

5

Caracterização da Deposição de Si por CVD no Reactor Tubular

Apresentam-se neste capítulo os resultados e características relevantes do processo de CVD e das amostras preparadas no reactor tubular.

Na etapa de deposição da fita pretende-se otimizar os parâmetros envolvidos no processo de CVD de forma a encontrar as condições que levem a uma deposição rápida, sem recorrer a altas temperaturas e com um elevado rendimento de conversão do precursor gasoso em sólido.

A deposição por CVD é um processo complexo, envolvendo um número elevado de variáveis que podem ser combinadas entre si, resultando em inúmeras variantes possíveis. As variáveis de CVD em estudo foram: a temperatura, o fluxo de gases (reagente e de transporte), a concentração do gás reagente (silano), o tipo e dimensão de substrato. Foram mantidas fixas: a pressão (atmosférica), o tipo de gás de transporte (hidrogénio), o volume e geometria da câmara de reacção e o tipo de aquecimento (óptico).

A caracterização de um processo de CVD baseia-se na avaliação da amostra depositada, sendo os parâmetros mais significativos a taxa de deposição, R ($\mu\text{m}/\text{min}$) e o rendimento de conversão gás-sólido, η (%). Estes parâmetros calculam-se experimentalmente a partir do conhecimento da espessura da camada depositada, δ (μm), ou pela massa depositada, d_m (g), e do tempo de deposição, dt (min). A morfologia, uniformidade e estrutura do material depositado por CVD são igualmente importantes e estudaram-se por microscopia óptica e electrónica de varrimento (SEM – *Scanning Electron Microscopy*).

5.1 O Método Gravimétrico para Caracterização do Processo de CVD

O método gravimétrico baseia-se na medida da variação de massa das amostras depositadas por CVD. Determinando a massa antes e depois da deposição (do substrato sem e com a fita de silício, respectivamente) e tendo em conta as dimensões do substrato, o tempo de deposição e a concentração/fluxo de silano em hidrogénio fica conhecida a quantidade de silício crescido por CVD em cada experiência.

No cálculo da espessura equivalente da fita depositada δ (μm), conhecendo a massa de silício crescida por CVD, assume-se que a densidade média do silício sólido é de $\rho=2,328 \text{ g/cm}^3$ e que o volume da fita é $V=c*l*\delta$, com c =comprimento em mm, l =largura em mm. Então, 1mm^3 de fita de silício depositada terá a massa, dm:

$$dm(g) = \frac{\rho(g / mm^3)}{V(mm^3)} \quad (5.1)$$

ou seja, a espessura equivalente de silício depositado, δ =espessura em μm , será:

$$\delta(\mu m) = \frac{dm(g)}{\rho(g / mm^3) * c(mm) * l(mm) * 10^{-3}} = \frac{430 * dm}{c * l} \quad (5.2)$$

A expressão (5.2) não representa a espessura real da fita depositada por CVD, por esta não ser homogénea nem apresentar o empacotamento denso do silício. A espessura calculada por (5.2) corresponde à espessura média que a mesma massa de silício terá após recristalização com uma densidade de $2,328 \text{ g/cm}^3$, daí a designação de espessura equivalente.

A taxa de deposição, R ($\mu\text{m}/\text{min}$), obtém-se pela razão entre a espessura equivalente da fita depositada δ , e o tempo de deposição dt :

$$R(\mu\text{m} / \text{min}) = \frac{\delta(\mu\text{m})}{dt(\text{min})} \quad (5.3)$$

O rendimento de conversão do silano em silício sólido também é determinado através do conhecimento da massa depositada por CVD, dm , pela a razão entre esta e a massa total de silício disponível no silano. O cálculo da massa total de silício disponível no silano varia com o fluxo e concentração daquele. A mistura de silano utilizada tem uma concentração volúmica em hidrogénio de 10%SiH₄:90%H₂. Assumindo que à pressão atmosférica 1 mol de gás ocupa 22,4dm³, que a massa molar do silano é $M_{\text{SiH}_4}=32\text{g}/\text{mol}$ e que a massa molar do silício é $M_{\text{Si}}=28,09\text{g}/\text{mol}$, calcula-se a massa total de silício disponível, m_{Si} , para um dado fluxo de gás ϕ (l/min) e um intervalo de tempo de deposição dt (min) por:

$$m_{\text{Si}}(\text{g}) = \frac{0,1}{22,4(\text{l})} * M_{\text{Si}}(\text{g}) * \phi(\text{l} / \text{min}) * dt(\text{l} / \text{min}) \quad (5.4)$$

e o rendimento de conversão do silano em silício sólido:

$$\eta(\%) = \frac{100 * dm(\text{mg}) * 22,4(\text{l})}{0,1 * M_{\text{Si}}(\text{g}) * \phi(\text{l} / \text{min}) * dt(\text{min})} \quad (5.5)$$

As expressões (5.1) a (5.5) deduzidas são utilizadas em todas as experiências realizadas, para a quantificação do processo de CVD.

5.2 Deposição de Si por CVD sobre substrato de silício poroso

As experiências de deposição de silício por CVD sobre substratos de silício com camada sacrificial de silício poroso decorreram nas condições descritas em 4.5.1.

Apresentam-se aqui os resultados de algumas amostras [Pinto *et al.*, 2002], relevantes para a compreensão e caracterização do processo de CVD.

No que diz respeito à taxa de deposição, em trabalhos anteriores já havia sido encontrado um conjunto de variáveis ($T=840^{\circ}\text{C}$, $\phi_{\text{gás}}=0,3$ l/min, $[\text{SiH}_4/\text{H}_2]=3,3\%$) que permitem a deposição de Si por CVD sobre silício poroso, a uma taxa de crescimento elevada, $2,22$ $\mu\text{m}/\text{min}$, e constante ao longo do tempo, como se observa na Figura 5.1 [Pinto *et al.*, 2002].

