

4 Substratos utilizados e caracterização microscópica

O tratamento eletro-térmico em vidros provoca alterações na estrutura e na composição química do material, alterando suas propriedades ópticas e dielétricas. Algumas dessas alterações provocam mudanças no aspecto facilmente identificáveis: ranhuras e colorações que podem ser vistas com microscópio óptico ou até a olho nu, ou analisadas por indicadores químicos simples. É o caso, por exemplo, da polarização de *soda-lime*, que provoca um depósito hidróxido esbranquiçado e trincas na superfície em contato com o catodo [5].

Por outro lado, nos testes realizados como parte deste trabalho, o tratamento na alumina utilizando um filme depositado como anodo não apresentou qualquer alteração facilmente perceptível nas amostras. Provavelmente, a quantidade de íons deslocados é pequena demais para esse tipo de efeito. Entretanto, quando foi utilizado um bloco de aço em contato com a alumina nua como anodo, a região sob o bloco ficou uniformemente acinzentada, acredita-se que devido a uma reação de oxidação do aço e não à depleção de íons em si.

A realização de polarização eletro-térmica em alumina é uma novidade. Por essa razão, não há registro na literatura de que mecanismos podem estar acontecendo na estrutura da alumina durante o tratamento. É necessário, então, realizar uma caracterização microscópica mais sofisticada, para verificar como o processo de polarização poderá afetar a sua estrutura.

Neste capítulo são abordados alguns aspectos da estrutura da alumina e métodos para sua caracterização microscópica. Também se apresentam os métodos utilizados para a análise e caracterização dos efeitos da polarização nos vidros.

4.1. Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

O microscópio eletrônico de varredura (MEV; ou *Scanning Electron Microscope*, SEM) é um equipamento capaz de produzir imagens de alta ampliação e resolução. Tipicamente, um MEV pode atingir ampliações da ordem

de até 10^5 vezes, com resolução chegando à ordem de alguns nanômetros, com excelente profundidade de foco [38].

O princípio de funcionamento do MEV consiste na emissão de feixes de elétrons por um filamento capilar de tungstênio (eletrodo negativo), mediante a aplicação de uma diferença de potencial que pode variar de 0,5 a 30 kV. As amostras são cobertas (e.g. por evaporação) por uma fina camada condutora (ouro ou carbono), da ordem de dezenas de nanômetros, e ligadas ao eletrodo positivo. O eletrodo positivo atrai fortemente os elétrons gerados, resultando numa grande aceleração.

Quando o feixe de elétrons colimados atinge a amostra, gera partículas e radiação que podem ser usadas para formar uma imagem, permitindo obter informação estrutural, ou realizar análise química da amostra. A profundidade analisada é de ordem inferior a $1\ \mu\text{m}$ na superfície observada. As imagens fornecidas pelo MEV possuem um caráter virtual, pois o que é visualizado no monitor do aparelho é a transcodificação da energia emitida pelos elétrons, e não radiação de luz.

A imagem resultante é chamada de SE (*Scanning Electrons*) e é mostrada ampliada no monitor do equipamento. Neste tipo de imagem, o relevo da estrutura é retratado. As partes mais escuras significam regiões mais profundas, enquanto as mais claras representam as partes mais protuberantes da superfície.

A espectrometria de energia dispersiva de raios-X (EDS; de *Energy Dispersive X-Ray detector*) é um acessório essencial do MEV para determinação da composição química na caracterização microscópica de materiais. Em um MEV equipado com EDS, quando o feixe de elétrons incide sobre a amostra, os elétrons mais externos dos átomos e os íons constituintes são excitados, mudando de níveis energéticos. Ao retornarem para sua posição inicial, liberam a energia adquirida, a qual é emitida em comprimento de onda no espectro de raios-X. Um detector instalado na câmara de vácuo do MEV mede a energia associada a esse elétron. Como os elétrons de um determinado átomo possuem energias distintas, é possível, no ponto de incidência do feixe, determinar em instantes quais os elementos químicos que estão presentes naquele local e, assim, identificar que mineral está sendo observado. O diâmetro reduzido do feixe permite a determinação da composição mineral em amostras de tamanhos muito reduzidos ($< 5\ \mu\text{m}$), permitindo uma análise quase que pontual de todos elementos químicos

com massa atômica superior à do berílio e que estejam presentes em concentração superior a 1%. A resolução espacial aproximada da análise EDS no equipamento do DCMM da PUC-Rio, considerando análise pontual, é um círculo de 3 microns de diâmetro, mas com região de interferência de 6 μm a 10 μm de diâmetro.

A EDS fornece basicamente três tipos de análise. O primeiro é a a própria espectroscopia EDS, que fornece um espectro dos picos de energia associados aos elementos presentes no material da superfície analisada. A partir desses picos, o equipamento identifica os elementos e faz uma contagem, e associa a quantidade encontrada à altura dos picos. Essa análise pode ser realizada em um ponto ou numa região delimitada da superfície. O resultado da análise pode ser na forma de uma figura do espectro de energia com a indicação dos elementos associados aos picos, ou na forma de uma tabela com a relação percentual de cada elemento encontrado.

