isto se deva ao fato de os ressoadores apresentarem fator de qualidade muito baixo, por volta de  $Q = 100$  (o valor máximo típico para circuitos planares em alumina é 200).

Este resultado não nega a possibilidade de alteração das propriedades da alumina por meio do tratamento eletro térmico, contudo indica que possivelmente o método utilizado não foi apropriado para sua avaliação. Acredita-se que a utilização de métodos mais sensíveis possam detectar alterações mais sutis na alumina.

### **6.3. Vidros**

Nesta seção são apresentados todos os procedimentos realizados para o tratamento eletro-térmico e caracterização dos vidros boro-silicato e sodo-cálcico. Ao longo das etapas, os resultados obtidos são apresentados e discutidos.

#### **6.3.1. Tratamentos eletro-térmicos**

Amostras de vidro boro-silicato da marca Schott e sodo-cálcico da marca Corning, conforme especificadas nas seções 4.4 e 4.5, foram submetidas ao tratamento eletro-térmico descrito no capítulo 3. A montagem utilizada encontra-se na Figura 38.

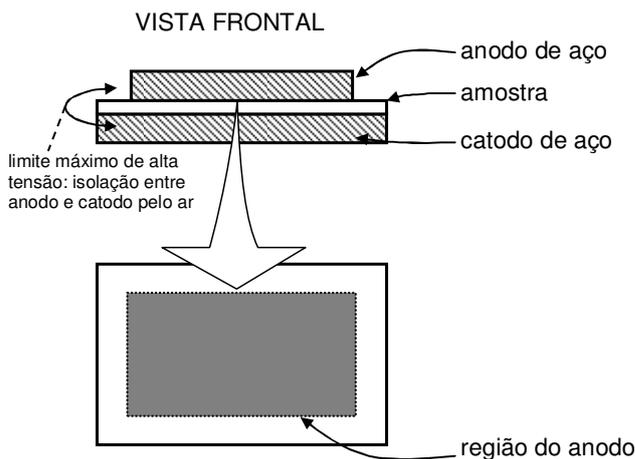


Figura 38. Esquema do arranjo experimental para polarização eletro-térmica das amostras de vidro.

As amostras possuem espessura aproximada de 1,0 mm e foram cortadas nas dimensões 40,0×25,0 mm, pois a fotoalinhadora do LabSem, utilizada para a delimitação da metalização do anodo e para a confecção dos circuitos não permite a utilização de substratos com dimensões maiores que 40,0 mm.

Em todos os experimentos de tratamento eletro-térmico, foi utilizado anodo de alumínio evaporado sobre o vidro e delimitado por fotolitografia (seção 5.3) a um retângulo de 20×40 mm, centralizado na face do vidro a ser polarizada. Para isso foi confeccionada uma máscara com o formato do anodo. Foi utilizado, também, um anodo de aço com a mesma dimensão do anodo evaporado para realizar o contato com a estrutura da Figura 6, proteger o filme evaporado e garantir a distribuição homogênea de corrente. Utilizou-se um catodo de aço de contato com dimensões 25×75 mm, centralizado com a amostra e o anodo. Foi utilizado também um catodo depositado sobre o vidro, com a mesma dimensão e alinhado ao anodo depositado.

A importância de um anodo metalizado muito mais significativa, pois este garante a uniformidade do processo de polarização e da criação da camada de depleção de íons sob aquela superfície.

Em seguida, foram realizados testes com os vidros em temperaturas entre 270°C e 290°C. Foram aplicados diversos valores de tensão, entre 100 V e 4,0 kV. A maior delas aplicada com sucesso no tratamento de boro-silicato foi 3,2 kV, enquanto para o vidro sodo-cálcico não foi possível superar 1,5 kV. Valores superiores apresentaram descargas indesejadas pela formação de arcos elétricos

através do vidro, pelo rompimento dielétrico (tensão aplicada superior à tensão de ruptura).

A Figura 39 apresenta o registro de tensão aplicada e comportamento da corrente medida teste durante o tratamento eletro-térmico de amostra de vidro boro-silicato a 290°C. A duração foi de 20h40' (para maior clareza, apenas as 10 primeiras horas estão registradas na figura) e a tensão foi 3,2 kV, aplicada em degraus progressivos. O comportamento de decaimento de corrente observado na Figura 39 é característico de corrente de polarização eletrotérmica [5], [7], [9].

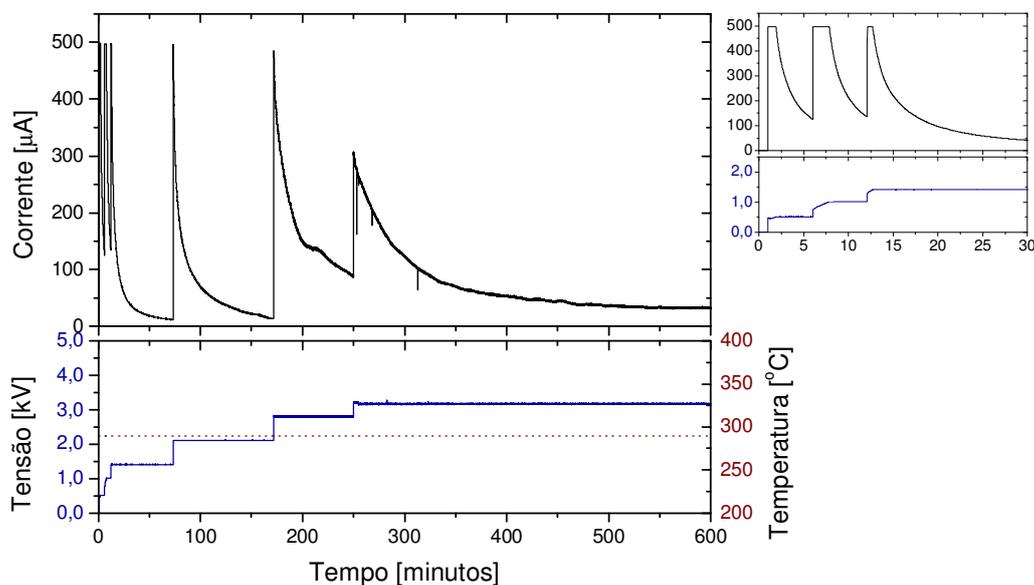


Figura 39. Tensão e comportamento da corrente durante tratamento eletro-térmico de amostra de vidro boro-silicato a 290°C. Duração 20h40'; tensão 3,2 kV, aplicada em degraus progressivos. Detalhe: comportamento nos primeiros 30 minutos.

O tempo adotado para o tratamento eletro-térmico visando à depleção de íons é muito mais longo que o tempo ótimo de um procedimento de polarização visando à criação de efeitos ópticos não-lineares em vidros, que, em alguns casos, pode ser de poucos minutos. Entretanto, em alguns vidros o tratamento pode demorar dezenas de horas [5].

No caso do tratamento com a finalidade de reduzir as perdas, busca-se maximizar a espessura da camada de depleção. Neste caso, é interessante que se esgote a população de íons alcalinos que poderiam migrar com o processo. A geração de efeitos ópticos não-lineares no vidro, objetivo tradicional da

polarização eletro térmica, está relacionada à gravação de um campo elétrico estático no material, à intensidade desse campo e, também e à distribuição da densidade de íons dentro da camada de depleção, tratando-se de um procedimento mais rápido.

Deste modo, decidiu-se apenas finalizar o procedimento de polarização quando a corrente registrada caísse a níveis muito inferiores à corrente original, chegando próxima à ordem de grandeza da corrente de fuga e indicando que a migração de íons chegou a níveis desprezíveis.