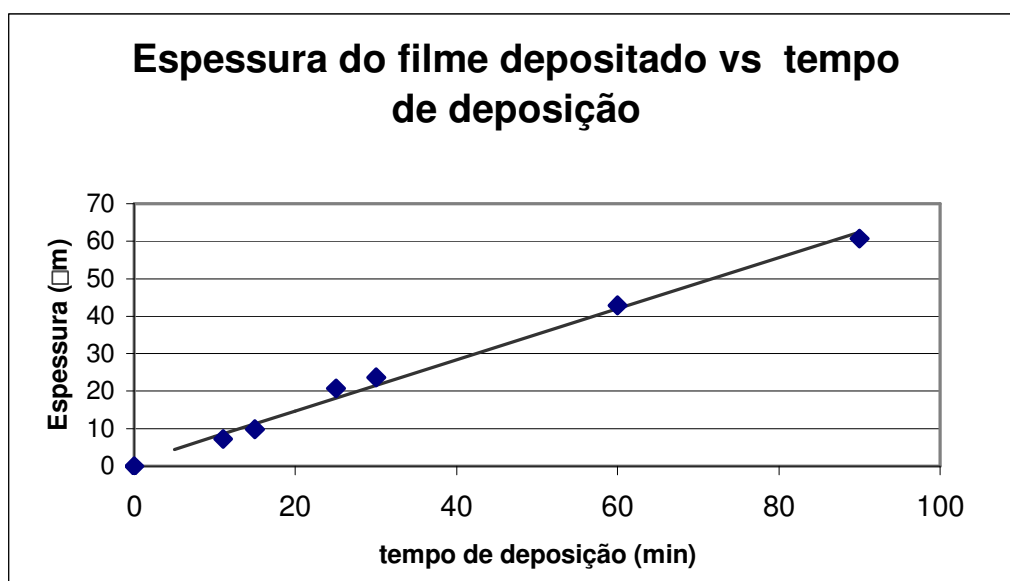


Figura 5.1 – Variação da espessura equivalente da fita depositada por CVD sobre silício poroso com o tempo de deposição, para $T=840^{\circ}\text{C}$. O declive da recta indica a taxa de deposição: $R=2,22\mu\text{m}/\text{min}$.

Na expectativa de aumentar a taxa de deposição, exploraram-se temperaturas ligeiramente superiores a 840°C . As amostras identificadas como Am119, Am124 e Am123, com dimensões $40\times 40\times 0,330$ mm^3 , foram realizadas nas mesmas condições de fluxo e concentração de gases, às temperaturas de 840 , 845 e 848°C , respectivamente. O processo de CVD foi interrompido antes do tempo previsto para as amostras Am124 e

Am123, por acumulação de pó nas paredes do reactor resultante da decomposição em fase gasosa do silano, Figuras 5.2 e 5.3.

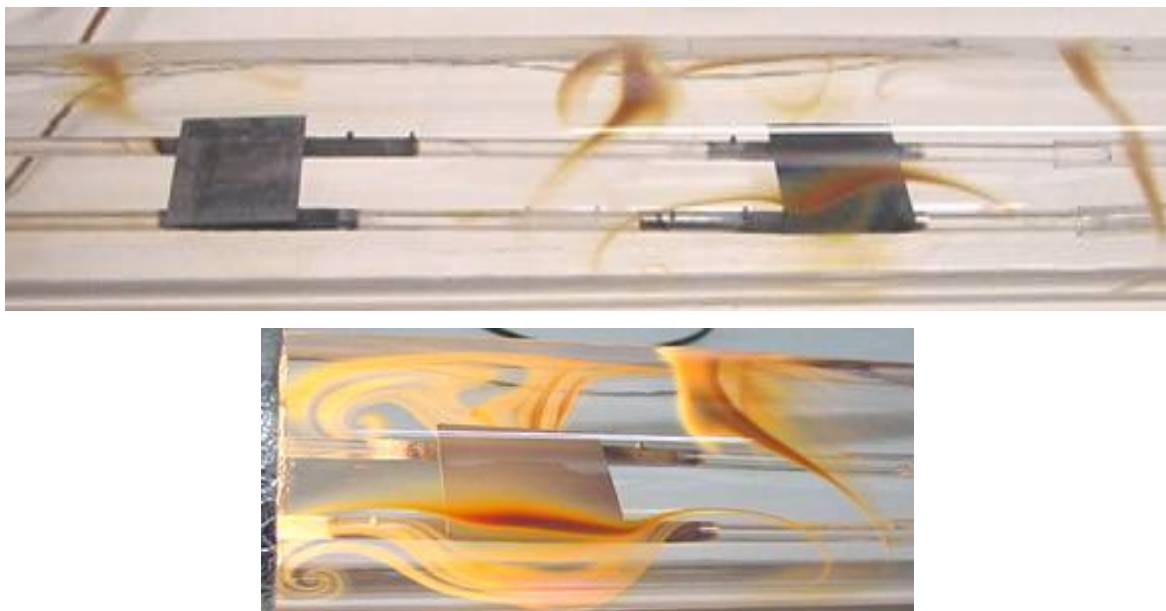


Figura 5.2 - Em cima: Am119 (esquerda) e Am124 (direita) após deposição de silício por CVD. Note-se que praticamente não existe deposição nas paredes do tubo de quartzo em Am119. Em baixo: Am123 Para esta amostra, a deposição nas paredes do tubo de quartzo foi maior relativamente às amostras 119 e 124, devido à utilização de uma temperatura mais elevada.

As fotografias da deposição do pó nas paredes do reactor, Figura 5.2, resultantes da decomposição em fase vapor mostram padrões bem definidos, característicos de regimes de vórtices de convecção no que respeita à dinâmica dos gases sobre a amostra.

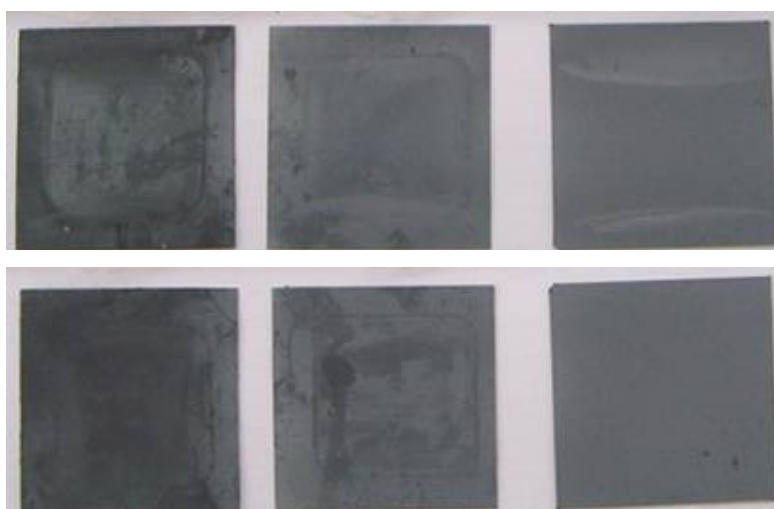


Figura 5.3 - Amostras Am119, Am124 e Am123 após deposição de silício por CVD: em cima a face porosa que ficou voltada para as lâmpadas; em baixo a face sem tratamento químico, que não é exposta directamente à radiação.

Na tabela 5.1 resumem-se as principais condições de deposição e os resultados obtidos com as três amostras mencionadas e incluem-se outras duas amostras, Am121 e Am122, cujos resultados são representativos da média das amostras realizadas.