O segundo tipo de análise fornece uma imagem que retrata o peso atômico médio dos elementos da composição da superfície, chamada BSE (*Back Scattering Electrons*). Neste tipo de imagem, as partes mais escuras correspondem a menor peso, enquanto as mais claras correspondem a maior peso atômico médio.

O terceiro tipo de análise é chamado mapeamento EDS. É uma combinação das duas anteriores. O mapeamento EDS é realizado para cada elemento desejado. O equipamento faz uma contagem do elemento na distribuição espacial e fornece um perfil 2D da quantidade relativa desse elemento na superfície analisada. O resultado dessa análise tem a forma de uma figura correspondendo à região analisada, onde os pontos mais escuros significam menor quantidade, enquanto os pontos mais claros significam maior quantidade do elemento considerado.

4.2. Alumina

A alumina é um óxido de alumínio: Al_2O_3 . Pode apresentar diversas polimorfias, conhecidas (no sistema britânico de nomenclatura) como α (corundum), γ , δ , κ , θ e χ [37]. A α - Al_2O_3 , ou α -alumina, é a fase termo-estável, pelo menos até 1950°C, e é também a de melhores propriedades isolantes e de robustez mecânica.

A alumina que se está utilizando neste trabalho é um tipo normalmente utilizado como substrato para circuitos de microondas. Todavia, seu fabricante

não fornece detalhes de especificação estrutural ou de composição, por motivo de sigilo industrial. Como se trata de uma cerâmica refratária que passou por um processo de fabricação rigidamente controlado a alta temperatura, acredita-se que seja composta, sobretudo, por α -alumina. Além disso, essa seria a fase mais adequada para os requisitos de operação em microondas, com melhores propriedades dielétricas e maior robustez.

Os substratos de alumina utilizados em microondas normalmente têm pureza superior a 99%, pois a quantidade bastante reduzida de impurezas lhes garante baixa perda.

4.2.1. Amostras de alumina utilizadas

As amostras de alumina adotadas para esse trabalho são placas para uso como substrato de circuitos planares de microondas, fabricadas pela Piconics, Inc. Essas placas medem 25,4×25,4 mm por 0,635 mm de espessura (1×1×0,025 polegada), $\epsilon_r = 9,8$ e perdas dielétricas desprezíveis ($\text{tg } \delta \approx 10^{-4}$) na faixa de microondas. A Tabela 1 apresenta algumas propriedades da alumina, fornecidas pelo fabricante. A constante dielétrica elevada e a baixa perda corroboram a hipótese da composição predominante de α -alumina.

Tabela 1. Propriedades da alumina Piconics.

<i>Propriedade</i>	<i>Unidade</i>	<i>Alumina</i>
Pureza	%	99,6
Cor	–	Branca
Dimensões	mm	25,4×25,4
Espessura	mm	0,635
Densidade Nominal	g/cm ³	3,87
Dureza	Rockwell	87
Acabamento da Superfície (com polimento)	μm	<0,0254
Acabamento da Superfície (sem polimento)	μm	<0,1016
Constante dielétrica (em 1 MHz)	–	9,9 \pm 0,1
Tangente de perdas (tg δ)	–	0,0001

Fonte: Piconics, Inc.

Os substratos são entregues com metalização própria para a fabricação de circuitos de microondas, em uma ou nas duas faces. As superfícies passaram por um polimento a altas temperaturas que garantem uma rugosidade inferior a 0,02 micron. A metalização se constitui em uma primeira camada de NiCr (razão 50-50) com aproximadamente 100~200 Angstrom, coberta por uma camada de ouro com espessura 3 μm . A função da camada de NiCr é garantir a aderência à alumina.

As amostras de alumina utilizadas ao longo de todo o trabalho são do mesmo tipo das analisadas neste capítulo.

4.2.2. Análise no MEV

Amostras de alumina foram analisadas no MEV-EDS do Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia (DCMM) da PUC-Rio. As faces analisadas das amostras foram cobertas com 30 Å de ouro por *sputtering*, pois é necessário que a superfície analisada seja condutora. No caso das faces metalizadas em fábrica, a metalização original com 3 μm de espessura de teve de ser retirada, pois o MEV penetra apenas algumas dezenas de Angstrom na superfície.

A superfície da alumina sofreu alteração pela usinagem (polimento a altas temperaturas) na fabricação. A imagem SE do MEV somente proporciona uma avaliação estrutural da superfície do sólido. No caso da superfície alterada pelo polimento, não se obtém informação sobre a estrutura volumétrica granular e a existência de poros dentro do material. A observação de uma superfície não-polida fornece, então, melhor entendimento da estrutura e informações sobre a porosidade. Para isso, foi feito um corte transversal de uma placa: uma amostra foi cortada (riscada com diamante na superfície e quebrada) e a superfície partida (corte transversal) não-polida, conforme ilustrado na Figura 10, foi levada para análise no MEV.

