



PUCRS

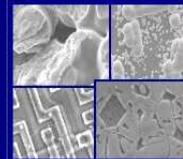
PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E  
TECNOLOGIA DE MATERIAIS**

Faculdade de Engenharia

Faculdade de Física

Faculdade de Química



PGETEMA

## **CÉLULAS SOLARES COM CAMPO RETRODIFUSOR DE ALUMÍNIO FORMADO EM FORNO DE ESTEIRA**

**PAULA PRÁ VELEDA**  
BACHAREL E LICENCIADA EM FÍSICA

**DISSERTAÇÃO PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM  
ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS**

**Porto Alegre**

**Janeiro, 2009**



PUCRS

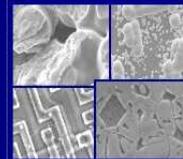
PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E  
TECNOLOGIA DE MATERIAIS**

Faculdade de Engenharia

Faculdade de Física

Faculdade de Química



PGETEMA

## **CÉLULAS SOLARES COM CAMPO RETRODIFUSOR DE ALUMÍNIO FORMADO EM FORNO DE ESTEIRA**

**PAULA PRÁ VELEDA**

BACHAREL E LICENCIADA EM FÍSICA

ORIENTADOR: Profa. Dra. IZETE ZANESCO

CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. ADRIANO MOEHLECKE

Dissertação realizada no Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais (PGETEMA) da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia e Tecnologia de Materiais.

**Porto Alegre  
Janeiro, 2009**

## **BANCA EXAMINADORA**

---

**Profa. Dra. Izete Zanescó**

**Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais  
Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul**

---

**Prof. Dr. Adriano Moehlecke**

**Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais  
Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul**

---

**Profa. Dra. Eleani Maria da Costa**

**Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais  
Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul**

---

**Prof. Dr. Airton Cabral de Andrade  
Faculdade de Física**

*"Deus nos conceda, a cada dia, uma página  
de vida nova no livro do tempo.  
Aquilo que colocarmos nela, corre por nossa conta."*

*(Chico Xavier)*

## **DEDICATÓRIA**

Dedico a minha dissertação aos meus pais que nunca mediram esforços para me apoiar nas minhas escolhas.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço em primeiro lugar as três pessoas mais importantes da minha vida meu pai Paulo a minha mãe Márcia e ao meu irmão Márcio obrigada por estarem sempre ao meu lado me dando toda força, carinho, amor e por sempre acreditarem no meu potencial.

Ao meu namorado Luis André que mesmo estando longe me deu apoio, carinho e torceu muito por mim.

Agradeço a PUCRS e a CAPES pelas bolsas de estudos e a CEEE, ELETROSUL, PETROBRÁS e FINEP pelos recursos financeiros para realização do estágio.

A minha orientadora Izete e ao co-orientador Adriano pela paciência, apoio e confiança.

Agradeço à professora da Faculdade de Física a professora Maria Emilia por desde a época da graduação esteve muito presente me dando apoio. Muito Obrigada Professora.

Ao pessoal do NT-Solar, em especial ao Gabriel Filomena, Juliane, Márcia, Dário, Filipe e Moussa. Obrigada pessoal.

Agradeço aos meus grandes amigos Billy, Felipe e Cláudia pelo apoio, amizade, carinho e por entenderem o porquê da minha ausência.

Aos meus dindos Mario e Cintia por sempre estarem torcendo por mim.

## SUMÁRIO

<b>DEDICATÓRIA.....</b>	<b>5</b>
<b>AGRADECIMENTOS .....</b>	<b>6</b>
<b>SUMÁRIO .....</b>	<b>7</b>
<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>9</b>
<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>14</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS .....</b>	<b>16</b>
<b>RESUMO .....</b>	<b>18</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>19</b>
<b>1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVAS.....</b>	<b>20</b>
<b>2. OBJETIVOS .....</b>	<b>22</b>
2.1. Objetivos Específicos .....	22
<b>3. PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DE CÉLULAS SOLARES .....</b>	<b>23</b>
3.1. Célula Solar: Estrutura Básica.....	23
3.2. Célula $n^+pn^+$ .....	24
3.3. Célula $n^+pp^+$ .....	26
3.4. Metalização por Serigrafia.....	29
<b>4. DIFUSÃO .....</b>	<b>32</b>
4.1. Tipos e Parâmetros de Caracterização .....	32
4.1.1. Tipos de Difusão .....	33
4.1.2. Parâmetros de Caracterização .....	37
4.2. Difusão em Fornos Convencionais com $POCl_3$ .....	37
4.2.1. Descrição do Forno.....	37
4.2.2. Difusão com $POCl_3$ .....	39
4.3. Difusão de Dopante por <i>Spin-on</i> .....	42
4.3.1. Técnica de <i>spin-on</i> .....	42
4.3.2. Difusão em Forno Convencional .....	44
4.3.3. Difusão em Fornos de Processamento Térmico Rápido.....	44
4.4. Difusão em Forno de Esteira.....	51
4.4.1. Característica do Forno e do Perfil de Dopagem .....	51

4.4.2. Resultados de Células Solares com Difusão em Forno de Esteira .....	53
4.5. Campo Retrodifusor Formado por Alumínio .....	57
4.5.1. Característica do Campo Retrodifusor .....	57
4.5.2. Deposição de Alumínio .....	59
4.5.3. Resultados de Células Solares com Campo Retrodifusor .....	60

## **5. DESENVOLVIMENTO DE CÉLULAS SOLARES COM CAMPO RETRODIFUSOR DE ALUMÍNIO EM FORNO DE ESTEIRA .....65**

5.1. Desenvolvimento e Caracterização de Células Solares com Difusão de Alumínio e Queima de Pastas Metálicas Simultaneamente .....	65
5.1.1. Metodologia .....	65
5.1.2. Difusão de Fósforo a 900°C .....	70
5.1.3. Difusão de Fósforo a 875 °C .....	70
5.1.4. Análise da Influência da Difusão de Fósforo .....	73
5.1.5. Análise da Influência da Velocidade da Esteira .....	73
5.2. Células Solares com Difusão de Alumínio Experimentalmente Otimizada .....	79
5.2.1. Metodologia .....	79
5.2.2. Influência da Velocidade da Esteira Durante a Difusão do Alumínio .....	81
5.2.2.1. Velocidade da esteira de 80 cm /min .....	81
5.2.2.2. Velocidade da Esteira de 100 cm/min .....	82
5.2.2.3. Velocidade da esteira de 120 cm/min .....	85
5.2.2.4. Velocidade da Esteira de 140 cm/min .....	88
5.2.2.5. Velocidade da Esteira de 150 cm/min .....	91
5.2.2.6. Velocidade da Esteira de 160 cm/min .....	94
5.2.3. Análise da Influência da Velocidade da Esteira .....	97
5.2.4. Análise dos Melhores Resultados .....	100
5.2.5. Análise Bidimensional do Processo .....	108

## **6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES .....115**

## **7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....118**

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1. Estrutura básica de uma célula solar [3]. .....	23
Figura 3.2. Processo de fabricação de células $n^+pn^+$ [3]. .....	25
Figura 3.3. Processo de fabricação de célula solares $n^+pp^+$ , com difusão de P e Al [1], [4]. .....	27
Figura 3.4. Processo de fabricação de célula $n^+pp^+$ [5]. .....	29
Figura 3.5. “Screen printer” e detalhe da colocação da pasta serigráfica. ....	30
Figura 4.1. Representação do mecanismo de difusão de impureza em cristal, a) assistido por vacância e b) assistido por auto-interstício [12]......	33
Figura 4.2. Representação do mecanismo de difusão intersticial de impureza em cristal [12]......	33
Figura 4.3. Distribuição de impurezas para difusão com fonte infinita [10] .....	35
Figura 4.4. Distribuição de impurezas para difusões com fonte finita [10]. .....	36
Figura 4.5. (a) Concentração de impurezas em função da profundidade; (b) concentração líquida de impurezas em função da profundidade. Em ambos os gráficos destaca-se a profundidade $x_j$ da junção pn [10]. .....	36
Figura 4.6. O perfil de impurezas e parâmetros básicos. ....	37
Figura 4.7. Forno convencional para difusões e oxidações.....	38
Figura 4.8. Detalhe do forno convencional para difusão de fósforo. ....	39
Figura 4.9. Configuração típica de um processo de difusão. ....	39
Figura 4.10. Resistência de folha da região $n^+$ em função da temperatura e tempo de difusão. Processos com $POCl_3$ [14]. .....	40
Figura 4.11. Tempo de vida dos minoritários antes e após a difusão de fósforo com $POCl_3$ [14]. .....	41
Figura 4.12. (a) Perfil de átomos de fósforo eletricamente ativos para diferentes tempos de difusão; (b) Probabilidade de coleta de portadores de carga (fc) em função da profundidade na lâmina de silício [18]. .....	43