Tabela 5.1 - Parâmetros de deposição de silício por CVD e resultados obtidos

Amostra	T (°C)	dt (min)	dm (mg)	δ (μm)	R ($\mu\text{m}/\text{min}$)	η (%)
Am122	808	20	138	37,3	0,93	~55
Am121	830	20	237	64,3	1,60	-----
Am119	840	40	324	87,2	2,18	~64
Am124	845	30	160	43,0	1,43	~43
Am123	848	30	170	45,7	1,52	~45

Legenda - dt: tempo de deposição; dm: massa de silício depositada por CVD, δ : espessura do filme de silício; R: taxa de deposição; η : taxa de conversão de silano em silício no substrato.

Os resultados obtidos para a amostra Am119 estão em concordância com os resultados apresentados na Figura 5.1. As amostras Am124 e Am123 apresentam valores inferiores de taxas de deposição e conseqüentemente de rendimentos de conversão, apesar da temperatura utilizada ser superior. Quanto mais elevada a temperatura, maior a formação de pó no tubo de quartzo, Figura 5.2, o que está directamente ligado a uma menor taxa de deposição e menor rendimento de conversão observados. A representação gráfica da taxa de deposição com a temperatura, indicada na Figura 5.4, mostra que o máximo da taxa de deposição é atingido para $T=840^{\circ}\text{C}$, com os substratos, parâmetros e geometria utilizados neste tipo de reactor.

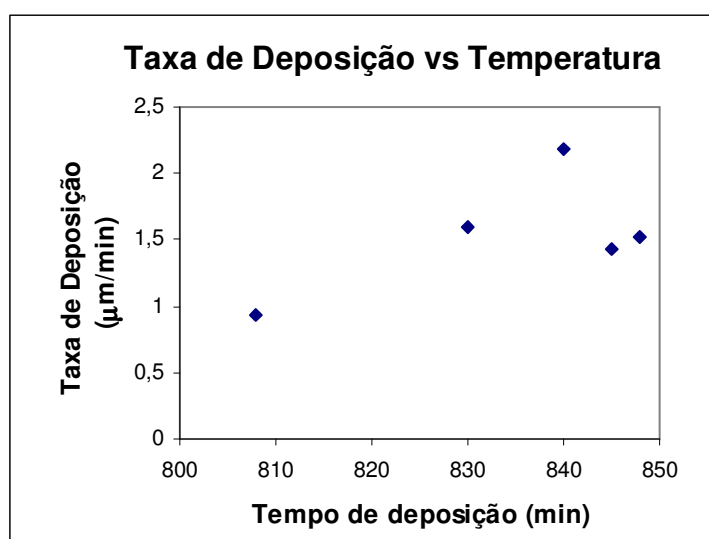


Figura 5.4 – Taxa de deposição de Si por CVD sobre Si poroso em função da temperatura.

A morfologia dos filmes crescidos por CVD foi investigada por microscopia electrónica de varrimento (SEM), Figura 5.5.

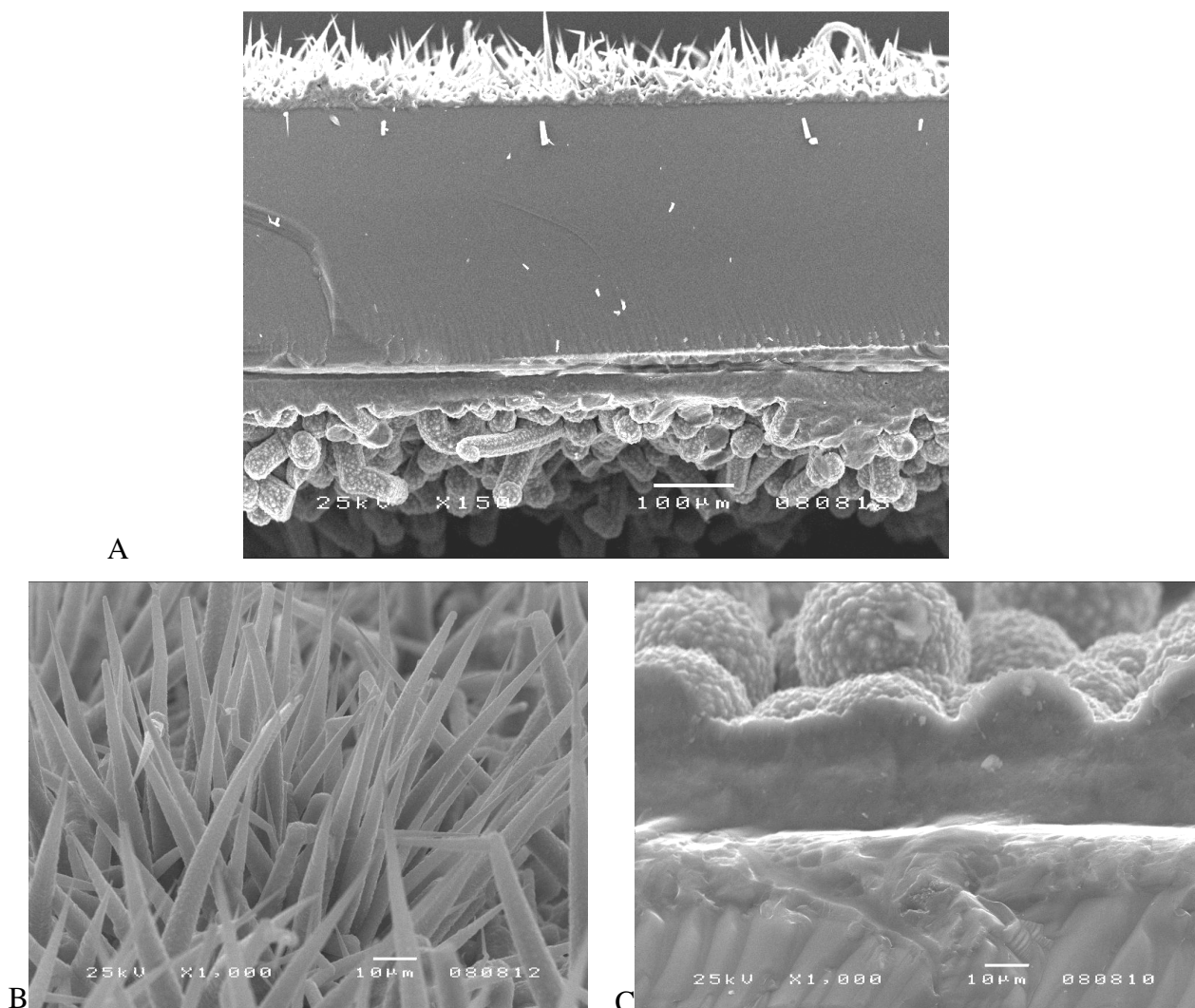


Figura 5.5- Imagem de SEM amostra Am119 após deposição de silício por CVD. A - perfil da AM119: em cima a face porosa que ficou voltada para as lâmpadas, em baixo a face sem tratamento químico, que não é exposta directamente à radiação. B - pormenor da morfologia do Si crescido sobre a face porosa. C - pormenor da morfologia do Si crescido na face oposta.