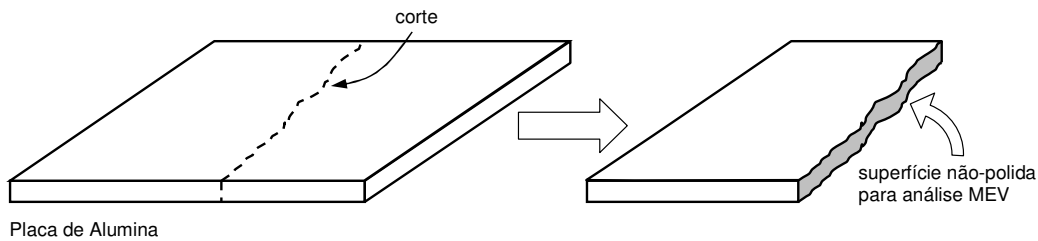


Figura 10. Ilustração de placa de alumina quebrada, indicando a superfície de corte para análise MEV.

A Figura 11 apresenta as imagens SE de microscopia eletrônica de varredura (MEV) para o corte transversal ilustrado na Figura 10 de uma amostra de alumina que não sofreu tratamento eletro-térmico. Conforme comentado na seção 4.1, as partes mais escuras significam regiões mais profundas, enquanto as mais claras representam as partes mais protuberantes da superfície. Investigando a morfologia da estrutura da cerâmica, observa-se uma matriz de grãos com contorno arredondado (sem pontas), característica de fases de corundum ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) [39], confirmando a suposição sobre a composição da alumina. Os grãos apresentam tamanho entre 1-6 μm . Não foram observados grãos em forma de agulha, característicos de γ -alumina (que representaria qualidade inferior).

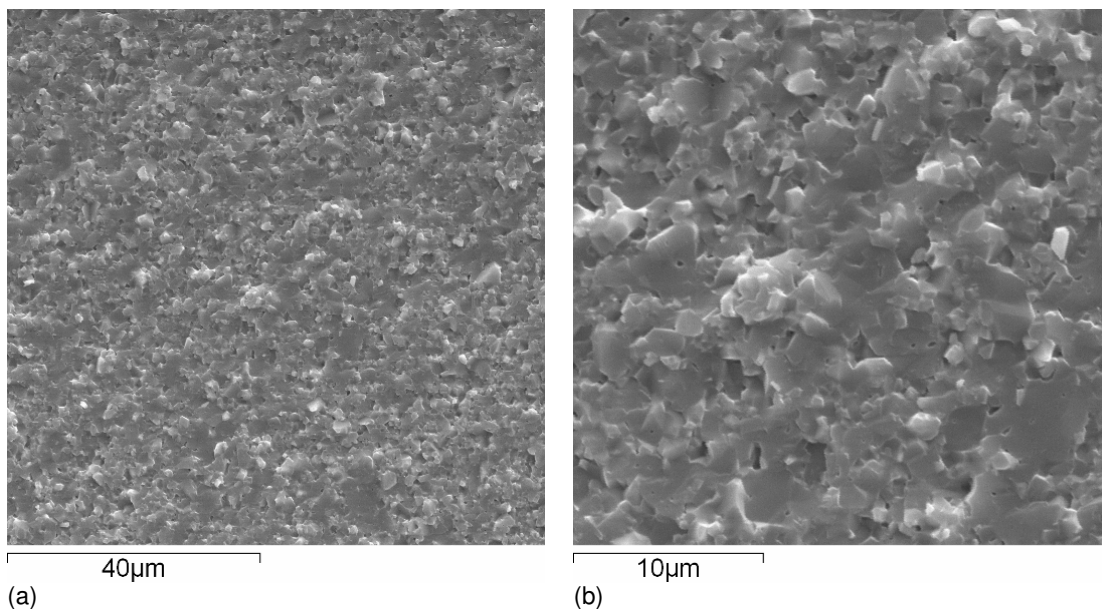


Figura 11. Imagens SE de microscopia eletrônica de varredura (MEV) para o corte transversal de amostra de alumina: (a) com ampliação de 1000 vezes e; (b) 3000 vezes.

Uma análise visual da Figura 11(b), com maior ampliação, indica uma estrutura típica de material sinterizado¹, onde os grãos estão coalescidos² – repare que alguns dos grãos parecem cortados ou raspados, enquanto outros parecem ter sido fundidos. Isto ocorre pois, durante a sinterização com pressão e temperaturas elevadas, a superfície dos grãos cristalinos se funde parcialmente.

Considerando-se o tamanho dos grãos, seria possível que poros na estrutura permitissem a formação de caminhos de deslocamento da corrente, impedindo a formação de uma região de depleção junto à superfície tratada. Após o tratamento eletro-térmico, em caso de polarização, a região de depleção é da ordem de poucos microns. A existência de poros seria, portanto, indesejável. Contudo, não foram observados poros na formação da cerâmica.