Como já mencionado no caso da alumina, durante a formação da camada de depleção, sua resistividade vai aumentando gradativamente à medida que os íons (portadores de carga) sofrem migração e são removidos daquela região [5], [7]. A tensão final de 3,2 kV foi aplicada em degraus progressivos, para aproveitar esse aumento de resistividade e evitar a formação de tunelamento de corrente dentro do material (*thermal runaway*) [5].

O detalhe da Figura 39 mostra o comportamento do processo nos primeiros 30 minutos. A fonte de alta tensão utilizada (seção 3.1) possui um dispositivo de segurança limitador de corrente. Esse dispositivo é ajustado para manter a corrente de polarização dentro de determinados limites que não venham a danificar o material durante o processo – esse é outro instrumento que pode ser utilizado para evitar o efeito de *thermal runaway*. Neste experimento, a corrente limite foi ajustada para 500 mA. Observa-se no detalhe da Figura 39 que o limite de corrente foi alcançado. A tensão aplicada na amostra fica então limitada pela fonte (obedecendo a Lei de Ohm). À medida que a resistividade do material aumenta, a tensão vai sendo liberada até que atinge o valor desejado e a corrente começa a decair, com o padrão típico do processo de polarização.

A Figura 40 apresenta o registro de tensão aplicada e comportamento da corrente medida teste durante o tratamento eletro-térmico a 290°C de amostra de vidro sodo-cálcico da marca Corning. A duração foi de 14h20' e a tensão foi 0,8 kV, aplicada em degraus progressivos.

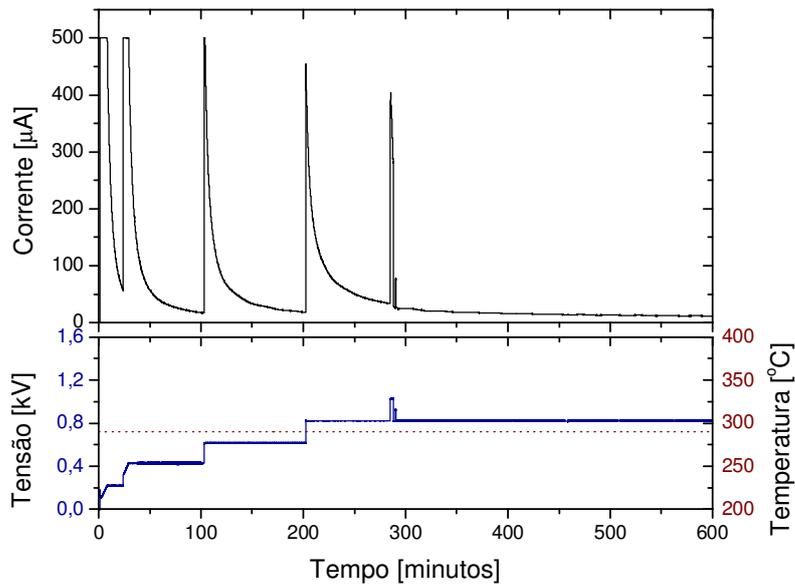


Figura 40. Tensão e comportamento da corrente durante tratamento eletro-térmico de amostra de vidro sodo-cálcico a 290°C. Duração 14h20'; tensão 0,8 kV, aplicada em degraus progressivos.

A Figura 41 e a Figura 42 apresentam o registro de tensão aplicada e comportamento da corrente medida teste durante o tratamento eletro-térmico a 290°C de amostra de vidro sodo-cálcico da marca Corning e da marca Solidor, respectivamente. A duração foi de 9h30' e a tensão foi 1,2 kV, aplicada em degraus progressivos.

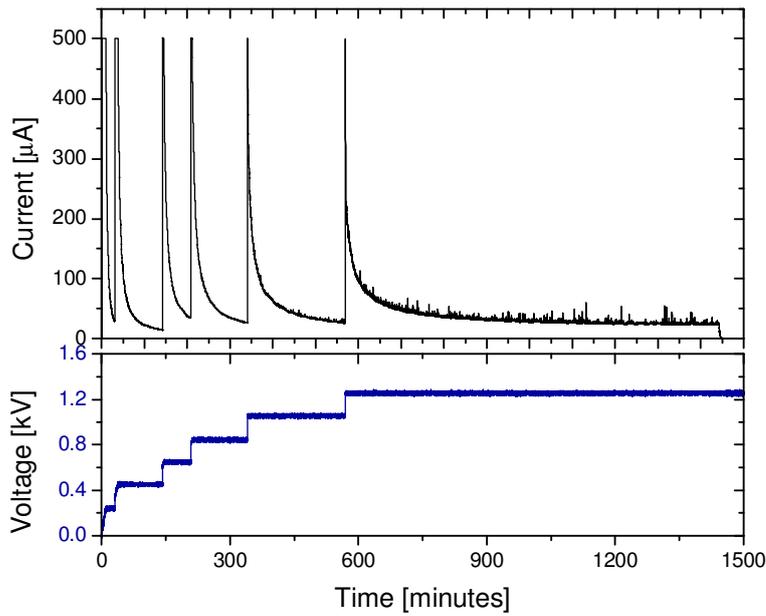


Figura 41. Tensão e comportamento da corrente durante tratamento eletro-térmico de amostra de vidro sodo-cálcico da marca Corning™ a 290°C. Duração 14h20'; tensão 0,8 kV, aplicada em degraus progressivos.

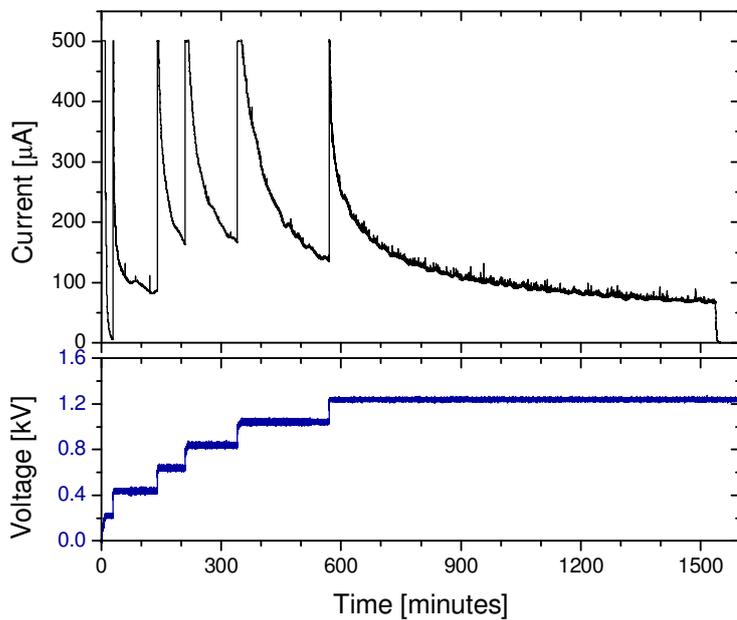


Figura 42. Tensão e comportamento da corrente durante tratamento eletro-térmico de amostra de vidro sodo-cálcico da marca Solidor a 290°C. Duração 9h30'; tensão 1,2 kV, aplicada em degraus progressivos.

Nota-se que os níveis de corrente de polarização do vidro da marca Solidor são mais elevados que no da marca Corning. Ambas as marcas de vidro do tipo sodo-cálcico apresentaram níveis de corrente de polarização bem mais elevados que o vidro do tipo boro-silicato.