O tipo e velocidade de crescimento de silício por CVD diferem entre a face porosa e não porosa do substrato. Sobre a superfície do substrato com camada porosa, Figura 5.5B, que é irradiada directamente pelas lâmpadas de aquecimento, o crescimento é mais lento e as estruturas crescidas têm a forma de *whiskers* (estruturas em que a razão comprimento/diâmetro > 10) [Givargizov, 1978]. O crescimento de *whiskers* é unidireccional e está normalmente associado a processos de elevadas temperaturas e à presença de impurezas que actuam como pontos anisotrópicos da rede. A presença da camada de silício poroso parece ser o catalizador para a formação destas estruturas. O

facto de esta face estar a ser irradiada pelas lâmpadas de aquecimento e a existência de gradientes de temperatura elevados, que originam correntes de convecção com velocidades elevadas do gás reagente sobre o substrato, poderão promover este tipo de crescimento, já que não há diferenças na quantidade de impurezas entre as duas faces do substrato.

Na face do substrato não iluminada e sem silício poroso o filme depositado é contínuo, Figura 5.5 C, apesar das irregularidades semelhantes à estrutura da couve-flor, características do crescimento rápido de silício policristalino, sendo esta a face em que se depositou a maior parte de silício.

As estruturas cristalinas encontradas no processo de CVD, apesar da irregularidade, não apresentam problemas do ponto de vista do pós-processamento, desde que exista uma matriz contínua de silício. Durante a recristalização as estruturas são incorporadas na zona fundida, dando origem a fitas com superfície plana.

O facto de haver deposição em ambas as faces do substrato, sobretudo naquela em que não é possível fazer o destacamento (não porosa), implica perdas significativas de material, ou seja, as taxas de deposição e conversão apresentadas corresponderiam na realidade a menos de metade do seu valor. Outro factor negativo na utilização dos substratos de Si multicristalino com camada porosa é a dificuldade de destacamento dos filmes crescidos pela camada sacrificial de silício poroso, devido à existência de pontes sólidas entre aqueles, sobretudo nas zonas de maior densidade de grãos, [Pinto *et al.*, 2002].

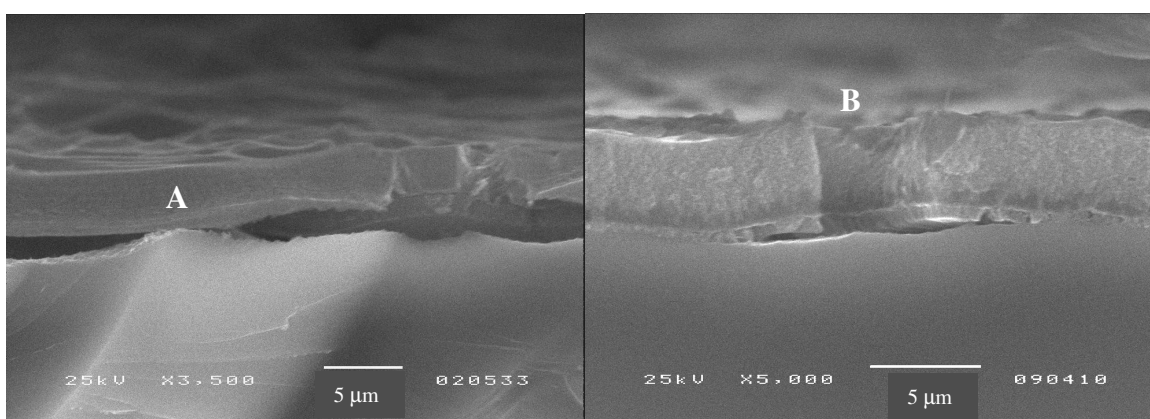


Figura 5.6 – Imagens SEM de pontes sólidas entre substrato e filme de Si depositado por CVD, ao longo da camada porosa.

Os factos enunciados fazem com que esta abordagem para a preparação fitas de silício não seja interessante nem viável do ponto de vista industrial, apesar dos progressos alcançados na taxa de deposição e rendimento de conversão. No entanto, o estudo da deposição de silício por CVD sobre silício poroso permitiu encontrar um conjunto de variáveis (T , ϕ , $[\text{SiH}_4]$) à pressão atmosférica para a definição de um processo de CVD rápido, a temperaturas moderadas, para o reactor em causa.

As dificuldades de separação do filme depositado levaram ao estudo de uma alternativa que permitisse um destacamento fácil e que se encontra descrito na secção seguinte.

5.3 Deposição de Si por CVD sobre Pó de Silício

Neste conjunto de experiências a camada sacrificial para o destacamento da fita crescida consiste numa camada de pó de silício, uniforme e ligeiramente prensada, sobre bolachas de silício multicristalino. Optou-se por manter os substratos de silício multicristalino, uma vez que assim é evitada a contaminação das folhas crescidas por outros materiais. Ainda há a vantagem de, sendo o substrato e a folha crescida do mesmo material, não são introduzidas tensões por existência de diferentes coeficientes de expansão, embora se pretenda que não existam pontes sólidas entre substrato e fita crescida.

As primeiras experiências de CVD sobre pó de silício foram positivas, conseguindo-se destacar a folha de silício crescida sobre o pó logo na primeira amostra.

Seguidamente apresentam-se as experiências realizadas, bem como as variantes entre elas, e os resultados obtidos para cada amostra.

5.3.1 O pó de Si como camada de destacamento - Amostra P1

A amostra P1 é composta pelo substrato de silício multicristalino, sobre o qual é colocado um esquadro, do mesmo material, Figura 5.7, e no seu interior o pó de silício. Os substratos têm as mesmas dimensões que os anteriormente utilizados ($40 \times 40 \text{mm}^2$) e o pó de silício foi obtido por trituração, num almofariz, do mesmo silício dos substratos.

Realizaram-se testes no sentido de determinar o fluxo de gás necessário para arrastar o pó do substrato, tendo-se concluído que, para a granulometria utilizada, um fluxo de 5 l/min (valor máximo dos debitómetros), não dá origem a arrastamento de pó, não havendo por isso limitações para o fluxo.