A Figura 12 apresenta as imagens SE de microscopia eletrônica de varredura (MEV) para a superfície polida de uma amostra de alumina que não sofreu tratamento eletro-térmico. Esta é a superfície do substrato sobre a qual fica depositada a metalização, ou seja, sobre a qual são realizados os circuitos planares de microondas e na qual serão realizados os tratamentos eletro-térmicos. Para a observação da superfície polida da alumina, toda a metalização de fábrica foi previamente removida da face a ser observada.

¹ A sinterização é um processo no qual pós, com preparação cristalina ou não, uma vez compactados, recebem tratamento térmico, no qual a temperatura de processamento é sempre menor que a sua temperatura de fusão. Este processo cria uma alteração na estrutura microscópica do elemento base. Isto ocorre devido a um ou mais métodos chamados “mecanismos de transporte”: estes podem ser consecutivos ou concorrentes. Sua finalidade é obter uma peça sólida coerente.

² Em química, a coalescência é o processo em que os domínios de fase de composição essencialmente idêntica entram em contato para formar um domínio de fase maior.

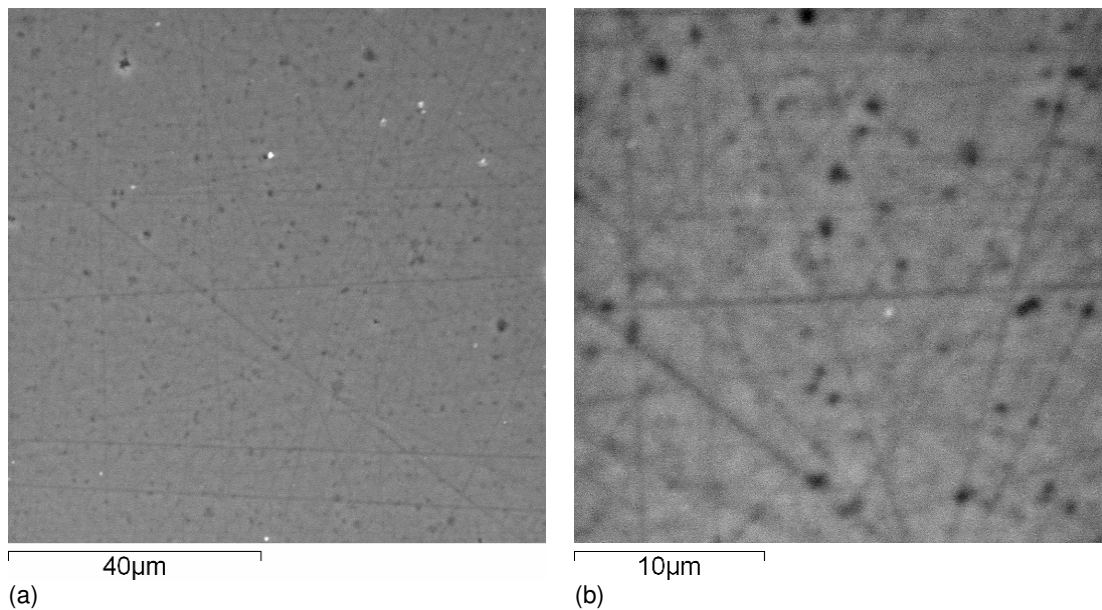


Figura 12. Imagens SE de microscopia eletrônica de varredura (MEV) para a superfície polida de amostra de alumina: (a) com ampliação de 1000 vezes e; (b) 3000 vezes.

O fornecedor garante rugosidade na superfície na ordem de centésimo de micron, a duas ordens de grandeza abaixo do tamanho dos grãos. O polimento da superfície é necessário para a fabricação de circuitos planares de microondas, onde a espessura da metalização é de menos de 3 μm . Na Figura 12 Pode-se observar que o processo de polimento em alta temperatura fundiu os grãos cristalinos de α -alumina, fornecendo uma superfície plana e homogênea. Observam-se, contudo, riscos na superfície causados pelo polimento, o que não seria esperado para um processo comercial de alta qualidade.

O fato da superfície polida do substrato se encontrar plana, contínua e uniforme é altamente favorável à aplicação do tratamento eletro-térmico. Pelo que a análise microscópica indica, a criação de uma camada de depleção homogênea e uniforme sob a superfície do substrato é possível. A estrutura granular poli-cristalina da alumina não-polida, por outro lado, provavelmente não proporcionaria a criação de uma camada de depleção adequada.

Foi realizada, em seguida, a análise EDS da alumina. A finalidade desta análise foi tentar detectar a presença de íons alcalinos na alumina, a fim de permitir o mecanismo de migração de íons que é a base do tratamento eletro-térmico. Embora a pureza nominal da alumina fornecida seja 99,6%, tentou-se confirmar a presença íons alcalinos no material. A Figura 13 mostra os

resultados da análise EDS para a alumina que não sofreu tratamento eletro-térmico. Como se pode observar nos picos de energia nesta figura, os elementos encontrados na amostra de alumina correspondem apenas a alumínio e oxigênio (Al_2O_3). Os picos de energia associados ao ouro correspondem à metalização na superfície da amostra para a realização da medida.