Os efeitos do tratamento eletro-térmico nas amostras de vidro foram então avaliados por meio da análise microscópica no MEV e de caracterização em microondas, ambos apresentados a seguir.

### **6.3.2. Análise microscópica**

As amostras de vidro boro-silicato e sodo-cálcico que passaram pelo tratamento eletro-térmico foram analisadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) no Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia da PUC-Rio.

Em primeiro lugar, é considerado o vidro de boro-silicato cujo tratamento está representado na Figura 39. Foi realizado um corte transversal da amostra dentro da região polarizada, para análise EDS dos elementos abaixo do anodo.

A Figura 43 mostra a análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV) do vidro. Na Figura 43(a), o mapeamento EDS do sódio: a parte mais clara corresponde a maior concentração de sódio, a parte mais escura representa a camada de depleção, onde a concentração de íons de sódio é reduzida. Na Figura 43(b), a imagem SE contra o perfil de concentração de sódio, extraído do mapeamento EDS de (a), fornecendo um panorama da camada de depleção e da variação da concentração de íons em função da profundidade. A profundidade efetiva da camada de depleção criada no processo foi aproximadamente 14  $\mu\text{m}$ . O contorno da camada de depleção em (a) parece ondulado, mas se trata de efeito de relevo, pois esse perfil acompanha a deformação de relevo apresentada em (b).

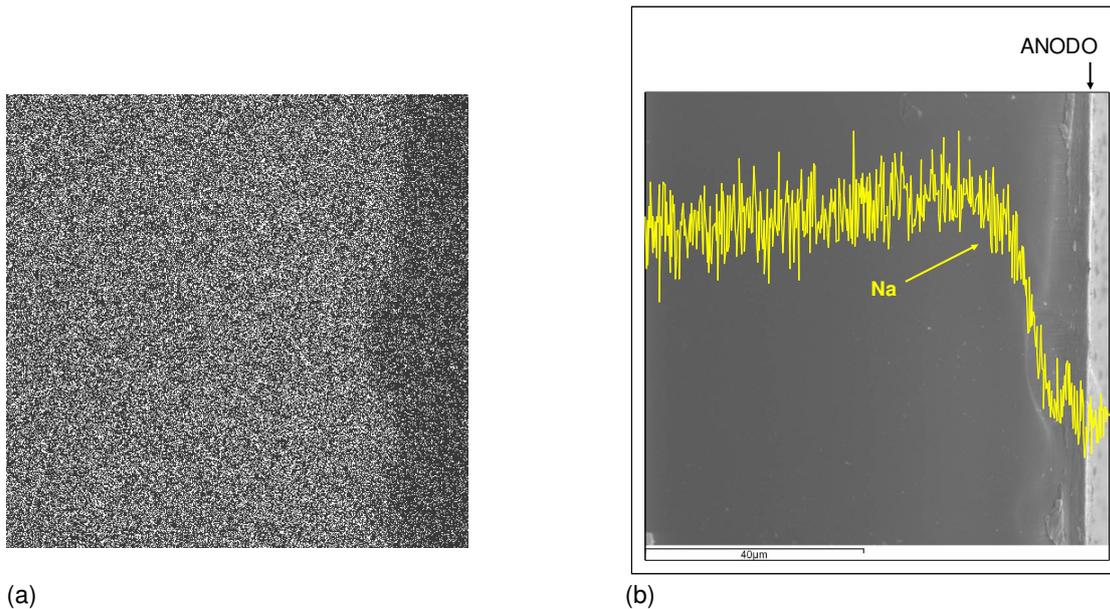


Figura 43. Análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV) do corte transversal de um vidro boro-silicato com depleção de íons: (a) mapeamento EDS do sódio e; (b) imagem SE com o perfil de concentração de sódio em função da profundidade, extraído do mapeamento EDS em (a).

Da Figura 43, verifica-se que a premissa (considerada para as simulações) de que a camada de depleção tem espessura bem definida não é uma boa aproximação. Observa-se que a camada de depleção não termina abruptamente, mas existe uma região de transição na qual a concentração de sódio varia continuamente entre o valor reduzido na camada de depleção e o valor no resto do vidro.

A carga total  $Q$  transportada através da amostra durante o processo foi obtida pela integração numérica da corrente registrada (Figura 39), eliminando a corrente de fuga (aproximada pelo piso de corrente residual no final do processo). Essa carga corresponde aos íons que migraram. A profundidade  $d$  da camada de depleção pode ser estimada [6], [9] por:

$$d = Q/e \cdot A \cdot C_{Na} \quad (1)$$

onde  $e$  é a carga do elétron,  $A$  é a área dos eletrodos (anodo) e  $C_{Na}$  é a concentração de sódio no vidro. De acordo com as informações do fabricante sobre a composição do vidro Tabela 2, óxido de sódio corresponde a aproximadamente 4% em peso, resultando  $C_{Na} \approx 1.71 \times 10^{27} \text{ m}^{-3}$ . Isto leva a uma profundidade estimada de 17  $\mu\text{m}$ , próxima à medida com auxílio do MEV-EDS.

Na Figura 44 é mostrada a superfície do catodo no vidro boro-silicato, após o tratamento eletro-térmico representado na Figura 39. Confirmando o que foi mencionado no preâmbulo do capítulo 3, foi observado que o tratamento provocou mudanças no aspecto da face de vidro do catodo, com o surgimento de pequenas manchas esbranquiçadas. A região escura observada na Figura 44 é o anodo depositado, na face oposta da lâmina de vidro.



Figura 44. Catodo de amostra de vidro boro-silicato após o tratamento eletro-térmico, mostrando alterações no aspecto da superfície do vidro.

A análise de composição no MEV-EDS identificou a presença de concentrações de sódio no catodo superiores às especificações do vidro. A imagem BSE de uma região do catodo está representada na Figura 45, indicando dois pontos onde foi realizada a análise EDS. Foram registradas, na Figura 45(a), concentrações bem mais elevadas de sódio nos pontos localizados dentro das manchas brancas do catodo, em comparação com as regiões, na Figura 45(b), que se encontravam livres das manchas observadas na Figura 44.