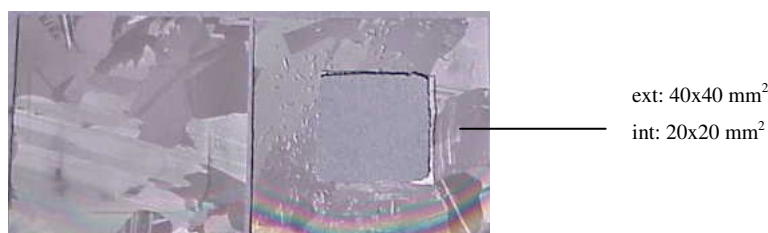


Figura 5.7 - Substrato de silício policristalino (esquerda) da amostra P1, e esquadro (direita) para conter o pó de silício.

Os parâmetros de deposição são semelhantes aos das amostras do subcap. 5.2 no que respeita ao fluxo e concentração do silano: $\phi_{\text{gás}} = 0,3$ l/min, $[\text{SiH}_4/\text{H}_2] = 3,3\%$.

Os resultados obtidos encontram-se na tabela 5.2. As alterações introduzidas pela presença do pó não são significativas, continuando o processo a apresentar taxas de deposição e conversão satisfatórias para as temperatura e pressão utilizadas, embora sejam inferiores aos registados com substratos com camada porosa.

Tabela 5.2 – Parâmetros experimentais e resultados para a amostra P1

Amostra	T (°C)	dt (min)	dm (mg)	δ (μm)	R ($\mu\text{m}/\text{min}$)	η (%)
P1	845	70	277	75	1,07	~62

Nota: A massa $dm=277$ mg refere-se apenas à massa depositada sobre o pó, bem como a taxa de deposição.

No que se refere ao destacamento, a separação do esquadro + folha de silício crescida do substrato fez-se sem qualquer dificuldade, apenas com o auxílio de uma pinça. Também uma parte do esquadro foi removida com relativa facilidade. O resultado é a amostra que se apresenta na Figura 5.8.

A estrutura e morfologia da folha crescida foram estudadas por SEM. Como se pode ver na Figura 5.9 a granulometria do pó utilizado é muito heterogénea, chegando mesmo a atingir dimensões comparáveis com a espessura pretendida para a folha crescida,

que é da ordem das centenas de micrón. Apesar desta heterogeneidade, formou-se uma folha contínua de silício, com agregação de parte do pó. Não foram criadas pontes sólidas entre a folha crescida e o substrato, como se observa na Figura 5.9, onde se vê uma zona descontínua (mais escura) entre o substrato e a folha, o que permitiu o destacamento.

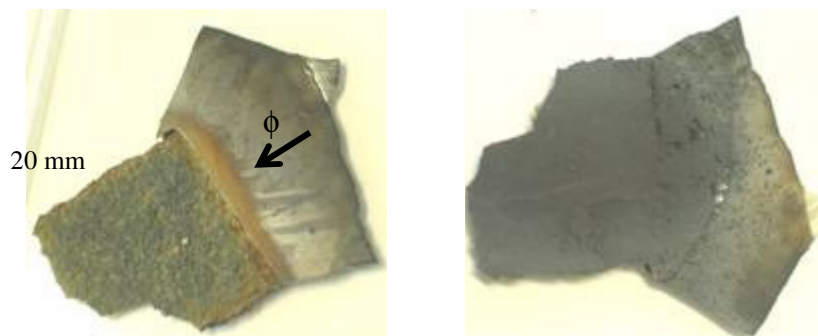


Figura 5.8 - Amostra P1 após deposição por CVD: à esquerda apresenta-se superfície da folha de silício que cresceu sobre o pó; à direita a superfície da mesma folha exposta aos gases reactivos. Note-se a existência de parte do esquadro, onde se formaram algumas pontes sólidas que dificultam a separação, directamente relacionadas com o sentido do fluxo do silano, indicado na figura.

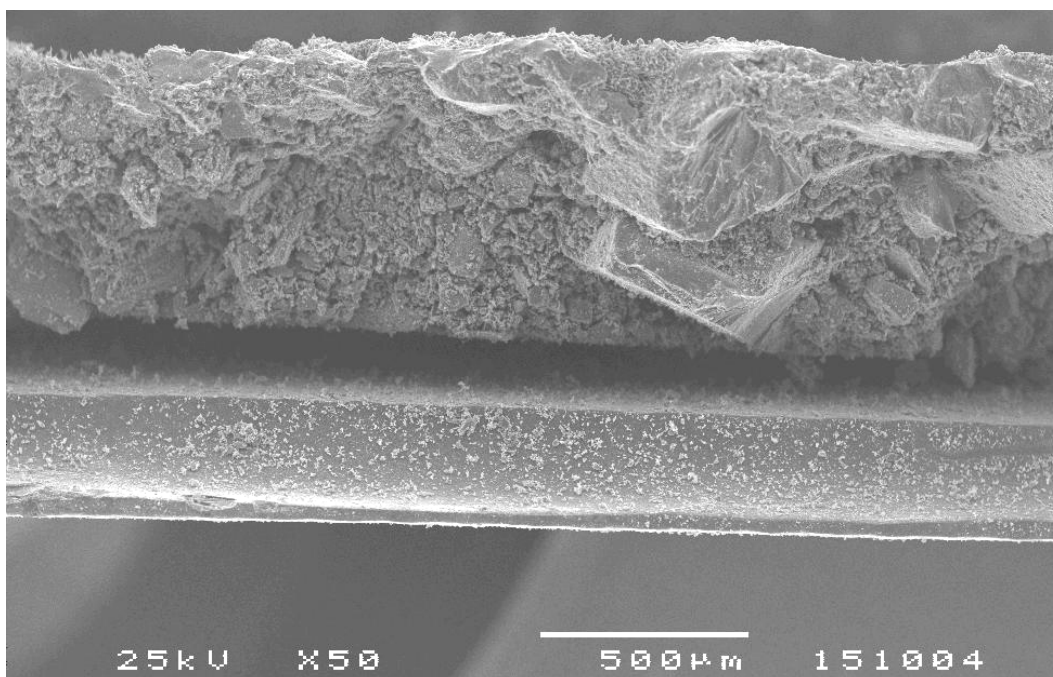


Figura 5.9 – Imagem de SEM da secção da folha de silício (em cima), com substrato (em baixo), correspondente à Amostra P1 após deposição por CVD. A zona que separa a folha do substrato estava preenchida por pó de silício, que não foi agregado durante a deposição, actuando como camada de separação.