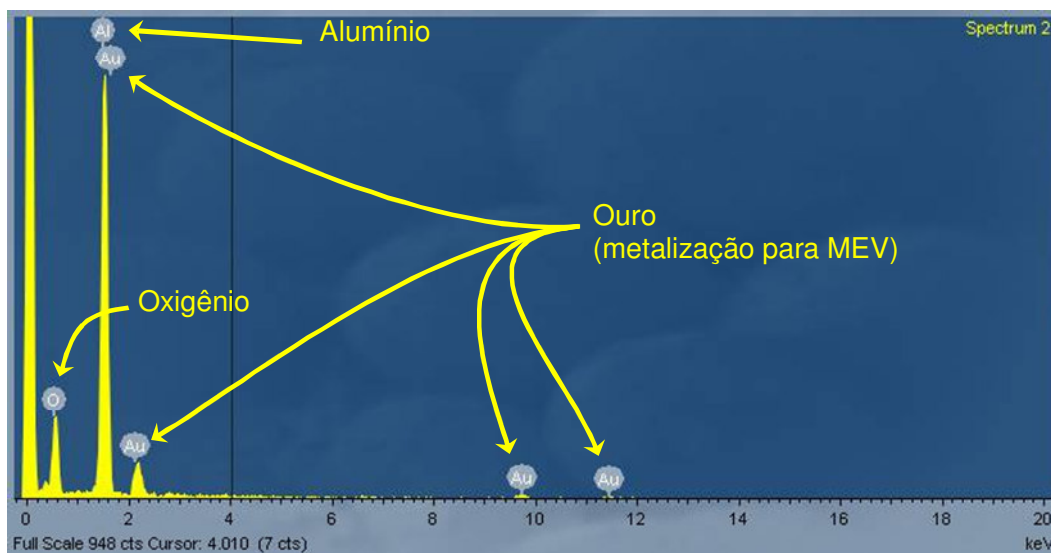


Figura 13. Análise EDS da alumina.

Em todas as análises EDS, nenhum elemento além de alumínio e oxigênio foi encontrado. As impurezas do material não aparecem, concluindo-se que se encontram em quantidades abaixo da sensibilidade do equipamento utilizado (~1%), como esperado. Foi realizado, então, um outro método de análise, com maior resolução, a fim de detectar traços de elementos nas impurezas. Deste modo, na seção 4.2.3 será abordada a análise de espectroscopia de massa.

4.2.3. Espectroscopia de massa

Não sendo possível determinar os elementos presentes nos traços de impurezas na alumina através do EDS, procurou-se como segunda alternativa a espectroscopia de massa. Amostras de alumina do lote utilizado neste trabalho foram levadas ao Departamento de Química da PUC-Rio, para verificação da possibilidade de análise por espectroscopia de massa – ICP-MS (*Inductively Coupled Plasma – Mass Spectroscopy*).

Tradicionalmente, a substância a ser analisada deve ser diluída em forma de solução, que é transformada em vapor. Em seguida, é levada a uma câmara de plasma induzido e esse vapor é então analisado por espectroscopia de massa, fornecendo uma contagem dos elementos encontrados.

Entretanto, a dissolução da alumina refratária é extremamente difícil. Uma das poucas maneiras é o ataque por HF (ácido fluorídrico). O ácido deve então ser retirado da solução, substituído por outros, em reações intermediárias, até que seja atingida uma solução própria para ser levada ao espectrômetro de massa. Ocorre que esse processo é complicado, demorado, caro e, principalmente, contamina a solução final, interferindo nos resultados.

Por esse motivo, utilizou-se uma solução alternativa, que vem se tornando mais comum nos últimos anos: Laser Ablation ICP-MS. Laser ablation é uma técnica para amostragem direta de sólidos para análise química. Um laser de alta potência emite radiação repetidamente em curtos intervalos de tempo, com grande energia, contra a superfície de um material, perfurando o sólido e espalhando átomos, que são levados à câmara com plasma induzido e analisado por espectroscopia de massa, fornecendo uma contagem dos elementos encontrados. As vantagens incluem caracterização direta de sólidos, sem a necessidade de reações químicas para dissolução, risco reduzido de contaminação ou perda de amostras, análise de quantidades pequenas de material e determinação de distribuição espacial dos elementos [40]. Entretanto, essa técnica somente fornece resultados qualitativos da composição do sólido; a calibração do processo (quando o equipamento permite esse tipo de calibração) para resultados quantitativos é extremamente difícil e complicada.

Uma amostra de alumina do lote utilizado neste trabalho foi analisada no equipamento de Laser Ablation ICP-MS (*Inductively Coupled Plasma – Mass Spectroscopy*) do Departamento de Química da PUC-Rio. O resultado da medida de ICP-MS da amostra de alumina indica a presença de uma pequena concentração de sódio, aparentemente espalhada de forma homogênea. Também foi encontrado silício (em maior quantidade) e traços de potássio (em pequena quantidade e aparentemente concentrado em sítios). Esses resultados estão qualitativamente de acordo com o encontrado na literatura para porcelana elétrica de alumina [41], embora a alumina utilizada seja muito mais pura, pois tem finalidade de utilização em microondas.