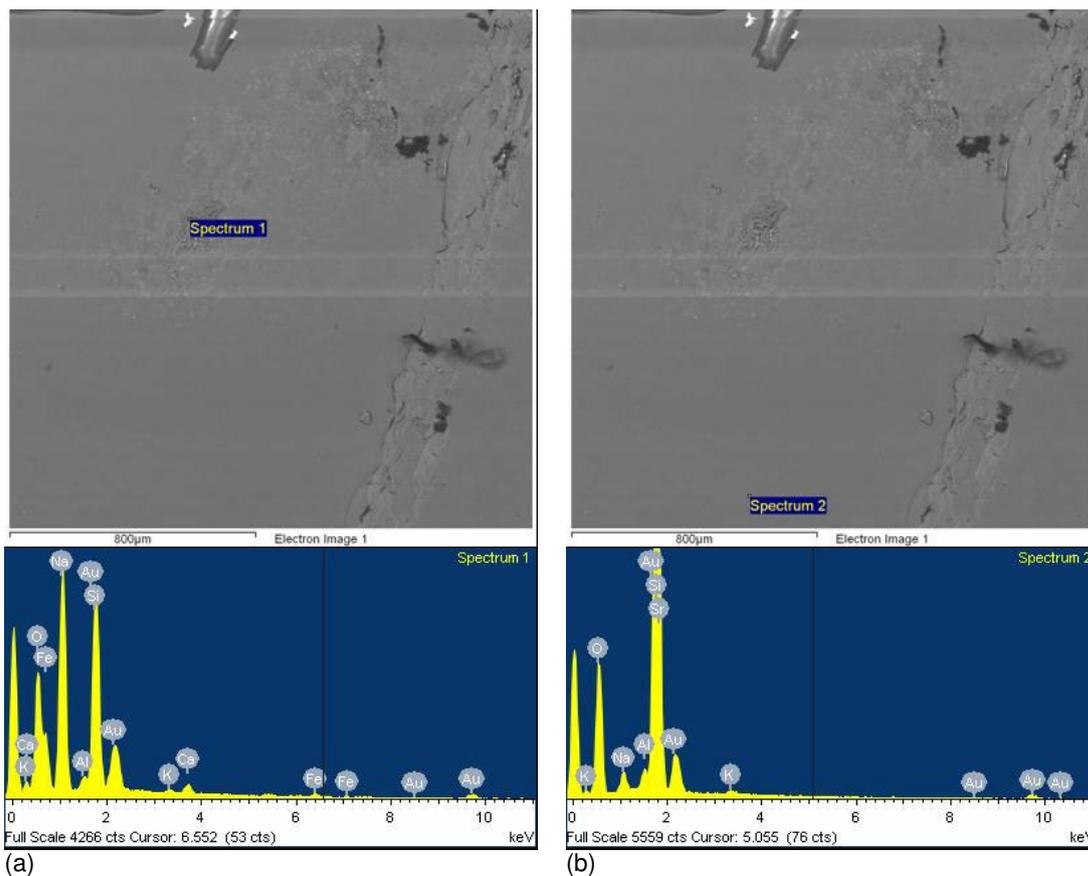


Figura 45. Imagem BSE de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e análise EDS dos elementos presentes na superfície do catodo de uma amostra de boro-silicato após tratamento eletro-térmico: (a) em um ponto dentro (*Spectrum 1*) e; (b) em um ponto do catodo fora (*Spectrum 2*) de uma das manchas brancas observadas na Figura 44.

A Figura 46 é análoga à Figura 44 e a superfície do catodo no vidro sodo-cálcico, após o tratamento eletro-térmicos representado na Figura 41. A região escura corresponde ao anodo de alumínio depositado, na face oposta da lâmina de vidro. Novamente, foi observada a formação de pequenas manchas esbranquiçadas. A análise MEV-EDS dessa superfície indicou um pequeno aumento na concentração de sódio, porém não foram registradas diferenças significativas entre as regiões esbranquiçadas e o resto da superfície do catodo.

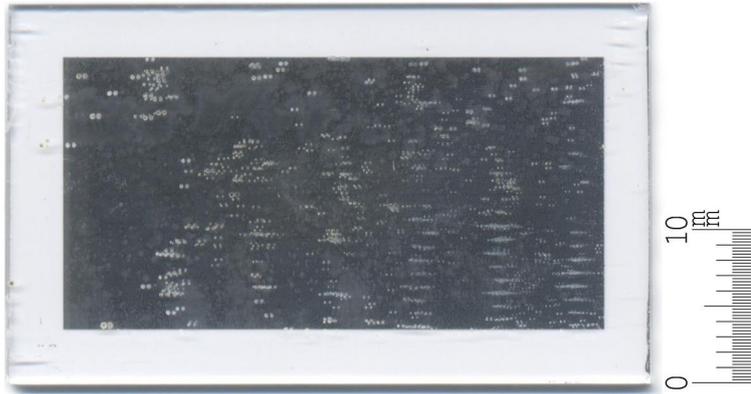


Figura 46. Catodo de amostra de vidro sodo-cálcico após o tratamento eletro-térmico, mostrando alterações no aspecto da superfície do vidro.

O mapeamento EDS do corte transversal do vidro sodo-cálcico na região abaixo do anodo não foi capaz de fornecer uma medida precisa da profundidade da camada de depleção. Dois fatores contribuíram para isso. Primeiro, concluiu-se que a tensão utilizada (0,8 kV) era muito baixa e a camada de depleção formada deve ser bastante estreita e, sendo assim, perto da resolução do EDS. Além disso, outros resultados da mesma seção de MEV-EDS indicam que o detetor EDS do equipamento estava desalinhado, diminuindo em quase uma ordem de grandeza a precisão espacial do mapeamento EDS.

### 6.3.3. Caracterização em microondas

A caracterização dos efeitos obtidos na faixa de microondas com o tratamento eletro-térmico nos vidros é implementada por meio da medida das propriedades dielétricas efetivas dos substratos submetidos a tratamento, e comparação com a dos substratos de referência (sem tratamento). Para isso, é utilizada a técnica de calibração TRL-multilinha (seção 5.2).

Esta técnica prevê a utilização de um conjunto de padrões de calibração confeccionados no substrato a ser caracterizado. Fundamentalmente, são necessários um curto, uma linha direta (thru) e um conjunto de pelo menos uma linha de comprimento maior que a direta. Para isso, foi dimensionado um conjunto de calibração CPW para o substrato de vidro boro-silicato. Os mesmos padrões serão utilizados para as medidas em vidro sodo-cálcico, sem perda de desempenho do método.

Para definição das dimensões das linhas CPW, foram utilizados os resultados de simulações no aplicativo CST Microwave Studio® (seção 6.1), que indicam que linhas CPW com largura de espaçamento lateral estreita são mais eficazes para representar as reduções de perdas dielétricas efetivas que se pretende medir. Foi adotada a linha CPW estreita simulada naquela seção, com largura do condutor central  $W = 250 \mu\text{m}$  e largura do espaçamento lateral  $G = 45 \mu\text{m}$ .

Essas dimensões recaem na mesma dificuldade encontrada para a linha estreita de alumina do ressoador CPW3 na seção 6.2.2: a soma das dimensões da linha CPW ( $W+2G = 340 \mu\text{m}$ ) é menor que a largura da lingüeta plana ( $500 \mu\text{m}$ ) que realiza o contato dos conectores RADIALL com a linha CPW, o que causaria um curto-circuito entre essa lingüeta e os planos de terra laterais.

A solução é, novamente, a realização de uma linha afilada (*taper*), para adaptar a geometria da linha CPW à largura do conector. No caso dos padrões de calibração, esse problema é mais crítico que no caso dos ressoadores em alumina, onde o objetivo era apenas medir as frequências de ressonância. Procura-se obter a melhor adaptação possível, para que os padrões de calibração tenham alto coeficiente de transmissão e baixa perda de retorno, para evitar reduzir a sensibilidade das medidas. É importante ressaltar que a utilização dos *tapers*, ou outra estrutura de adaptação, no conjunto de padrões de calibração está prevista no método TRL-multilinha [48] e não deve interferir significativamente na precisão das medidas.

Considerando o limite de resolução do procedimento de fotografação com fotolito utilizado e descrito na seção 5.3, e as discontinuidades provocadas pela baixa resolução disponível, foi dimensionado um *taper* linear para utilização no conjunto de padrões. Destaca-se que a estrutura linear fornece desempenho suficientemente próximo a estruturas mais complexas [63], cuja execução não seria viável dados os limites de resolução impostos pelo processo.

O *taper* linear foi projetado e está ilustrado na Figura 47. Para verificar seu desempenho, foi conduzida uma simulação no aplicativo CST Microwave Studio®, na configuração *back-to-back* da Figura 47(b). As curvas do módulo dos parâmetros de espalhamento obtidos por simulação estão na Figura 48, onde se constata que o desempenho do *taper* projetado é aceitável, com perda de inserção máxima de 0,3 dB e perda de retorno máxima de 17 dB na faixa até 20 GHz.