Na morfologia da folha de silício crescida sobressaem os grãos iniciais do pó de silício, cobertos por silício depositado por CVD com estruturas do mesmo tipo que as observadas na deposição sobre substratos de silício poroso, Figura 5.10, revelando um tipo

de crescimento tridimensional, característico dos processos de deposição rápida por CVD a temperaturas baixas/moderadas.

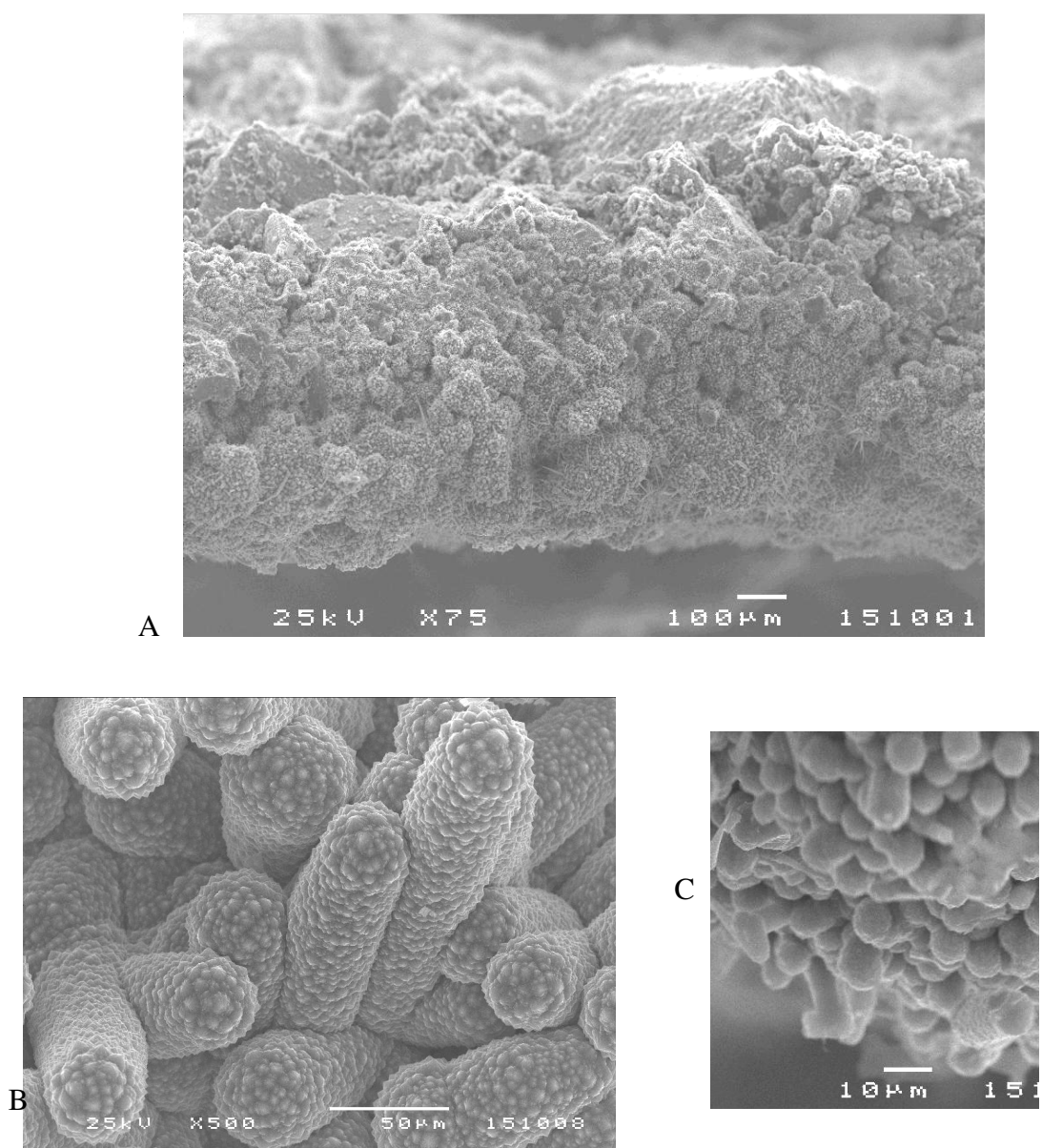


Figura 5.10 – Imagens de SEM do perfil folha de silício correspondente à Amostra P1 após deposição por CVD. A – face superior: superfície da folha de silício voltada para o substrato; face inferior: superfície da folha exposta aos gases reactivos; B e C - pormenores da morfologia da superfície da folha de silício que cresceu sobre o pó onde se observam estruturas colunares, B, e subestruturas, C.

Os resultados conseguidos com a amostra P1 demonstram a viabilidade da utilização do pó de silício como camada de separação da folha crescida do substrato, pelo que se estudou a influência da dimensão das amostras e do fluxo de gases na taxa de deposição, rendimento de conversão e na morfologia, apresentando-se os resultados nas secções seguintes.

5.3.2 A influência da dimensão das amostras no CVD sobre pó de Si

A influência da dimensão das amostras no crescimento por CVD é significativa, apresentando-se dois exemplos: amostras P1 e P7 na tabela 5.3. Apesar da ligeira diferença na temperatura de deposição, as duas amostras são comparáveis entre si, no que diz respeito à taxa de deposição e rendimento de conversão do processo de CVD. O aumento das dimensões do substrato coberto de pó de silício conduz a uma taxa de deposição inferior, praticamente metade, justificada pela maior área de crescimento e pelo esgotamento do gás reagente. Note-se que o rendimento de conversão para P7 corresponde à totalidade do silício disponível no silano. A amostra P7 não é contínua nem autosustentada.

Tabela 5.3 – Parâmetros experimentais e resultados para as amostras P1 e P7, de diferentes dimensões.

Amostra dimensão (mm ²)	T (°C)	dt (min)	Φ SiH ₄ + H ₂ (l/min)	dm (mg)	δ (μ m)	R (μ m/min)	η (%)
P1 20x20	845	70	0.3	277	75	1,1	~62
P7 40x100	848			378	40	0,6	~100

5.3.3 A influência do fluxo de gás durante o CVD sobre pó de Si

O esgotamento do gás reagente durante o processo é positivo, mas a limitação na taxa de deposição torna importante o estudo da dependência deste parâmetro com o fluxo e concentração do gás reagente, com o objectivo de preparação de amostras de dimensões superiores. No reactor tubular de CVD foi atingida a concentração máxima de silano em hidrogénio praticável 3,3%, devido à elevada extensão da decomposição em fase gasosa que ocorre para valores superiores. Deste modo, o aumento da quantidade de silano disponível por unidade de área faz-se por aumento do fluxo total dos gases reagentes, mantendo a concentração fixa no valor máximo admissível. O aumento do fluxo de silano corresponde a um aumento da quantidade de gás reagente por unidade de tempo mas não

tem significado ao nível da velocidade com que o gás se move sobre o substrato, dado o regime de vórtices de convecção gerado pelo elevado gradiente de temperatura na vizinhança (para os valores de fluxo em causa) e a realização à pressão atmosférica.