4.2.4. Discussão sobre a análise da composição da alumina

Pelos resultados obtidos, conclui-se que a alumina utilizada como substrato para circuitos planares em microondas corresponde à forma termo-estável de Al_2O_3 (α -alumina), com nível de impurezas abaixo de 1%.

Embora a concentração de alcalinos encontrada na amostra de alumina seja aparentemente muito baixa, acredita-se que isso não seja, a princípio, um fator proibitivo para a possibilidade de realização de polarização térmica. A sílica, SiO_2 , possui concentração de Na da ordem de ~ 1 ppm e apresenta aproximadamente a mesma eficiência de geração de segundo harmônico óptico após a polarização térmica [7] que a *soda-lime*, que tem em torno de 13% de Na, 5 ordens de grandeza superior. Deste modo, como foi confirmada a presença de alcalinos na alumina, mesmo com baixa concentração, acredita-se que os íons portadores de carga que se deslocam durante a polarização térmica sejam íons alcalinos.

4.3. Vidros

Foram escolhidos dois tipos de vidro como substrato para o tratamento térmico estudado neste trabalho e posterior utilização em microondas: o boro-silicato e o vidro sodo-cálcico (*soda-lime glass*). Os dois tipos de vidro têm como principal constituinte a sílica amorfa. O vidro sodo-cálcico possui alto teor de óxidos alcalinos (Na_2O , K_2O) e alcalino-terrosos (CaO). O boro-silicato é um vidro de alta qualidade, fabricado pela adição de boro aos componentes tradicionais do vidro, substituindo grande parte dos óxidos de metais alcalinos por trióxido de boro (B_2O_3).

Esses tipos de vidros foram escolhidos porque têm sido alvo de diversos estudos com aplicação de polarização térmica [5], [7], [42], [43], em especial visando à fabricação de dispositivos ópticos ativos. Além de possuir propriedades ópticas semelhantes às da sílica, é possível criar nesses vidros camadas de depleção de íons com espessura superior a 10 μm . Após polarização térmica de sílica, entretanto, tipicamente obtêm-se camadas de depleção de profundidade de aproximadamente 5 μm [8], [10]. Conforme é discutido no capítulo 5, a espessura da camada de depleção de íons, obtida pelo tratamento eletro-térmico, é um fator

importante na determinação das reduções alcançadas nas perdas dielétricas efetivas das linhas de microondas.

A seguir são apresentadas as características dos vidros selecionados para utilização neste trabalho. Suas características dielétricas na faixa de microondas não são fornecidas pelos fabricantes. Essas características são extremamente dependentes da composição do vidro, logo, podem variar consideravelmente entre fabricantes, ou mesmo entre produtos diferentes de um mesmo fabricante.

4.4. Vidro boro-silicato

As amostras de boro-silicato adotadas para esse trabalho são lâminas para uso em teste de DNA, fabricadas pela Schott Nexterion, Inc. Devido à natureza muito especializada de sua aplicação, trata-se de um vidro de excelente qualidade e especificações muito rígidas, inclusive quanto à sua composição, garantindo uniformidade entre as amostras.

As lâminas são feitas de boro-silicato Nexterion™ Glass B, cortadas a laser no tamanho 75,6×25,0 mm ±0,1mm, com 1,0 mm ±0,05 mm de espessura. A composição química do boro-silicato Nexterion™ Glass B, informada pelo fabricante, é apresentada na Tabela 2 a seguir.

Tabela 2. Composição química do vidro boro-silicato Nexterion™ Glass B.

<i>Substância</i>	<i>% em massa</i>
B ₂ O ₃	13
Na ₂ O / K ₂ O	4
Al ₂ O ₃	2
SiO ₂	81

Fonte: Schott North America, Inc.

A Tabela 3 apresenta algumas propriedades das lâminas de boro-silicato Nexterion™ Glass B, fornecidas pelo fabricante. Porém, suas características dielétricas na faixa de microondas não são fornecidas.

Tabela 3. Propriedades das lâminas de vidro boro-silicato Nexterion™ Glass B.

<i>Propriedade</i>	<i>Unidade</i>	<i>Boro-Silicato</i>
Dimensões	mm	75,6×25,0 (±0,1)
Espessura	mm	1,0 (±0,05)
Densidade Nominal	g/cm ³	2,23 (@25°C)
Resistividade (log•)	250°C 350°C	Ω·m 8,0·10 ⁸ 6,5·10 ⁶
Constante dielétrica (em 1 MHz, 25°C)	–	4,6
Índice de refração	–	1,474

Fonte: Schott North America, Inc.

Lâminas de vidro boro-silicato Nexterion™ Glass B que não sofreu tratamento eletro-térmico foram analisadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) para verificar a qualidade da superfície e confirmar sua composição. A Figura 14 mostra a imagem MEV/SE da superfície de uma dessas lâminas. Esta é a superfície do substrato sobre a qual será realizado o circuito planar de microondas e na qual serão realizados os tratamentos eletro-térmicos.