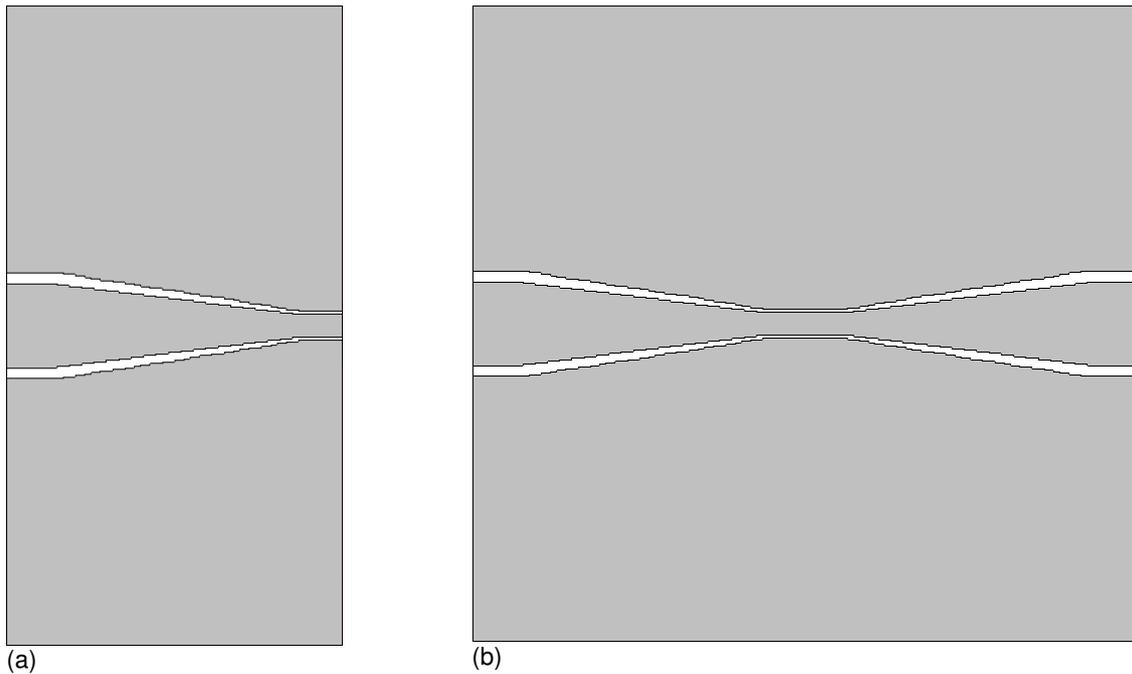


Figura 47. Ilustração do *taper* linear com passos discretos para adaptação da geometria da linha CPW3 ( $W = 250 \mu\text{m}$  e  $G = 45 \mu\text{m}$ ) para o conector: (a) *taper*; (b) configuração *back-to-back* para simulação.

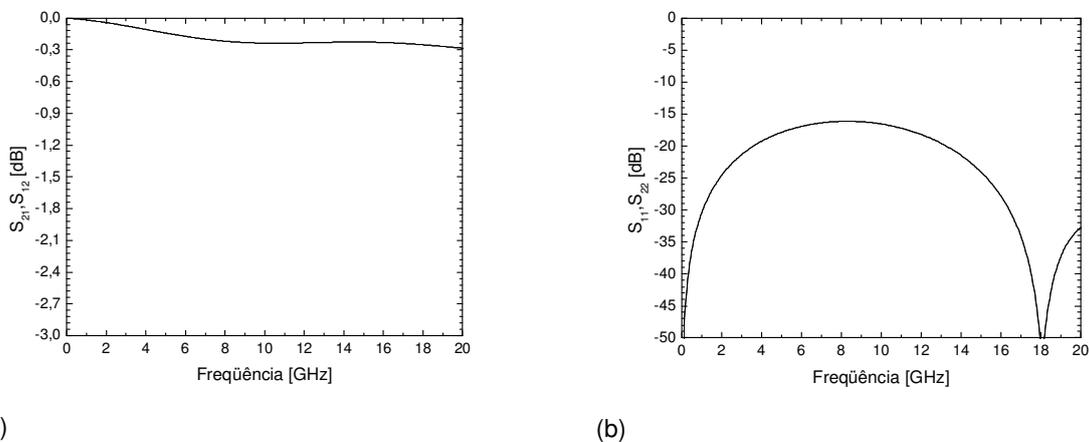


Figura 48. Simulação dos parâmetros de espalhamento do *taper* linear com passos discretos para adaptação da geometria da linha CPW3 para o conector, em configuração *back-to-back*: (a) transmissão e; (b) reflexão.

As características do conjunto de padrões de calibração em configuração CPW desenvolvido para a aplicação do método TRL-multilinha são apresentadas na Tabela 9. Foram projetadas três linhas com comprimentos diferentes. Segundo o método estatístico do procedimento de calibração TRL-multilinha, quanto maior

o número de medidas diferentes realizado, menor o erro final atingido, mesmo que sejam realizadas múltiplas medidas dos mesmos padrões.

Tabela 9. Características dos padrões CPW de calibração TRL-multilinha dimensionados para o substrato de vidro boro-silicato.

	<b>Curto (SHORT)</b>	<b>Linha direta (THRU)</b>	<b>Linha 1 (LINE1)</b>	<b>Linha 2 (LINE2)</b>	<b>Linha 3 (LINE3)</b>
Largura da linha central $W$ [ $\mu\text{m}$ ]	210	210	210	210	210
Largura do espaçamento lateral $G$ [ $\mu\text{m}$ ]	45	45	45	45	45
Comprimento do padrão $L$ [mm]	0	0	5	15	25
Largura total do circuito [mm]	5	5	5	5	5
Comprimento total do circuito [mm]	3	6	11	21	31
Impedância característica $Z$ [ $\Omega$ ]	41	41	41	41	41
Constante dielétrica efetiva $\epsilon_{\text{eff}}$	3	3	3	3	3

A Figura 49 ilustra a máscara confeccionada com a topologia dos padrões CPW para calibração TRL-multilinha da Tabela 9 dimensionados para fabricação em vidro. Todos os circuitos ficaram compreendidos em uma área inferior à área do anodo de aço (18×35 mm). A área excedente do anodo foi preenchida com duplicatas dos padrões menores, utilizados caso algum circuito se danificasse durante o processo de fabricação e montagem.

A fabricação de todo o conjunto de padrões de calibração no mesmo substrato para cada caracterização é necessária, uma vez que todos devem compartilhar de uma camada de depleção com as mesmas características. Deste modo, isso é garantido pois todos os circuitos terão recebido o mesmo tratamento eletro-térmico.

A máscara dimensionada e apresentada na Figura 49 foi confeccionada em fotolito e utilizada para a fabricação dos circuitos no LabSem.