- Figura 4.13. Esquema de Processo de deposição de dopantes por *spin-on* [1], [4]..44
- Figura 4.14. Influência do tempo e da temperatura na difusão de fósforo em forno convencional. A fonte de fósforo foi o líquido dopante P509 depositado por *spin-on* [19]. .....45
- Figura 4.15. Tempo de vida dos portadores minoritários antes e depois de difusões de fósforo em fornos convencionais. Deposição de dopante por *spin-on* [19]. .....45
- Figura 4.16. Esquema de um forno RTP [4]. .....46
- Figura 4.17. Forno RTP (*Rapid Thermal Processing*) do Laboratório de Microeletrônica da UFRGS, utilizado no trabalho de Cechini [4].....47
- Figura 4.18. Variação da resistência de folha em função dos parâmetros do processo: tempo e temperatura da difusão de fósforo. O intervalo de maior rendimento de células metalizadas por fotolitografia está 60 e 85  $\Omega/\square$  indicado no gráfico através das retas marcadas pelo caracteres --- [4]. .....48
- Figura 4.19. Variação da resistência de folha em função dos parâmetros do processo: tempo e temperatura da difusão de boro. O intervalo de maior rendimento está entre 60  $\Omega/\square$  e 100  $\Omega/\square$ , indicado no gráfico através das retas marcadas pelos caracteres -.-. [4]. .....48
- Figura 4.20. Medida do tempo de vida dos portadores minoritários em lâminas de silício monocristalino Cz, antes e depois das difusões de fósforo em forno de RTP. Para 950 °C, a medida do tempo de vida depois do processamento (1 min de *plateau*) sem presença de fósforo indica a alta contaminação existente no ambiente do forno [1,4]. .....49
- Figura 4.21. Valores médios de resistência de folha de regiões n<sup>+</sup> obtidas por *spin-on* e processamento térmico rápido, a escala da resistência de folha de até 80  $\Omega/\square$  está ampliada no gráfico menor. [6]. .....50
- Figura 4.22. Valores médios de resistência de folha de regiões p<sup>+</sup> obtidas por *spin-on* e processamento térmico rápido, a escala da resistência de folha de até 80  $\Omega/\square$  está ampliada no gráfico menor [6]. .....50
- Figura 4.23. Diagrama de um forno de esteira com lâmpadas infravermelhas [6] ....51
- Figura 4.24. Resistência de folha em função dos parâmetros de processo de difusão [20]. .....53
- Figura 4.25. Perfis de fósforo para diferentes processos de difusão com forno de esteira [20].....54

- Figura 4.26. Comparação entre perfis de fósforo obtidos com forno convencional (CFP), forno de esteira (BLP) e forno de processamento térmico rápido (RTP) difundido. O fósforo foi depositado por *spin-on* [20]. ..... 54
- Figura 4.27. Voc das células solares em função da temperatura para três espessuras diferentes do Al. .... 61
- Figura 4.28. Temperatura crítica para cada espessura da camada de alumínio..... 62
- Figura 4.29. Degradação célula solar degrada em temperaturas acima de 850 °C. . 63
- Figura 4.30. Mostra uma curva de comprimento de onda por eficiência quântica interna (IQE)..... 64
- Figura 5.1. Diagrama do processo da fabricação de células solares com difusão de Al evaporado no forno de esteira e queima das pastas metálicas simultaneamente. .... 66
- Figura 5.2. *Spinner* utilizado para deposição de filmes dopantes. .... 67
- Figura 5.3. Forno utilizado para difusão de fósforo. .... 68
- Figura 5.4. Curva de refletância em função do comprimento de onda para filme Ar de TiO<sub>2</sub> espessura de 62 nm..... 69
- Figura 5.5. (a) Tensão de circuito aberto e (b) densidade de corrente de curto-circuito médios para a temperatura de difusão de fósforo a 875 °C e 900 °C em função da temperatura da difusão de alumínio e queima das pastas metálicas simultaneamente no forno de esteira..... 75
- Figura 5.6. (a) Fator de forma e (b) eficiência médios das células solares para a temperatura de difusão de fósforo a 875 °C e 900 °C em função da temperatura da difusão de alumínio e queima das pastas metálicas simultaneamente no forno de esteira. .... 76
- Figura 5.7. (a) Tensão de circuito aberto (Voc) e (b) densidade de corrente elétrica de curto-circuito (Jsc) em função da velocidade da esteira durante o processo de difusão de Al depositado por evaporação e queima das pastas de metalização simultaneamente..... 77
- Figura 5.9. Esquema do processo de fabricação de células solares com difusão de alumínio em forno de esteira. .... 79
- Figura 5.10. Evaporadora de filmes antirreflexo e alumínio. .... 80

- Figura 5.11. Refletância em função do comprimento de onda para o filme AR de  $\text{TiO}_2$  com espessura de 68 nm. .... 81
- Figura 5.12. (a) Tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ), (b) densidade de corrente elétrica de curto-circuito ( $J_{sc}$ ), em função da temperatura de queima ( $T_Q$ ) para a velocidade da esteira de 80 cm/min durante a difusão de Al ..... 83
- Figura 5.13. (a) fator de forma (FF), (b) eficiência ( $\eta$ ) em função da temperatura de queima ( $T_Q$ ) para a velocidade da esteira de 80 cm/min durante a difusão de Al. .... 84
- Figura 5.14. a) Tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ), (b) densidade de corrente elétrica de curto-circuito ( $J_{sc}$ ), em função da temperatura de queima ( $T_Q$ ) para a velocidade da esteira de 100 cm/min durante a difusão de Al. .... 86
- Figura 5.15. (a) fator de forma (FF), (b) eficiência ( $\eta$ ) em função da temperatura de queima ( $T_Q$ ) para a velocidade da esteira de 100 cm/min durante a difusão de Al..... 87
- Figura 5.16. (a) Tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ), (b) densidade de corrente elétrica de curto-circuito ( $J_{sc}$ ), em função da temperatura de queima ( $T_Q$ ) para a velocidade da esteira de 120 cm/min durante a difusão de Al. .... 89
- Figura 5.17. (a) Fator de forma (FF), (b) eficiência ( $\eta$ ) em função da temperatura de queima ( $T_Q$ ) para a velocidade da esteira de 120 cm/min durante a difusão de Al..... 90
- Figura 5.18. (a) Tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ), (b) densidade de corrente elétrica de curto-circuito ( $J_{sc}$ ), em função da temperatura de queima ( $T_Q$ ) para a velocidade da esteira de 140 cm/min durante a difusão de Al. .... 92
- Figura 5.19. (a) Fator de forma (FF), (b) eficiência ( $\eta$ ) em função da temperatura de queima ( $T_Q$ ) para a velocidade da esteira de 140 cm/min durante a difusão de Al..... 93
- Figura 5.20. (a) Tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ), (b) densidade de corrente elétrica de curto-circuito ( $J_{sc}$ ), em função da temperatura de queima ( $T_Q$ ) para a velocidade da esteira de 150 cm/min durante a difusão de Al. .... 95
- Figura 5.21. (a) fator de forma (FF), (b) eficiência ( $\eta$ ) em função da temperatura de queima ( $T_Q$ ) para a velocidade da esteira de 150 cm/min durante a difusão de Al..... 96
- Figura 5.22. (a) Tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ), (b) densidade de corrente elétrica de curto-circuito ( $J_{sc}$ ), em função da temperatura de queima ( $T_Q$ ) para a velocidade da esteira de 160 cm/min durante a difusão de Al. .... 98

- Figura 5.23. (a) Fator de forma (FF), (b) eficiência ( $\eta$ ) em função da temperatura de queima ( $T_Q$ ) para a velocidade da esteira de 160 cm/min durante a difusão de Al..... 99
- Figura 5.24. (a) Tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ) e (b) densidade de corrente elétrica de curto-circuito ( $J_{sc}$ ) em função da velocidade da esteira durante o processo de difusão de Al depositado por evaporação para diferentes valores da temperatura de queima das pastas de metalização..... 101
- Figura 5.25. (a) Fator de forma (FF) e (b) eficiência ( $\eta$ ) em função da velocidade da esteira durante o processo de difusão de Al depositado por evaporação para diferentes valores da temperatura de queima das pastas de metalização. .... 102
- Figura 5.26. (a) Tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ) e (b) densidade de corrente elétrica de curto-circuito ( $J_{sc}$ ) em função da temperatura de queima das pastas de metalização para diferentes valores da velocidade da esteira durante o processo de difusão de Al depositado por evaporação..... 106
- Figura 5.27. (a) Fator de forma (FF) e (b) eficiência ( $\eta$ ) em função da temperatura de queima das pastas de metalização para diferentes valores da velocidade da esteira durante o processo de difusão de Al depositado por evaporação..... 107
- Figura 5.28. Equipamento WT-2000PV da *Semilab*..... 109
- Figura 5.29. Resistividade de base bi-dimensional da lâmina de Si-Cz. .... 109
- Figura 5.30. Refletância no comprimento de onda (a) 973nm, (b) 953 nm, (c) 845 nm, (d) 648 nm após o processo de texturação da lâmina de Si-Cz. ... 110
- Figura 5.31 Refletância após a deposição do filme AR para  $\lambda$  de (a) 973 nm, (b) 953 nm, (c) 845 nm, (d) 648 nm..... 112
- Figura 5.32. Distribuição bidimensional do tempo de vida dos portadores minoritários após o processo de (a) texturação, (b) oxidação, (c) difusão (com junção pn) e (d) difusão (sem junção)..... 113
- Figura 5.33. Corrente elétrica de curto-circuito da célula solar gerada para radiação laser com (a) 973 nm, (b) 953 nm, (c) 845 nm e (d) 648 nm..... 114