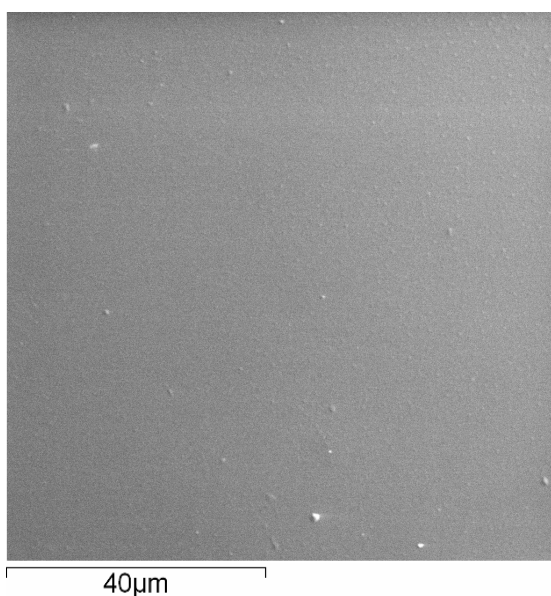


Figura 14. Imagem SE de microscopia eletrônica de varredura (MEV) para a superfície de uma lâmina de vidro boro-silicato Nexterion™ Glass B, com ampliação de 1000 vezes.

Observa-se que a superfície é bastante lisa e uniforme, aparentemente com uma granulação menor que a da alumina da seção anterior. Os pontos brancos na Figura 14 são provavelmente sujeira na amostra.

Na Tabela 4 encontra-se a composição química do vidro boro-silicato Nexterion™ Glass B obtida por análise MEV/EDS. Comparando a composição medida da Tabela 4 com a informada pelo fabricante na Tabela 2, verifica-se que a concentração de borato é muito superior à nominal, em detrimento do percentual de sílica do vidro. As outras substâncias encontradas correspondem à informação do fabricante, porém com imprecisão considerável.

Tabela 4. Composição química do vidro boro-silicato Nexterion™ Glass B obtida por análise MEV/EDS.

<i>Substância</i>	<i>% em massa</i>
B ₂ O ₃	24
Na ₂ O	2,6
K ₂ O	0,6
Al ₂ O ₃	2,5
SiO ₂	70

4.5. Vidro sodo-cálcico (*soda-lime glass*)

As amostras de *soda-lime* adotadas para esse trabalho são lâminas comuns de microscópio. A composição química típica do vidro sodo-cálcico é apresentada na Tabela 5 a seguir.

Tabela 5. Composição química típica do vidro sodo-cálcico.

<i>Substância</i>	<i>% em massa (aproximado)</i>
Na ₂ O	14
CaO	7~9
MgO	3~4
Al ₂ O ₃	1~2
SiO ₂	73

Fonte: Schott North America, Inc. e Corning, Inc.

Devido às suas características, trata-se de um vidro com flutuações de qualidade e composição, mesmo em lotes diferentes de um mesmo fabricante.

As lâminas escolhidas para utilização são da marca Corning, Inc. Foi escolhido em princípio um fabricante com tradição e esperada qualidade, para minimizar a incerteza em relação às amostras de vidro. Uma segunda marca, do fabricante brasileiro Solidor, foi também utilizada. Uma terceira marca genérica foi avaliada, mas descartada após a avaliação no MEV.

A Tabela 6 apresenta algumas propriedades do vidro sodo-cálcico da marca Corning, fornecidas pelo fabricante; suas características dielétricas na faixa de microondas não são fornecidas. Não foram encontradas informações sobre as propriedades dielétricas na faixa de microondas para esse tipo de vidro.

Tabela 6. Propriedades das lâminas de vidro sodo-cálcico Corning™.

<i>Propriedade</i>	<i>Unidade</i>	<i>Boro-Silicato</i>
Dimensões	mm	75,6×25,0 (±0,1)
Espessura	mm	1,0 (±0,1)
Densidade Nominal	g/cm ³	2,40 (@25°C)
Constante dielétrica (em 1 MHz, 25°C)	–	–
Índice de refração	–	1,515

Fonte: Corning, Inc.

Lâminas de vidro sodo-cálcico das marcas Corning e Solidor e da marca genérica que não sofreram tratamento eletro-térmico foram analisadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) para verificar a qualidade da superfície e confirmar sua composição. A Figura 15 mostra a imagem MEV/SE da superfície dessas lâminas.