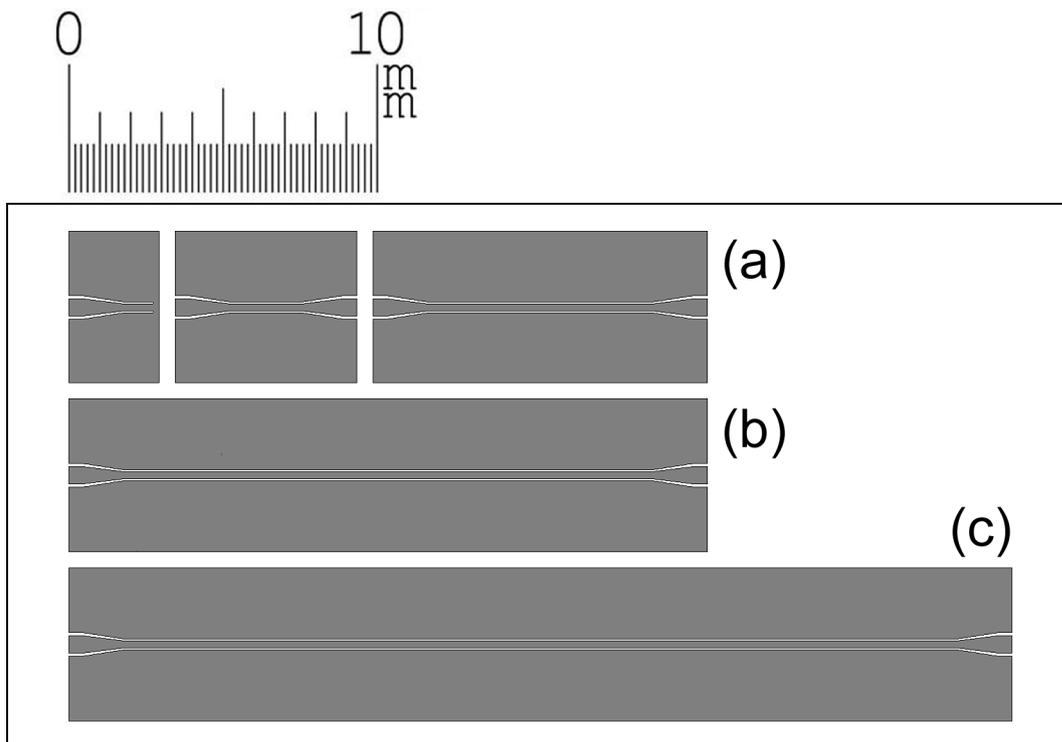


Figura 49. Representação da máscara com a topologia dos padrões CPW de calibração TRL-multilinha dimensionados para confecção nos substratos de vidro. Escala: 4:1. (a) Padrões de curto (SHORT), linha direta (THRU) e linha 1 (LINE1), (b) padrão linha 2 (LINE2); e (c) padrão linha 3 (LINE3).

Os circuitos da Figura 49 foram construídos sobre substrato de boro-silicato Schott, cortados, montados em caixas de latão e conectorizados. O contato dos planos de terra laterais foi realizado com Epoxy Epotek H20E, curado a 115°C durante 20 minutos. O conjunto de padrões foi medido no analisador de redes HP8720C e os parâmetros de espalhamento utilizados como entrada para a rotina de calibração TRL-Multilinha desenvolvida no MatLab (Apêndice A). O valor da constante dielétrica efetiva e do coeficiente de atenuação obtidos são apresentados na Figura 50. As curvas da Figura 23, resultantes da simulação para estas linhas sobre boro-silicato não-depletado foram acrescentadas para comparação. Na curva do coeficiente de atenuação, foi somada a perda no condutor, calculada analiticamente [44], [45]. Observa-se excelente concordância entre as curvas medidas e as simulações.

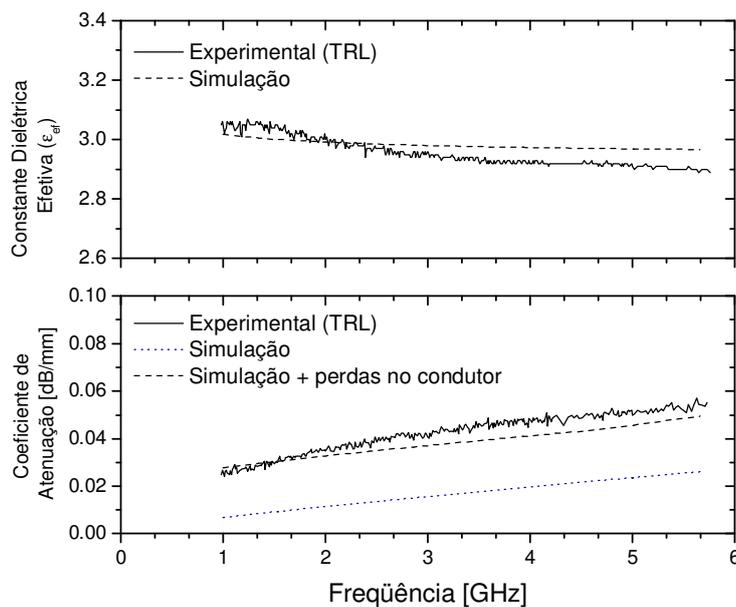


Figura 50. Características medidas para a linha CPW com condutor central  $W = 250 \mu\text{m}$  e espaçamento  $G = 45 \mu\text{m}$ : constante dielétrica efetiva e coeficiente de atenuação. As curvas simuladas são apresentadas para comparação.

Infelizmente, como já mencionado anteriormente, não foi possível realizar com sucesso essas linhas CPW nos outros tipos de vidro, nem tampouco no boro-silicato polarizado, onde a aderência do alumínio tem pior qualidade.

Foram então realizadas linhas na configuração *microstrip*, nos dois tipos de vidro. Foi escolhida uma largura da linha  $W = 2 \text{ mm}$ , para facilidade de confecção no filme de alumínio e para aumentar a área de confinamento do campo elétrico sob a linha, atravessando a camada de depleção. Os circuitos foram montados e medidos. Suas matrizes de espalhamento foram processadas pela rotina de calibração TRL-Multilinhas.

A Figura 51 mostra a constante dielétrica efetiva e coeficiente de atenuação medidos para a linha sobre substrato de vidro tipo sodo-cálcico da marca Corning. A constante dielétrica efetiva medida foi aproximadamente  $\epsilon_{ef} = 5,02$ , correspondendo a uma constante dielétrica relativa de

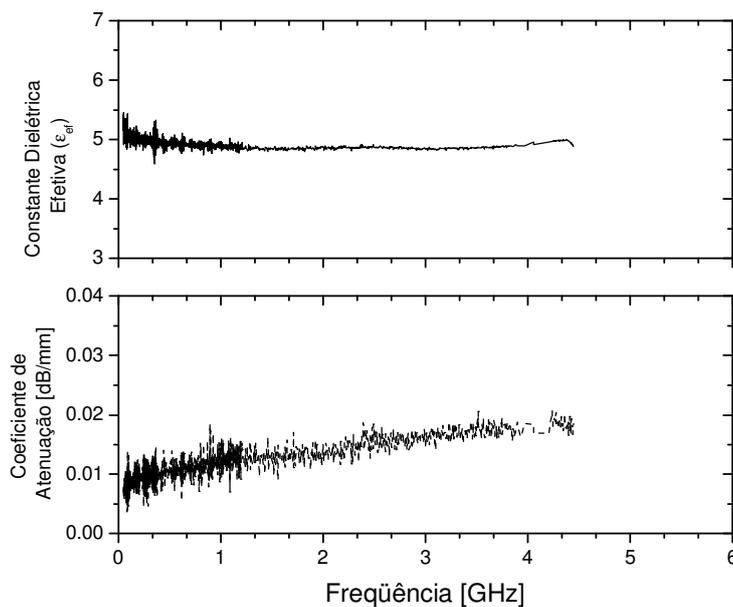


Figura 51. Características medidas para a linha *microstrip* com condutor central  $W = 2,0$  mm sobre substrato de vidro tipo sodo-cálcico da marca Corning™: constante dielétrica efetiva e coeficiente de atenuação.