## LISTA DE TABELAS

- Tabela 4.1. Resultados experimentais de células solares processadas por diferentes técnicas de difusão, onde  $V_{oc}$  é a tensão de circuito aberto,  $J_{sc}$  é a densidade de corrente de curto circuito, FF é o fator de forma e  $\eta$  é a eficiência [24]. ..... 55
- Tabela 4.2. Características elétricas de células processadas em fornos de esteira com aquecimento por lâmpadas de infravermelho (IR) e por resistências onde  $V_{oc}$  é a tensão de circuito aberto,  $J_{sc}$  é a densidade de corrente de curto-circuito, FF é o fator de forma e  $\eta$  é a eficiência [22]. ..... 56
- Tabela 4.3. Características elétricas de células com região  $n^+$  obtidas por difusão convencional com  $POCl_3$  e por difusão em forno de esteira (IR) [23]. ... 56
- Tabela 5.1. Tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ), densidade de corrente elétrica de curto-circuito ( $J_{sc}$ ), fator de forma (FF) e eficiência ( $\eta$ ) em função da temperatura de queima das pastas de metalização e difusão de alumínio ( $T_{Q-D}$ ) para processo com temperatura de difusão de fósforo de  $900^\circ C$ . 71
- Tabela 5.2. Tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ), densidade de corrente elétrica de curto-circuito ( $J_{sc}$ ), fator de forma (FF) e eficiência ( $\eta$ ) em função da temperatura de queima das pastas de metalização e difusão de alumínio ( $T_{Q-D}$ ) para processo com temperatura de difusão de fósforo de  $875^\circ C$ . 72
- Tabela 5.3. Tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ), densidade de corrente elétrica de curto-circuito ( $J_{sc}$ ), fator de forma (FF) e eficiência ( $\eta$ ) em função velocidade da esteira durante o processo simultâneo de difusão de Al e queima das pastas de metalização ( $V_{E-D}$ ). ..... 74
- Tabela 5.3. Tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ), densidade de corrente elétrica de curto-circuito ( $J_{sc}$ ), fator de forma (FF) e eficiência ( $\eta$ ) em função da temperatura de queima ( $T_Q$ ) para processo de difusão de alumínio com a velocidade da esteira de 80cm/min. .... 82
- Tabela 5.4. Tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ), densidade de corrente de curto-circuito ( $J_{sc}$ ), fator de forma (FF), eficiência ( $\eta$ ) em função da temperatura de queima ( $T_Q$ ) para processo com a velocidade da esteira de 100 cm/min. 85
- Tabela 5.5. Tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ), densidade de corrente de curto-circuito ( $J_{sc}$ ), fator de forma (FF), eficiência ( $\eta$ ) em função da temperatura de queima ( $T_Q$ ) para processo com a velocidade da esteira de 120cm/min. 88
- Tabela 5.6. Tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ), densidade de corrente de curto-circuito ( $J_{sc}$ ), fator de forma (FF), eficiência ( $\eta$ ) em função da temperatura de queima ( $T_Q$ ) para processo com a velocidade da esteira de 140 cm/min. 91

- Tabela 5.7 Tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ), densidade de corrente de curto-circuito ( $J_{sc}$ ), fator de forma (FF), eficiência ( $\eta$ ) em função da temperatura de queima ( $T_Q$ ) para processo com a velocidade da esteira de 150 cm/min.94
- Tabela 5.8 Tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ), densidade de corrente de curto-circuito ( $J_{sc}$ ), fator de forma (FF), eficiência ( $\eta$ ) em função da temperatura de queima ( $T_Q$ ) para processo com a velocidade da esteira de 160 cm/min.97
- Tabela 5.9 Tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ), densidade de corrente elétrica de curto-circuito ( $J_{sc}$ ), fator de forma (FF) e eficiência ( $\eta$ ) em função da temperatura de queima das pastas de metalização ( $T_Q$ ) para a velocidade da esteira para a difusão de Al de 80 cm/min. .... 103
- Tabela 5.10 Tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ), densidade de corrente elétrica de curto-circuito ( $J_{sc}$ ), fator de forma (FF) e eficiência ( $\eta$ ) em função da temperatura de queima das pastas de metalização ( $T_Q$ ) para a velocidade da esteira para a difusão de Al de 100 cm/min. .... 103
- Tabela 5.11 Tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ), densidade de corrente elétrica de curto-circuito ( $J_{sc}$ ), fator de forma (FF) e eficiência ( $\eta$ ) em função da temperatura de queima das pastas de metalização ( $T_Q$ ) para a velocidade da esteira para a difusão de Al de 120 cm/min. .... 103
- Tabela 5.12 Tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ), densidade de corrente elétrica de curto-circuito ( $J_{sc}$ ), fator de forma (FF) e eficiência ( $\eta$ ) em função da temperatura de queima das pastas de metalização ( $T_Q$ ) para a velocidade da esteira para a difusão de Al de 150 cm/min. .... 104
- Tabela 5.13. Tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ), densidade de corrente elétrica de curto-circuito ( $J_{sc}$ ), fator de forma (FF) e eficiência ( $\eta$ ) em função da temperatura de queima das pastas de metalização ( $T_Q$ ) para a velocidade da esteira para a difusão de Al de 180 cm/min. .... 105
- Tabela 5.14. Características elétricas das melhores células solares fabricadas com o processo de difusão de Al em forno de esteira e em forno convencional.108

## LISTA DE SÍMBOLOS

AR	Antirreflexo	
A	Área	m <sup>2</sup>
BSF	Campo Retrodifusor	
BFP	Processamento em Forno de esteira	
C <sub>S</sub>	Concentração em superfície	
C(x)	Concentração da impureza	
C <sub>a</sub>	Concentração de átomos na superfície do substrato	m <sup>-3</sup>
C <sub>B</sub>	Concentração de átomos no substrato	m <sup>-3</sup>
Cz	Czochralski	
CFP	Processamento Forno Convencional	
EQI ou IQE	Eficiência Quântica Interna	
F <sub>c</sub>	Probabilidade de coleta de portadores de carga	%
FZ	<i>Fusão Zonal Flutuante</i>	
FF	Fator de forma	
I <sub>sc</sub>	Corrente de curto-circuito	
J <sub>sc</sub>	Densidade de corrente de curto-circuito	mA/cm <sup>2</sup>
PVD	<i>Physical Vapour Deposition</i>	
Q	Número total de átomos de impurezas por unidade de área	m <sup>-2</sup>
q	Carga do elétron	C
RTP	Processamento Térmico Rápido	
R <sub>□</sub>	Resistência de Folha	Ω/□
T	Temperatura	°C
T <sub>Q</sub>	Temperatura de Queima	°C
T <sub>Q-D</sub>	Temperatura de Queima de Difusão	°C
V <sub>oc</sub>	Tensão de circuito aberto	mV
V <sub>E-D</sub>	Velocidade de difusão	m/s
x	Profundidade	μm
x <sub>j</sub>	Profundidade da junção pn	μm
λ	Comprimento de Onda	μm
t	Tempo	s
μ	Mobilidade	cm <sup>2</sup> /V.S

$\tau$	Tempo de vida dos portadores minoritários	$\mu\text{s}$
$\eta$	Eficiência	%

## RESUMO

VELEDA, Paula. **Células Solares com Campo Retrodifusor de Alumínio Formado em Forno de Esteira**. Porto Alegre. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia de materiais). Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL.

Este trabalho tem por objetivo desenvolver e analisar o campo retrodifusor (back surface field- BSF) formado por alumínio depositado por evaporação e difundido em forno de esteira, avaliando a eficácia do BSF". Foram desenvolvidos dois processos de fabricação de célula solares em substrato de silício crescido pela técnica Czochralski (Cz), tipo p, com emissor n<sup>+</sup> formado por POCl<sub>3</sub>. O primeiro processo centrou-se no desenvolvimento de células solares com campo retrodifusor com difusão de alumínio e queima das pastas metálicas simultaneamente no forno de esteira, para as temperaturas de difusão de fósforo de 875 °C e 900 °C. Neste processo, variou-se a temperatura de difusão do alumínio e queima das pastas metálicas. No segundo processo desenvolvido otimizou-se experimentalmente o campo retrodifusor com alumínio difundido em forno de esteira a uma temperatura de 900 °C, antes da queima de pasta variando-se a velocidade da esteira e a temperatura de queima das pastas metálicas. No primeiro processo os melhores resultados foram encontrados para a temperatura de difusão de fósforo de 875 °C com a temperatura de difusão de Al e queima das pastas metálicas de 920 °C. A máxima eficiência foi de 13,5 %, com densidade de corrente elétrica de curto-circuito (Jsc) de 31,9 mA/cm<sup>2</sup> e tensão de circuito aberto (Voc) de 556 mV. No segundo processo, com a velocidade da esteira durante a difusão do alumínio de 150 cm/min a uma temperatura de queima das pastas metálicas de 880 °C foi processada uma célula solar de 15,2 % eficiência com Jsc de 34,0 mA/cm<sup>2</sup> e Voc de 578 mV. Este valores são próximos ao valor da melhor célula solar processada no NT- Solar com difusão de Al em forno convencional, cuja eficiência foi 15,8 %. Analisando também as três melhores células deste processo, a eficiência é superior a 14,3 %, valor similar à média mundial de células industriais. Este processo de difusão no forno de esteira pode proporcionar uma redução no custo de fabricação.