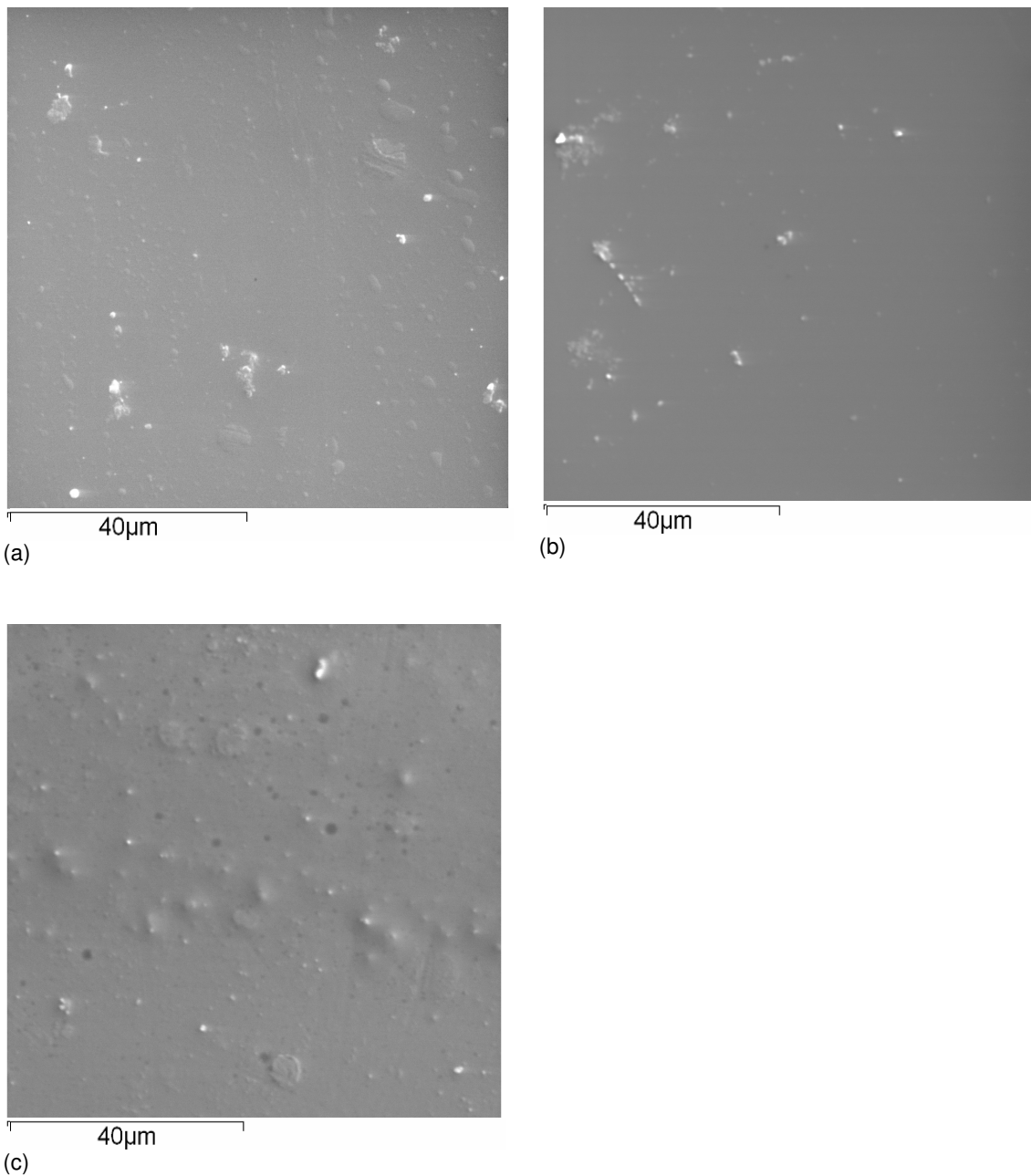


Figura 15. Imagem SE de microscopia eletrônica de varredura (MEV), com ampliação de 1000 vezes, para a superfície de lâminas de vidro sodo-cálcico das marcas (a) Corning™; (b) Solidor; e (c) de uma marca genérica.

As superfícies das lâminas Corning e Solidor são satisfatoriamente lisas, mas apresentam algumas imperfeições. Alguns pontos brancos na Figura 15 são provenientes de sujeira na amostra. A superfície da lâmina da marca genérica mostrou qualidade muito baixa, com buracos e protuberâncias da ordem de alguns microns, sendo necessariamente descartada desse estudo por esse motivo.

Na Tabela 7 está descrita a composição química dos vidros sodo-cálcicos das marcas Corning e Solidor e da marca genérica, obtidas por análise MEV/EDS. Comparando a composição medida da Tabela 7 com a composição genérica da Tabela 5, verifica-se boa concordância.

Tabela 7. Composição química dos vidros sodo-cálcicos Corning™, Solidor e de uma marca genérica, obtidas por análise MEV/EDS.

<i>Substância</i>	<i>Corning</i> <i>% em massa</i>	<i>Solidor</i> <i>% em massa</i>	<i>marca genérica</i> <i>% em massa</i>
Na ₂ O	13,9	12,1	12,4
Na ₂ O	9,6	8,7	8,5
MgO	4,5	3,3	3,2
K ₂ O	1,3	0,5	0,3
SiO ₂	70,6	75,3	75,5

A marca genérica foi descartada pela baixa qualidade da sua superfície, que não permitiria a realização de circuitos na escala de tamanho considerada neste trabalho, nem tampouco a criação de uma camada de depleção uniforme.

As marcas Corning e Solidor são utilizadas nos experimentos do Capítulo 6.