#### 6.3.4. Circuitos planares de microondas

Com o objetivo de observar alterações em um circuito planar real proporcionados pelo tratamento eletro térmico, foi realizado um filtro de microondas em configuração *microstrip*.

Foi selecionado na literatura [64] um filtro passa-faixa multi-banda de microondas. Sua topologia é compacta, composta por um ressonador de descasamento de impedância (SIR, *stepped impedance resonator*) em configuração *meander* e com uma componente de acoplamento. Esse filtro foi escolhido por proporcionar a combinação dos campos *microstrip* com os campos paralelos à camada de depleção nas regiões de acoplamento do filtro, além de ser banda estreita e de possuir mais de uma banda para avaliação. Adicionalmente, essa topologia limita a primeira banda passante pela adição de zeros nas fronteiras da banda, sendo esses zeros associados ao esquema de acoplamento. Por fim, trata-se de uma topologia bastante investigada recentemente, em uma faixa de frequência de grande interesse, pois atende a vários sistemas rádio celular.

A Figura 52 apresenta a topologia do filtro selecionado e retirado de [64] (em escala 2:1), utilizada como máscara para a fotolitografia e confecção dos circuitos nos substratos vítreos. Optou-se por não refazer o projeto do filtro para cada substrato, utilizando-se a mesma máscara para confecção do filtro nos três tipos de vidro considerados. Esse filtro apresenta dimensões confortáveis para realização dentro das limitações existentes em relação aos filmes de alumínio sobre as lâminas de vidro.

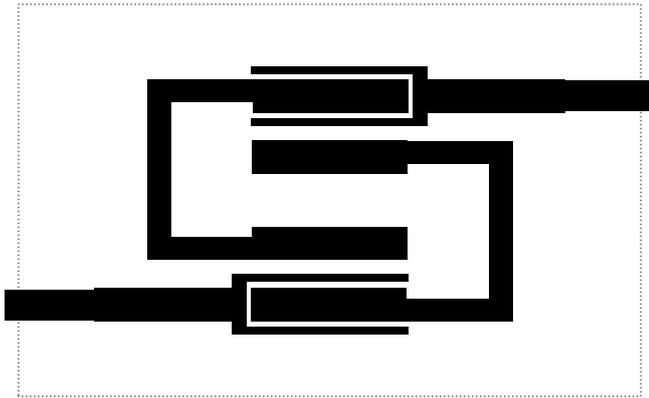


Figura 52. Topologia do filtro realizado nos substratos vítreos [64]. Escala: 2:1.

O filtro da Figura 52 foi modelado no aplicativo CST Microwave Studio e sua resposta em frequência é comparada com o resultado experimental. O modelo tridimensional incluiu a caixa metálica utilizada e a conectorização (*fixture*), para garantir que os resultados considerassem também os efeitos da a montagem do circuito.

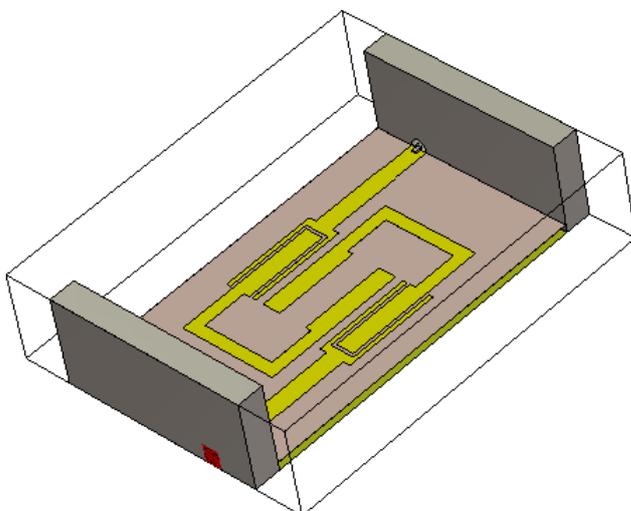
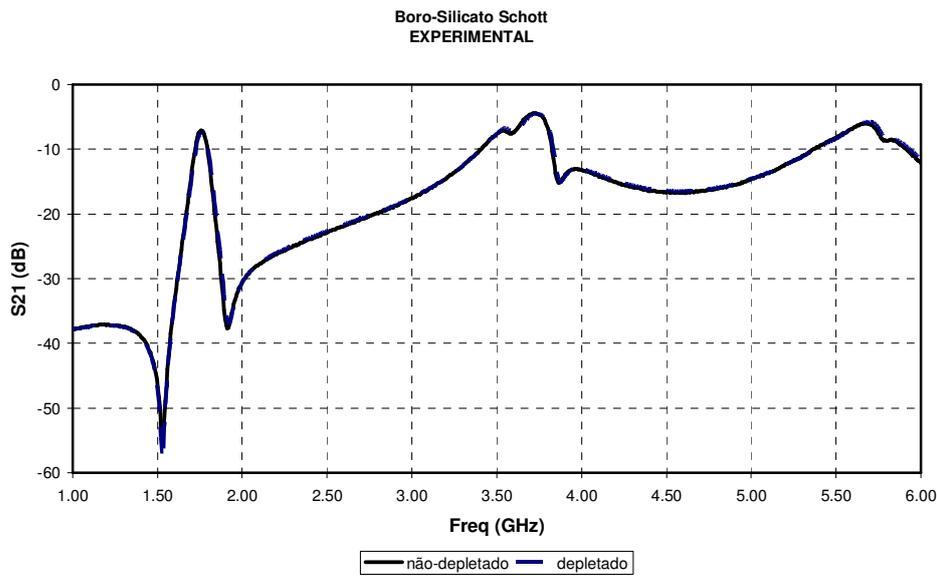


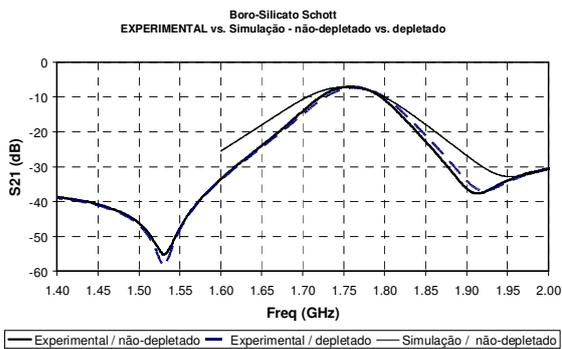
Figura 53. Modelo tridimensional do filtro da Figura 52 para simulação eletromagnética no aplicativo CST Microwave Studio™.

Foram confeccionados filtros idênticos em substratos de vidro sem tratamento eletrotérmico (não-depletado) e em substratos que sofreram a polarização eletro térmica (depletado). A Figura 54 mostra a resposta experimental medida dos filtros confeccionados em vidro boro-silicato da marca Schott. A Figura 55 traz as respostas experimentais dos filtros realizados sobre substrato de vidro tipo sodo-cálcico da marca Solidor.