Palavras-Chaves: célula solar, campo retrodifusor de alumínio, forno de esteira.

## ABSTRACT

VELEDA, Paula. **Solar Cells with Back Surface Field Obtained by Belt Furnace.** Porto Alegre. 2009. Thesis (Master's degree in Engineering and Technology of Materials) Pos-Graduation Program in Materials Engineering and Technology, PONTIFICAL CATHOLIC UNIVERSITY OF RIO GRANDE DO SUL.

The aim of this work was to develop and analyze back surface fields (BSF) produced by evaporated aluminum diffused in a belt furnace. Two fabrications processes were developed to produce p-type Czochralski grown silicon solar cells with n<sup>+</sup> emitter obtained by phosphorus diffusion based on POCl<sub>3</sub>. The objective of the first process was to develop silicon solar cells with BSF produced by simultaneous Al diffusion and metal paste firing in belt furnace, for cells with n<sup>+</sup> emitters formed at 875 °C and 900 °C. In this process, temperature of aluminum diffusion was the analyzed parameter. In the second process, aluminum diffusion was performed at 900 °C before metal firing and belt speed was experimentally optimized. Besides, temperature of metal firing was also optimized. For the first process, best results were obtained for phosphorus emitter diffused at 875 °C and aluminum diffusion/metal firing at 920 °C. The higher efficiency was 13.5 %, with short-circuit current density (Jsc) of 31.9 mA/cm<sup>2</sup> and open-circuit voltage (Voc) of 556 mV. In the second process, with a belt speed of 150 cm/min and metal firing at 880 °C was processed a 15.2 % efficient solar cell, with Jsc = 34.0 mA/cm<sup>2</sup> and Voc = 578 mV, results slightly below the 15.8 % observed in cells with aluminum BSF produced in conventional furnaces at NT-Solar. By evaluating the three solar cells processed in the second fabrication sequence, the efficiency is higher than 14.3 %, similar to that of the world industrial silicon solar cells. The diffusion of Al performed on belt furnaces can be an approach to reduce fabrication costs.

Key-words: solar cell, back surface field, belt furnace.

## 1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVAS

Com o atual consumo de energia, as reservas de petróleo e gás natural poderão se esgotar nas próximas décadas, fazendo com que a humanidade sofra uma grande crise energética. A energia solar é uma fonte de energia limpa e inesgotável com potencial suficiente para suprir o crescimento das necessidades da humanidade.

Após a primeira crise do petróleo na década de 70, iniciou-se o crescimento da indústria de células solares. Em nível mundial, esta tecnologia de conversão de energia está avançando cada vez mais.

As células solares são dispositivos que convertem a radiação solar em energia elétrica produzida na forma de corrente elétrica e tensão contínua, podendo ser convertida em corrente e tensão alternada ou armazenada em baterias. Os sistemas fotovoltaicos são de baixo impacto ambiental, com uma duração de aproximadamente 30 anos, podendo ser utilizados em qualquer parte do mundo. Uma das maiores preocupações é o custo da fabricação de células solares, se tornando um desafio para a indústria. O alto custo é um dos obstáculos para a difusão dos sistemas fotovoltaicos em larga escala. Contudo, a tecnologia fotovoltaica está se tornando cada vez mais competitiva e o seu custo está baixando [1].

Um dos semicondutores mais utilizados para fabricar os dispositivos de conversão fotovoltaica é o silício. Este material é obtido a partir do quartzo, matéria-prima utilizada na fabricação do vidro e das fibras óticas. Purificado e transformado em lâminas, ele é o material básico para fabricação de células solares.

Para a obtenção de uma célula solar com alta eficiência e baixo custo, é necessário otimizar as características elétricas da célula solar, que dependem de vários fatores como: estrutura atômica do material, profundidade das regiões dopadas, defeitos na rede cristalina, tempo de vida dos portadores minoritários, baixo nível de recombinação na superfície, filme anti-reflexo, tipo de metalização, etc. A combinação destes parâmetros determina a eficiência da célula solar [2].

Para formar a junção pn nas células solares de silício são introduzidas impurezas dopantes nas lâminas, previamente dopadas com boro ou gálio ou com impurezas do tipo n, como fósforo. A difusão dos dopantes é realizada por meio de processos térmicos em temperaturas de 800 °C a 1000 °C. Este passo térmico normalmente é realizado em fornos com tubos de quartzo de elevada pureza e são processadas de 50 a 200 lâminas simultaneamente. Com este tipo de forno é possível obter regiões difundidas de alta qualidade, mas considerando-se os tempos de subida e descida de temperatura e o tempo de difusão, este processo é considerado um redutor da capacidade de processamento das atuais indústrias de módulos fotovoltaicos. Uma alternativa é o emprego de fornos de esteira nos quais os processos de difusão são mais rápidos e o método é facilmente automatizado.

## 2. OBJETIVOS

Este trabalho tem por objetivo desenvolver e analisar o campo retrodifusor formado por Alumínio evaporado e difundido em forno de esteira. Para avaliar a eficácia do BSF (*back surface field*) foram desenvolvidos dois processos de fabricação de célula solares em substrato de silício, tipo p crescida pela técnica Czochralski (Cz), com emissor n<sup>+</sup> formado por POCl<sub>3</sub>.

### 2.1. Objetivos Específicos

- Desenvolvimento de um processo de fabricação de células solares com campo retrodifusor com difusão de alumínio e queima de pasta metálica realizadas simultaneamente no forno de esteira.
- Desenvolvimento de um processo com otimização experimental do campo retrodifusor com alumínio evaporado e difundido em forno de esteira.

### 3. PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DE CÉLULAS SOLARES

#### 3.1. Célula Solar: Estrutura Básica

A maioria das células solares atualmente fabricadas são produzidas em lâminas de silício podendo-se, utilizar substratos monocristalinos ou multicristalinos. A lâmina de silício é submetida a diversos tratamentos térmicos e químicos, difundindo-se impurezas doadoras denominados de tipo n ou aceitadoras do tipo p. A Figura 3.1 mostra uma célula típica. O processo típico de fabricação de uma célula solar passa essencialmente por alguns passos, como preparação da superfície, formação de uma junção pn na parte frontal, criação da região p<sup>+</sup> na parte posterior, formação dos contatos metálicos frontal e posterior e deposição de filmes anti-reflexo [3].

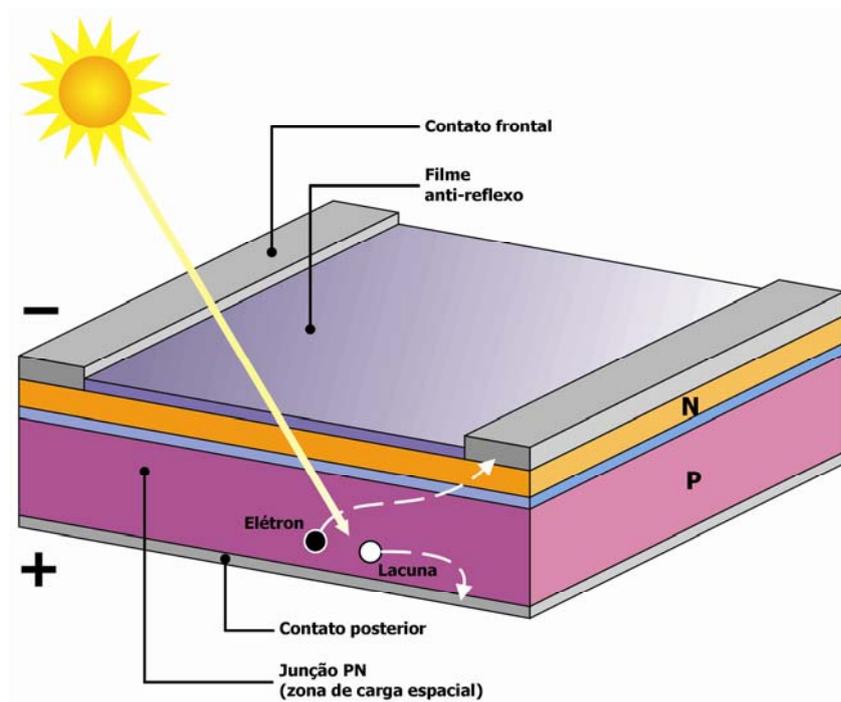


Figura 3.1. Estrutura básica de uma célula solar [3].