Na tabela 5.4 apresentam-se três amostras: P7, P8 e P13, preparadas com diferentes fluxos de gases. Quanto maior o fluxo do gás reagente, maior a taxa de deposição, não havendo esgotamento total do gás para as amostras P8 e P13, embora a taxa de conversão seja muito elevada. Note-se que a amostra P13 tem dimensão ligeiramente inferior às restantes, pelo que a taxa de deposição indicada é superior à que se obteria se tivesse a dimensão das restantes amostras.

Tabela 5.4– Parâmetros experimentais e resultados para as amostras P7, P8 e P13, preparadas com diferentes fluxos de gases.

Amostra dim (mm ²)	T (°C)	dt (min)	Φ SiH ₄ + H ₂ (l/min)	Φ H ₂ (l/min)	Φ SiH ₄ (l/min)	dm (mg)	δ (μ m)	R (μ m/min)	η (%)
P7 40x100	848	70	0.3	0.2	0.1	378	41	0,6	100
P8 40x100			0.6	0.4	0.2	1672	180	2.6	95
P13 40x82		61	0.9	0.6	0.3	1938	254	4.2	85

Quanto à morfologia das folhas crescidas por CVD nas condições descritas, existem diferenças significativas, como se pode observar nas imagens de SEM das Figuras 5.11, 5.12 e 5.13. Na amostra P7, preparada com fluxo mais baixo, o crescimento é tridimensional, com formação de estruturas contínuas. Aumentando o fluxo, amostra P8, surgem as estruturas anteriores e aparecem também estruturas de crescimento unidireccional, as *whiskers*, que se tornam dominantes na amostra P13 preparada com fluxo mais elevado.

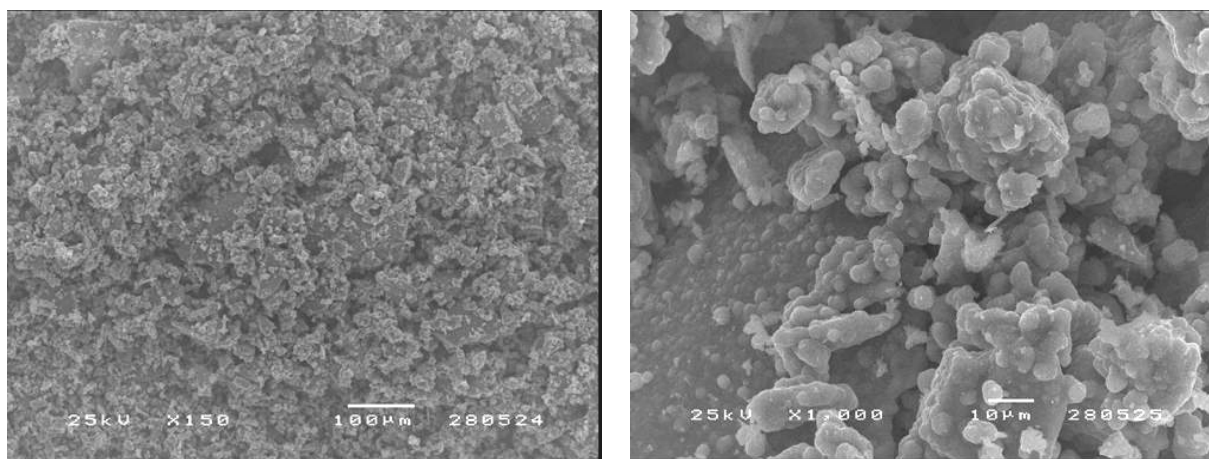


Figura 5.11 – Imagem SEM da superfície da amostra P7 (fluxo $\text{SiH}_4 = 0,1$ l/min)

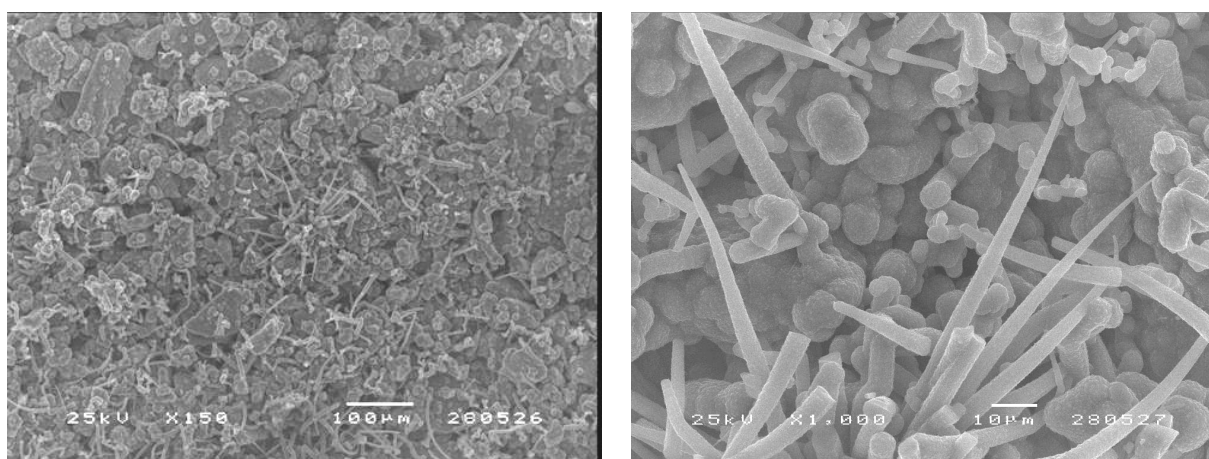


Figura 5.12 – Imagem SEM da superfície da amostra P8 (fluxo $\text{SiH}_4 = 0,2$ l/min)