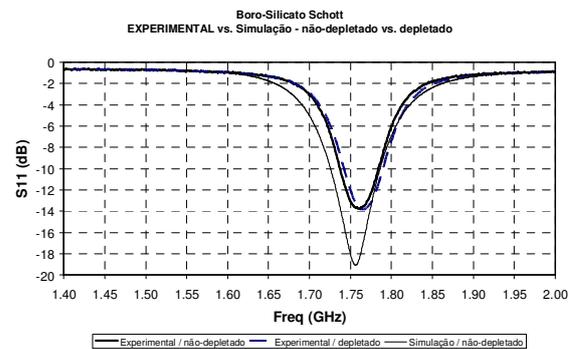
Para ambos os tipos de vidro, observou-se um deslocamento de todas as bandas para a direita (em direção a frequências superiores) nos filtros realizados sobre substrato de vidro depletado. Embora esse deslocamento seja discreto, da ordem de alguns MHz a poucas dezenas de MHz, ele se mostrou consistente em todas as três bandas dos filtros. Esse resultado indica que houve uma pequena diminuição da constante dielétrica efetiva, provavelmente devido à camada de depleção de íons nos vidros depletados.



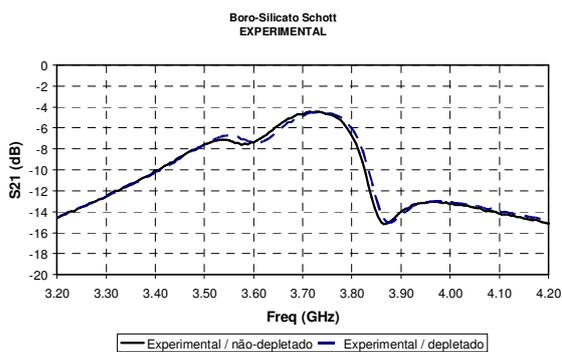
(a)



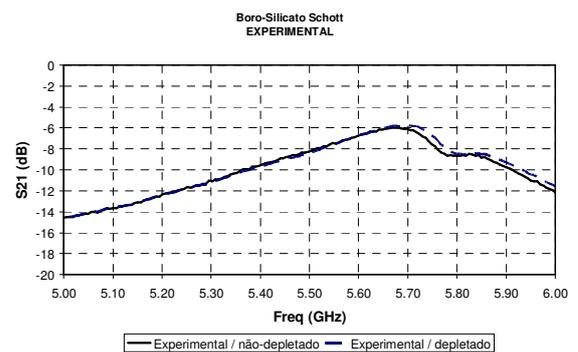
(b)



(c)

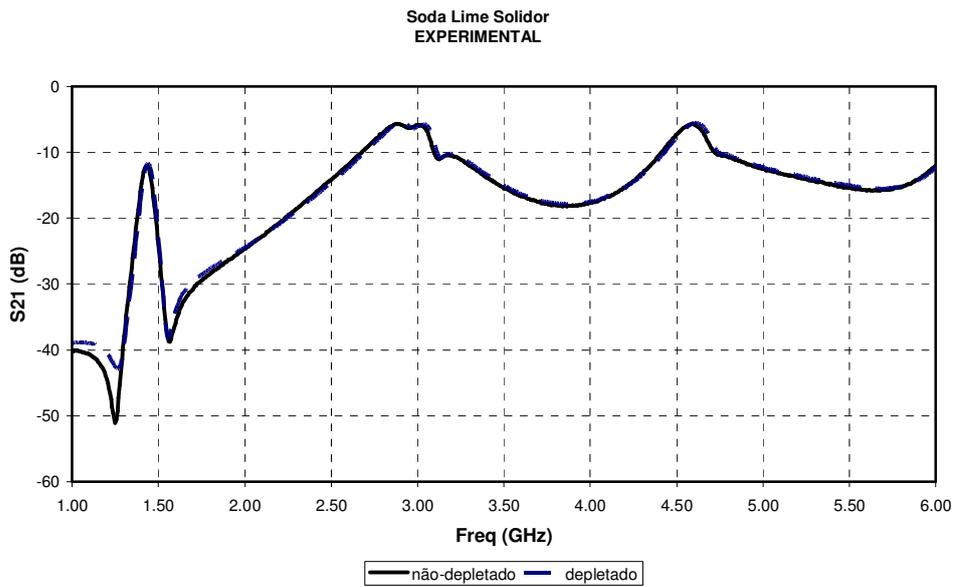


(d)

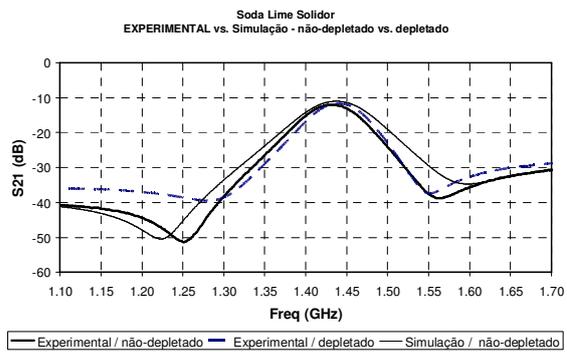


(e)

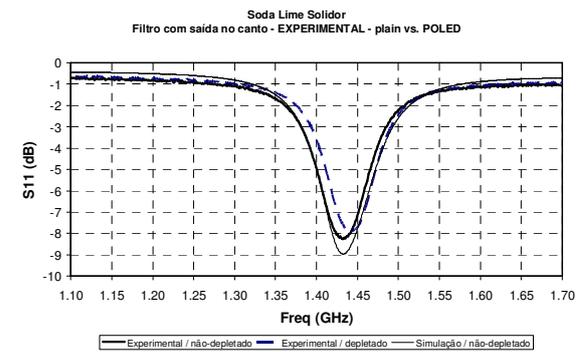
Figura 54. Resultado da medida da resposta do filtro para substrato de vidro sodo-cálcico da marca Solidor, com e sem polarização: resposta de transmissão na banda de 1 a 6 GHz (a); detalhe da transmissão (b) e da perda de retorno (c) na primeira banda; detalhe da transmissão na segunda (d) e na terceira (e) bandas.



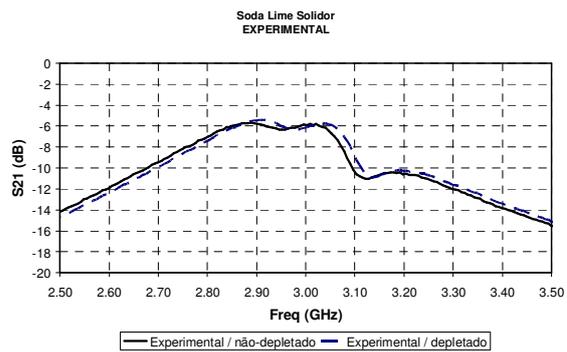
(a)



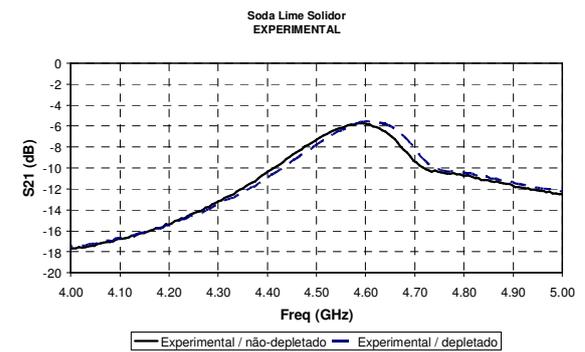
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 55. Resultado da medida da resposta do filtro para substrato de vidro sodo-cálcico da marca Solidor, com e sem polarização: resposta de transmissão na banda de 1 a 6 GHz (a); detalhe da transmissão (b) e da perda de retorno (c) na primeira banda; detalhe da transmissão na segunda (d) e na terceira (e) bandas.