Na junção de diferentes dopagens aparecerá uma região eletricamente carregada e, em consequência, um campo elétrico na parte interna do material. A radiação solar que penetra no dispositivo produzirá portadores de carga (negativos, elétrons e positivos, lacunas) e estes poderão se deslocar no material. Se alcançarem a região da junção serão acelerados pelo campo elétrico, produzindo assim uma tensão e uma corrente elétrica, se a mesma for conectada a um circuito externo [3].

Uma célula solar ideal tem algumas características: baixa reflexão na superfície, reduzida área de contato metálico, elevada absorção da radiação solar, coleção eficiente dos portadores de carga gerados, mínima recombinação de portadores de carga, baixa resistência elétrica no dispositivo e nos contatos metal-semicondutor [3].

A eficiência de uma célula solar é dada pela relação entre a potência elétrica produzida e a potência da radiação solar incidente. As melhores células de silício produzidas em laboratórios atingem eficiências de 24,7% e na indústria as melhores células fabricadas atingem a eficiência de 22%, mas com processos complexos usados na fabricação de dispositivos de microeletrônica. Nas indústrias convencionais, as células atingem eficiências de 14 % a 15 % [3].

As duas estruturas mais desenvolvidas em nível industrial são  $n^+pn^+$  e  $n^+pp^+$ . Na primeira, o fósforo é difundido em ambas faces da lâmina de silício e a região  $n^+$  posterior é perfurada pela metalização posterior. Na segunda estrutura, uma região  $p^+$  é difundida na face posterior. Esta região denominada BSF, melhora as características elétricas das células solares porque reduz a recombinação na face posterior [3].

### **3.2. Célula $n^+pn^+$**

A Figura 3.2 apresenta o processo de fabricação de células  $n^+pn^+$ . É um dos processos padrões utilizado na maioria das indústrias de células solares. Neste tipo de estrutura, lâminas dopadas com boro (tipo p) passam por uma etapa de

texturação das superfícies em um banho de NaOH ou KOH, podendo reduzir a refletância de 33 % para 11 % [3].

Depois é realizada uma limpeza das lâminas em solução química baseada em  $H_2O_2$  e HCl e  $H_2O_2$  e  $NH_4OH$ . Então, as laminas são introduzidas em um forno de alta temperatura, com tubo de quartzo, onde é realizada a difusão de fósforo a partir de uma fonte líquida para formar a região do tipo  $n^+$ . A difusão de fósforo realizada em toda a superfície da lâmina. A fim de evitar o curto-circuito entre as faces da mesma, as bordas são extraídas ou separadas as regiões frontais das posteriores por ataque químico, por plasma ou laser. Para reduzir a reflexão na superfície frontal, é depositado um filme anti-reflexo (AR), normalmente de óxido de titânio ou nitreto de silício [3].

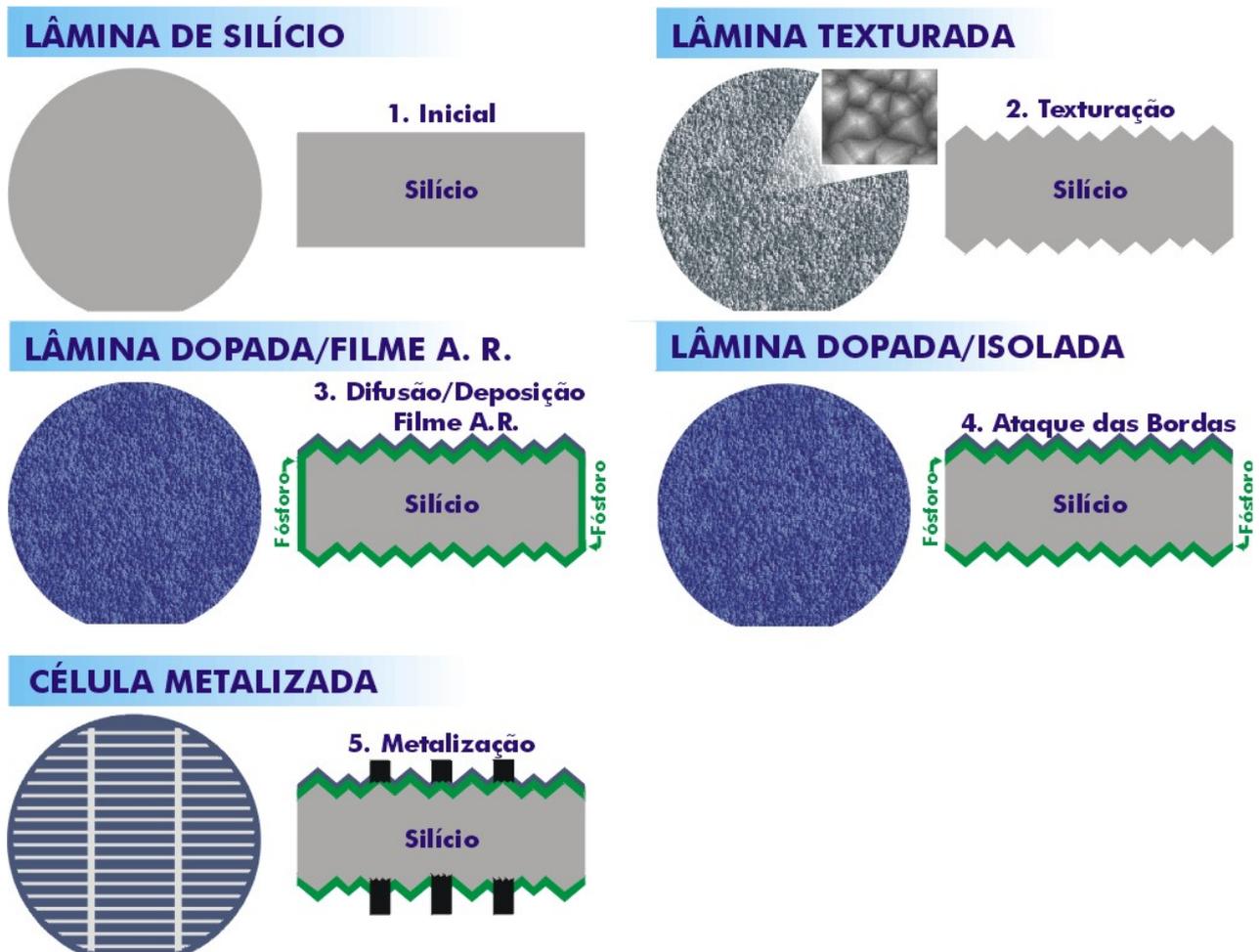


Figura 3.2. Processo de fabricação de células  $n^+pn^+$  [3].

Após o ataque das bordas, as lâminas são metalizadas por serigrafia. A metalização por serigrafia está baseada em dois equipamentos o *screen-printer* e o forno de queima de pastas de metalização. Primeiramente é depositada sobre a lâmina de silício uma pasta contendo prata ou alumínio, com um desenho que é previamente gravado em uma máscara de serigrafia. Depois as lâminas são colocadas em um forno de esteira para secagem da pasta a uma temperatura de 150 °C a 400 °C. A face posterior passa pelo mesmo processo. Então as lâminas retornam ao forno para recozimento final das pastas, com temperaturas entre 700 °C e 1000 °C, para estabelecer o contato elétrico com o silício. A pasta usada na face posterior, geralmente composta de prata e alumínio, deve perfurar a camada  $n^+$ , a fim de estabelecer o contato com a região p e formar uma célula solar com junção pn [3].

### 3.3. Célula $n^+pp^+$

A estrutura  $n^+pp^+$  também é muito utilizada na fabricação de células solares industriais. A região  $n^+$  forma a junção pn e a região  $p^+$  tem como principal função repelir os portadores minoritários gerados pela radiação solar próximo da região posterior, aumentando a tensão de circuito aberto produzida pela célula. A face  $n^+$  é a face frontal da célula solar e a  $p^+$  é a posterior [4].

A Figura 3.3 mostra o esquema de um processo de fabricação de células solares  $n^+pp^+$ , baseado na difusão de fósforo e alumínio em fornos convencionais. O esquema mostrado é típico de células de laboratório [1], [4].

Primeiramente, se cresce um óxido de silício sobre as superfícies com uma espessura adequada para proteger determinadas regiões da lâmina dos ataques anisotrópicos e das difusões de dopantes. A fim de definir a área da lâmina onde se fabricará a célula, realiza-se um processo de fotolitografia. Este consta de: deposição de resinas fotossensíveis, exposição à radiação ultravioleta das regiões a serem atacadas e revelação da resina. As regiões expostas à radiação ultravioleta ficam sem resina e em seguida se ataca o óxido destas zonas por meio de uma solução de ácido fluorídrico tampão ( $HF:NH_4F$ ) [1], [4].