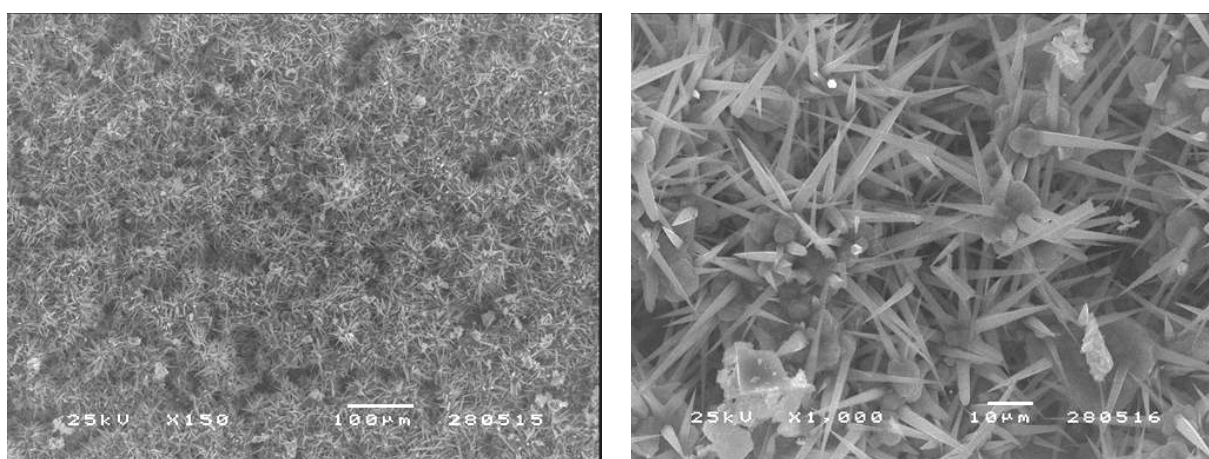


Figura 5.13 – Imagem SEM da superfície da amostra P13 (fluxo $\text{SiH}_4 = 0,3$ l/min)

Apesar da elevada massa de silício depositada em P13, ~2g, a amostra não é contínua nem autosustentável, devido ao tipo de crescimento que não promove sequer a agregação do pó. A amostra P7 também não é autosustentada, apesar de apresentar algumas zonas de continuidade, mas tal deve-se ao acréscimo insuficiente de massa de silício por CVD, 378mg. A amostra P8 é a única que apresenta as características desejadas: contínua e autosustentada, Figura 5.12. Desta análise conclui-se que é necessário estabelecer um compromisso entre taxas de deposição elevadas e obtenção de folhas de Si contínuas, existindo limitações na quantidade de gás que pode ser utilizada num processo de CVD.

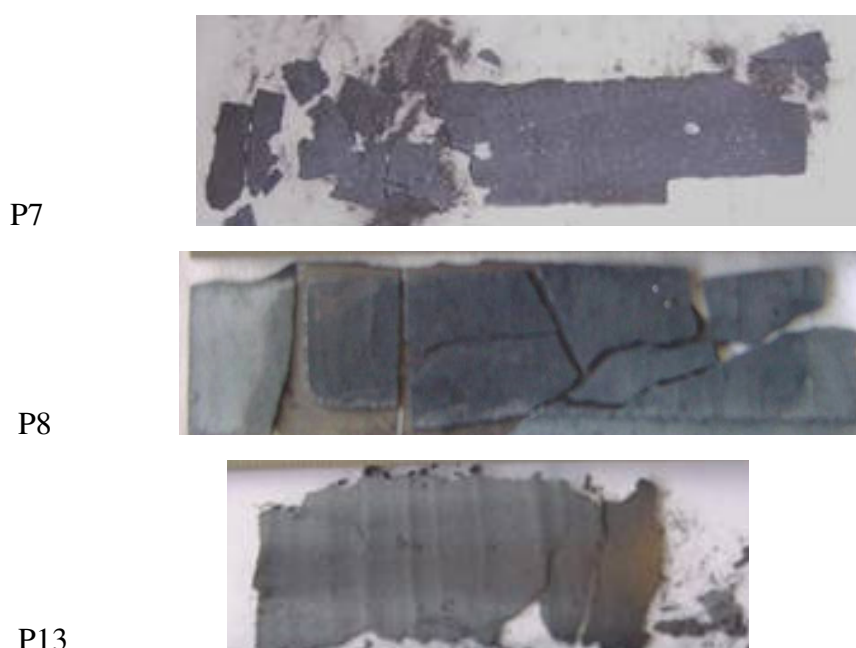


Figura 5.14 – Aspecto das amostras P7, P8 e P13 após CVD e destacamento. P7 e P13 não são contínuas, “esfarelam” ao serem manuseadas. P8 era contínua, mas devido à existência de algumas pontes sólidas entre folha e substrato de silício multicristalino, partiu-se na separação.

5.4 Conclusões sobre a deposição de Si por CVD no reactor tubular

O estudo da deposição de Si por CVD no reactor tubular foi exaustivo na componente laboratorial, no sentido de encontrar um conjunto de variáveis que permitisse obter pequenas folhas de silício contínuas e autosustentáveis, de crescimento rápido a temperaturas moderadas. Nesta primeira parte dos trabalhos conclui-se que estão

estabelecidas as condições para um crescimento satisfatório de silício por CVD a baixas temperaturas e à pressão atmosférica. Esta conclusão é válida para todas as estratégias estudadas, no que se refere às variações do substrato.

No que diz respeito ao objectivo de destacar do substrato as folhas crescidas por CVD, conclui-se que tal é possível e relativamente simples, utilizando pó de silício como camada de separação.

O processo de CVD mostrou-se bastante complexo no que diz respeito à escolha dos parâmetros experimentais, como se conclui das análises apresentadas, em que variações da ordem de alguns graus na temperatura, no fluxo de gases, na concentração ou mesmo na dimensão das amostras conduzem a resultados completamente distintos. O processamento à pressão atmosférica e em reactor de parede fria constituíram desafios importantes, sobretudo pela dificuldade em encontrar apoio na literatura para a previsão e explicação dos resultados encontrados. Os modelos existentes na literatura dedicada ao CVD referem-se quase sempre a crescimento epitaxial, em reactores de parede quente e em regimes de fluxo laminar.

A geometria do reactor tubular, dos porta-amostras e dos substratos utilizados no desenvolvimento do processo de CVD apresentam alguns aspectos limitativos. A elevada decomposição em fase gasosa do silano associada à proximidade com a parede da câmara de reacção limitam a escolha dos parâmetros de deposição, por acumulação de pó no tubo de quartzo e conseqüente paragem do processo. Outro aspecto relevante é a deposição de Si em ambas as faces do substrato, mesmo no caso dos substratos cobertos com pó, o que representa perdas significativas (50%) de Si de elevada pureza. Por último, há a salientar que o tempo de deposição necessário para a formação de filmes contínuos nas condições descritas é demasiado longo, não sendo interessante do ponto de vista industrial.

Os resultados apresentados e o processo desenvolvido foram embrionários e constituíram a base do processo SDS, cujos resultados e desenvolvimentos se apresentam no Capítulos 6 e 7.