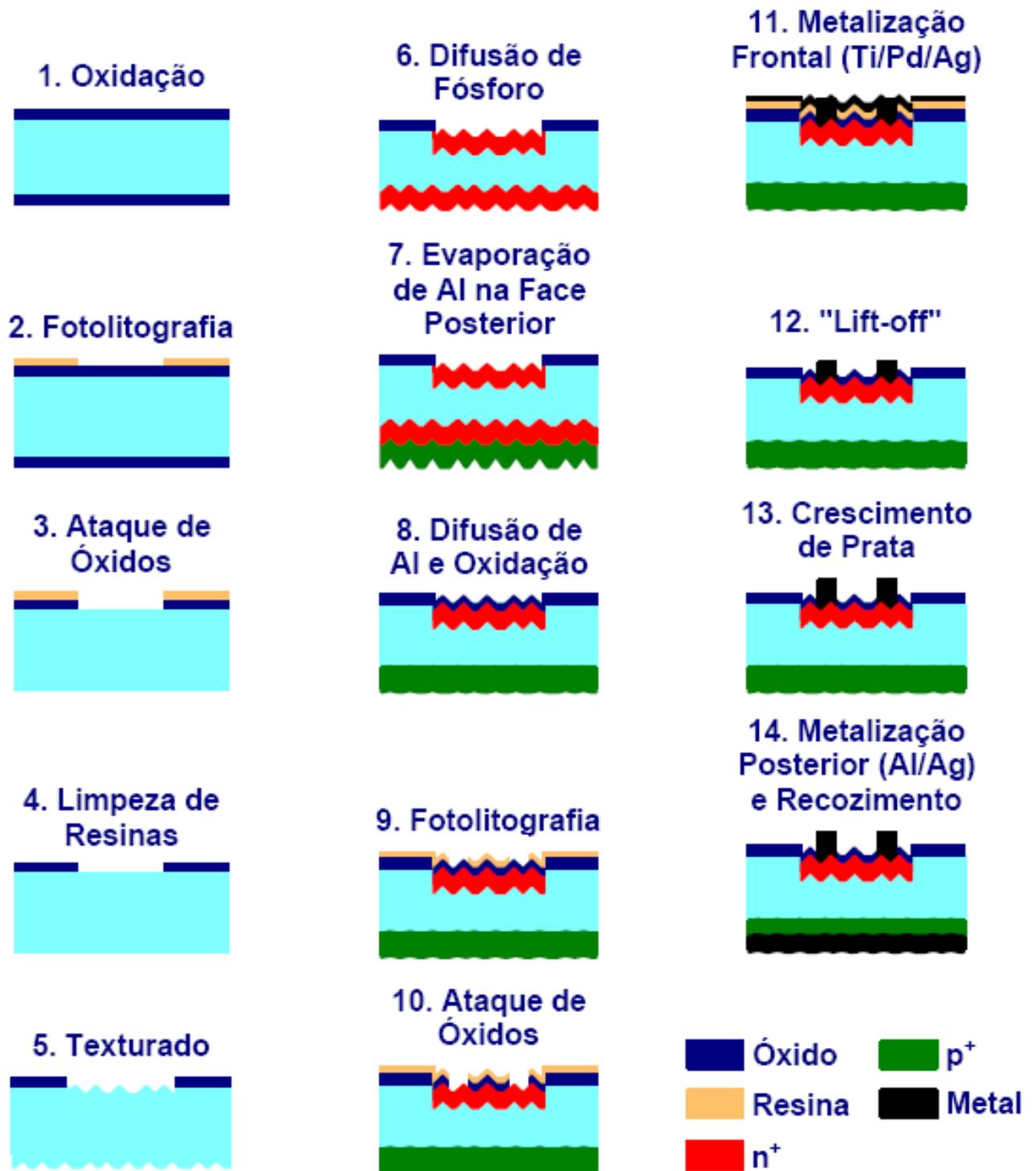


Figura 3.3. Processo de fabricação de célula solares  $n^+pp^+$ , com difusão de P e Al [1], [4].

Então, realiza-se o processo de texturação, que é a formação de micropirâmides na superfície mediante um ataque anisotrópico e difunde-se fósforo a fim de formar a região de tipo  $n^+$ . O fósforo pode ser difundido a  $850\text{ }^\circ\text{C}$ , com  $0,01\%$  de  $\text{POCl}_3$  no ambiente. Neste caso, a região  $n^+$  tem resistência de folha de  $300\ \Omega/\square$ . Depois da difusão de fósforo, se deposita alumínio (dopante tipo p) na face posterior

por evaporação em vácuo e realiza-se a redistribuição de ambos dopantes, a 1000 °C. Após este passo térmico, a resistência de folha da região  $n^+$  é de  $100 \Omega/\square$ . Durante a redistribuição de dopantes, se cresce um óxido de silício de 100 nm a fim de produzir um filme antirreflexo sobre o silício. Uma lâmina de silício polida reflete 33 % da radiação solar, uma texturada, 11 %, e uma com textura e recoberta com  $\text{SiO}_2$  pode alcançar refletâncias de 2 % [1], [4].

A metalização frontal consiste em: processo fotolitográfico para delimitação da malha metálica para coleta da corrente elétrica, evaporação em vácuo de Ti, Pd e Ag (todos com espessura da ordem de 50 nm), extração do metal excedente pela técnica de *lift-off* e crescimento eletrolítico de prata para obter trilhas metálicas de espessuras de aproximadamente 10  $\mu\text{m}$ . Com esta técnica, a malha metálica é definida por fotolitografia, isto é, abrem-se janelas em uma camada de óxido de silício, ficando o restante da lâmina recoberto com  $\text{SiO}_2$  e deposita-se metal em toda a superfície da lâmina. Depois da deposição dos metais, as lâminas são imersas em acetona e colocadas em um banho com agitação por ultra-som. Assim, o metal depositado sobre as regiões com resina se desprenderá da lâmina, permanecendo apenas na área definida por fotolitografia [1], [4].

Concluindo o processo, depositam-se Al e Ag na face posterior, novamente por evaporação em vácuo e realiza-se um recozimento final em *forming gas* (95 % de  $\text{N}_2$  e 5 % de  $\text{H}_2$ ) para melhorar o contato metal semicondutor e recuperar possíveis danos superficiais [1], [4].

O processo de fabricação de células  $n^+pp^+$  descrito, com região  $n^+$  de resistência de folha de  $100 \Omega/\square$  é típico das células de laboratório, com metalização baseada na evaporação de Ti/Pd/Ag. Para células industriais com metalização serigráfica, a região  $n^+$  deve ter resistência de folha da ordem de  $40 \Omega/\square$  a  $50 \Omega/\square$ , com concentração em superfície maior que  $10^{20}$  átomos/ $\text{cm}^{-3}$ . A Figura 3.4 apresenta um processo simplificado de fabricação da célula  $n^+pp^+$  de lâmina inteira, onde observa-se que os passos de oxidação e fotolitografia foram retirados [1], [4].

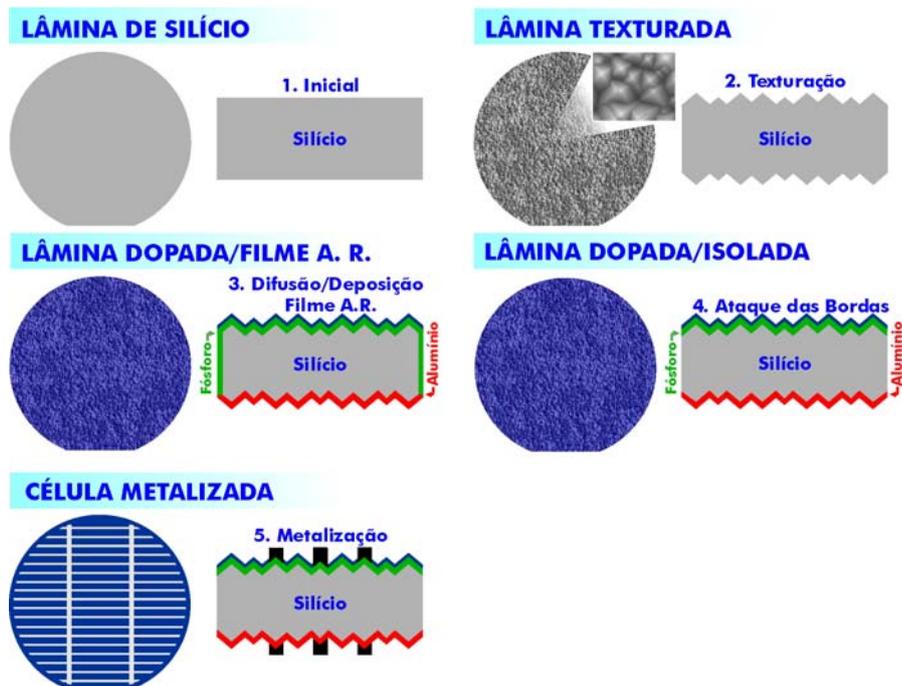


Figura 3.4. Processo de fabricação de célula n<sup>+</sup>pp<sup>+</sup> [5].

### 3.4. Metalização por Serigrafia

A metalização é um passo importante na fabricação de células solares, que pode limitar a eficiência e determinar o custo do processamento das mesmas.

A tecnologia de deposição da malha metálica nas células solares deve ser compatível com a concentração de portadores de carga no emissor e com a profundidade da junção p-n. Para formar a malha metálica podem ser utilizadas as técnicas de fotolitografia combinada com a evaporação de metais em vácuo, a deposição química sem eletrodos (*electroless*) e a serigrafia. As técnicas de fotolitografia e *electroless* necessitam muito tempo e são caras quando comparadas à serigrafia, que é uma técnica relativamente simples. No entanto, esta última produz células de menor eficiência [6]- [9].

O equipamento de serigrafia é robusto e simples, sendo que a técnica pode ser facilmente automatizada. Produz pouco desperdício de material e pouco impacto ambiental e, por ser modular, facilita a produção em escala [7].

No processo de metalização deposita-se uma pasta contendo prata ou alumínio e prata sobre a lâmina de silício segundo um desenho gravado em uma máscara, conforme ilustra a Figura 3.5. Os fatores que afetam a qualidade da malha de metalização relativo ao processo de serigrafia são: a viscosidade da pasta, a área de serigrafia, a tensão na tela, a velocidade do rodo e a distância entre a lâmina e a tela [7]. O contato metálico em uma célula solar deve obedecer a certas exigências, tais como: ter baixa resistência de contato com o silício, boa resolução da trilha, boa soldabilidade e baixo custo. Uma das desvantagens da serigrafia é o elevado custo das pastas metálicas [7].

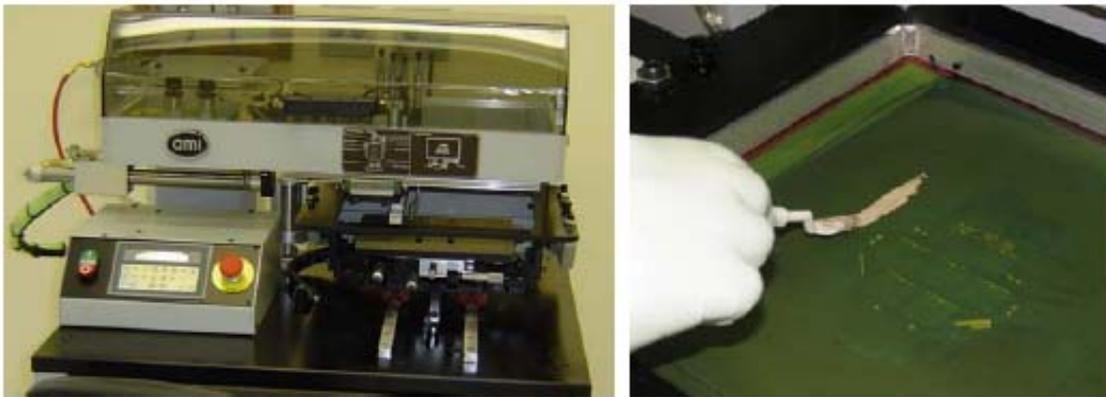


Figura 3.5. "Screen printer" e detalhe da colocação da pasta serigráfica.

Após a impressão da malha metálica as lâminas são colocadas em um forno para secagem da pasta a baixa temperatura, com valores variando entre 150 °C a 400 °C. A outra face das lâminas passa pelo mesmo processo e logo elas retornam ao forno para a queima final das pastas, com temperaturas entre 700 °C e 1000 °C, com a finalidade de estabelecer o contato elétrico com o silício. Pode-se utilizar para esse processo um forno de esteira, que oferece como vantagem temperaturas elevadas e tempo de processo curto. Não é conveniente submeter nem a pasta nem a lâmina duas vezes ao processo de queima. Por isto, aplicam-se as pastas sobre a superfície frontal e posterior, passando por dois passos de secagem, mas somente por uma queima final [7].

A serigrafia hoje em dia é considerada uma técnica muito econômica para fabricação de células solares por ser rápida. O alto custo das pastas é compensado pela eficiência da produção e o fator de forma das células solares. Os contatos de

prata formados por serigrafia penetram em torno de 0,3  $\mu\text{m}$  na lâmina de silício. Conseqüentemente, uma junção de aproximadamente 0,6  $\mu\text{m}$  de profundidade é realizada para impedir que a prata alcance a base e provoque um curto-circuito. Ao mesmo tempo, é necessária uma concentração superficial de fósforo de  $10^{20}$  átomos/ $\text{cm}^3$  a  $10^{21}$  átomos/ $\text{cm}^3$  a fim de obter uma baixa resistência de contato e um elevado fator de forma [6], [9].

Existem dois aspectos básicos na serigrafia que se deve considerar: a composição da pasta e as condições de queima. A composição da pasta é importante pelo fato da viscosidade (que influi na definição), a resistividade do composto metálico final e, juntamente com outros fatores característicos da dopagem afetarem a resistência de contato. Esta resistência é bastante variável em função da pasta e do processo de queima. Durante a queima a altas temperaturas, os componentes da pasta, interagem com a superfície da lâmina. O óxido, a camada anti-reflexo ou outras películas presentes na superfície podem dissolver-se em alguns componentes da pasta, o que permite realizar o contato com a lâmina de silício através dos mesmos. Se a queima for mais agressiva, a pasta pode perfurar a junção, originando correntes de fuga. Sob resfriamento, o Si contido na pasta cristaliza epitaxialmente e parte das partículas de Ag dissolvidas na pasta, que estão incrustadas na superfície do Si, formam o contato direto com o emissor [6], [9].

## 4. DIFUSÃO

### 4.1. Tipos e Parâmetros de Caracterização

O processo de difusão ocorre com a deposição de uma alta concentração da impureza desejada na superfície da lâmina de silício, normalmente sendo de fósforo, boro ou alumínio. A deposição de fósforo é realizada para formar regiões do tipo  $n^+$  e para formar regiões do tipo  $p^+$  deposita-se alumínio ou boro.

Os átomos de impurezas penetram na lâmina de silício pelos mecanismos substitucional ou pelo mecanismo de difusão intersticial [10]. Na Figura 4.1 é possível visualizar como um átomo de impureza pode penetrar em uma rede cristalina.

No caso da difusão substitucional, o átomo de impureza salta de um local da rede cristalina para outro, substituindo assim um átomo de silício na rede cristalina. Vacâncias devem estar presentes na rede cristalina do silício para que ocorra a difusão substitucional. Em altas temperaturas a vacância pode ser criada deslocando os átomos de silício da posição da rede para o espaço intersticial desocupado entre os locais da rede cristalina [10].

No caso da difusão intersticial mostrado na Figura 4.2, a difusão ocorre devido aos espaços entre os átomos de silício, fazendo com que as impurezas saltem de um espaço intersticial a outro. Este processo não necessita das vacâncias e, portanto, esta difusão é mais rápida que no processo substitucional [10]-[11].

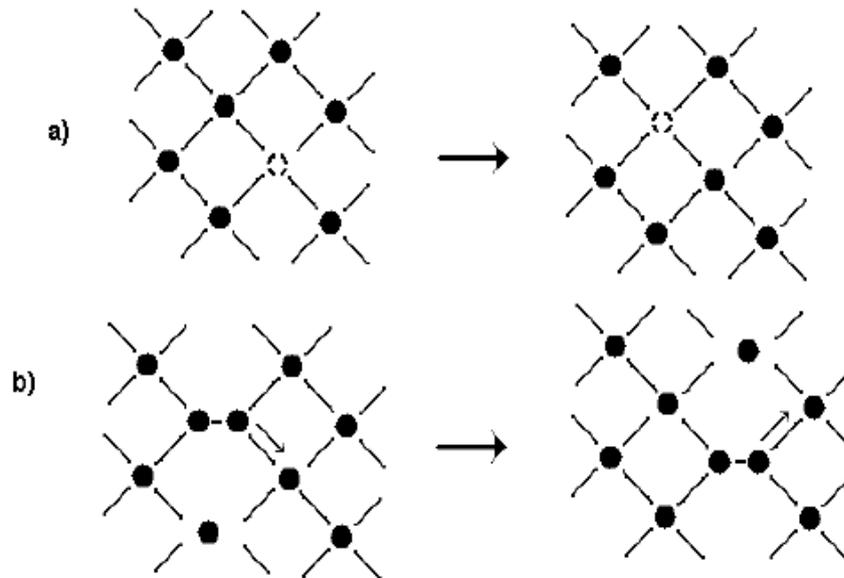


Figura 4.1. Representação do mecanismo de difusão de impureza em cristal, a) assistido por vacância e b) assistido por auto-interstício [12].

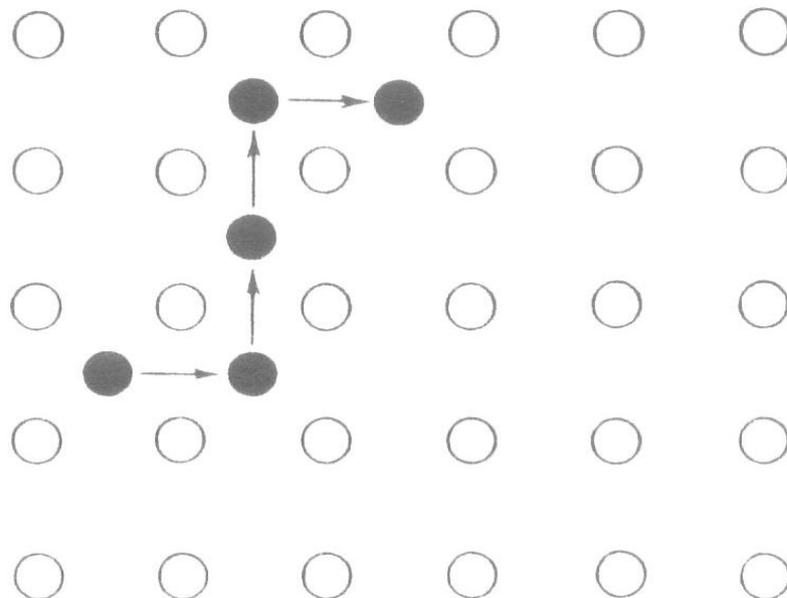


Figura 4.2. Representação do mecanismo de difusão intersticial de impureza em cristal [12].

#### 4.1.1. Tipos de Difusão

Os processos de difusão podem ser classificados segundo as condições de contorno da difusão com fonte infinita e com fonte finita [10].

No primeiro caso, a concentração de átomo na superfície da lâmina permanece constante durante todo o processo de difusão.

A solução da equação da segunda lei de Fick para esta condição de contorno é dada por [10]:

$$C(x,t) = C_s \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) \quad 4.1$$

onde D é o coeficiente de difusão ou difusividade  $C_s$  é a concentração de átomos na superfície, x é a profundidade na lâmina e t é o tempo.

Esta difusão produz perfis de impurezas com função erro complementar, como é representado na Figura 4.3. Nesta, observa-se que a concentração de impurezas permanece constante na superfície e a junção pn, determinada pela intersecção entre o perfil de impurezas e a linha  $C_B$  (concentração de átomos no substrato ou na base) é aprofundada em função da temperatura do processo [10].

O número total de átomos de impurezas por unidade de área é chamado de Q. Encontra-se Q integrando a concentração de impurezas difundida ao longo da profundidade da lâmina de silício.

$$Q = \int C(x,t) dx = 2C_s \sqrt{\frac{Dt}{\pi}} \quad 4.2$$

No segundo tipo de difusão, há uma quantidade fixa de dopantes introduzida na lâmina de silício. Se o perfil de impurezas pré-depositado é superficial, quando comparado ao perfil resultante após a redistribuição dos dopantes, a difusão com fonte finita pode ser modelada considerando uma função pulso na superfície da lâmina como condição de contorno. A magnitude deste pulso é igual ao valor de Q e a solução da equação da segunda lei de Fick para este caso é:

$$C(x,t) = \left( \frac{Q}{\sqrt{\pi Dt}} \right) e^{-\left( \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right)^2} \quad 4.3$$

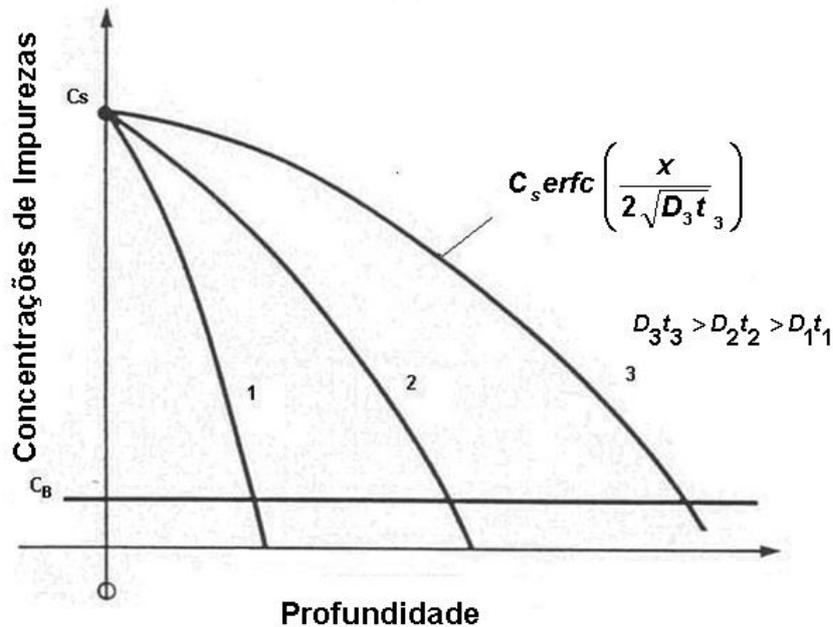


Figura 4.3. Distribuição de impurezas para difusão com fonte infinita [10]

Esta é uma distribuição gaussiana e a Figura 4.4 apresenta alguns perfis resultantes deste processo de difusão. Como se pode observar na Figura 4.4, segundo o produto  $D.t$  aumenta, a profundidade da junção pn aumenta e a concentração de átomos em superfície é reduzida.

O objetivo da difusão é formar a junção pn pela conversão de um material do tipo p em tipo n ou vice-versa. Na Figura 4.5 é apresentado um perfil de boro em uma lâmina previamente dopada com fósforo, caracterizada por uma concentração  $C_B$ . O ponto no qual o perfil de impurezas intercepta a concentração  $C_B$  é profundidade da junção,  $x_j$ . Neste ponto a concentração líquida de impurezas é zero. Para obter o valor  $x_j$  coloca-se o valor de  $C_B$  nas Equações 4.1 e 4.3, obtendo-se:

$$x_j = 2\sqrt{Dt} \operatorname{erfc}^{-1}(C_B/C_S) \quad 4.4$$

para o caso de fonte infinita e

$$x_j = 2\sqrt{Dt} \ln(C_S/C_B)$$

4.5

para caso de difusão com fonte finita.

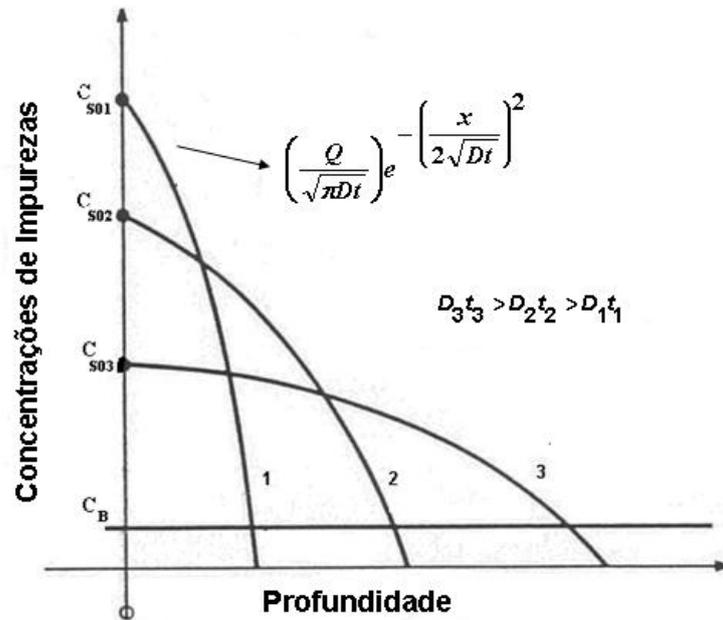


Figura 4.4. Distribuição de impurezas para difusões com fonte finita [10].

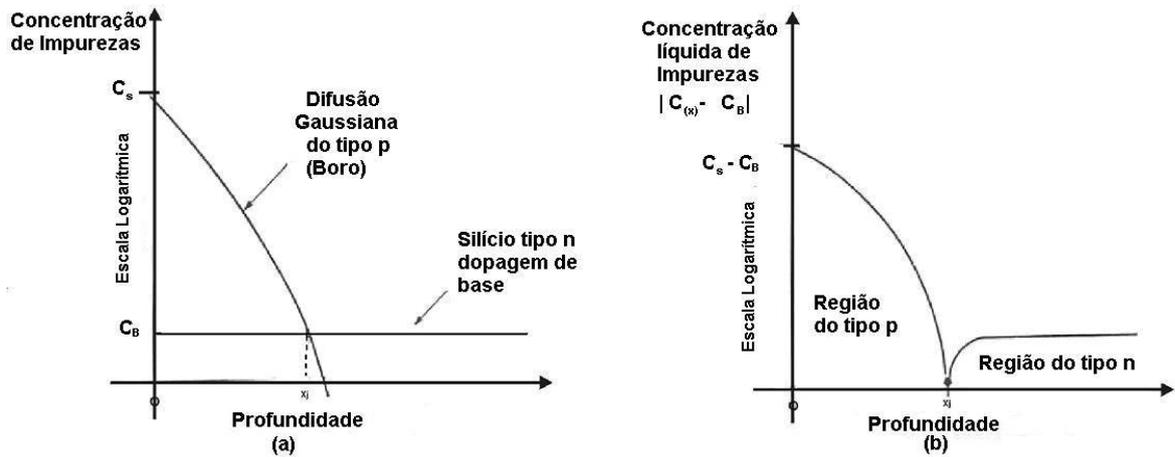


Figura 4.5. (a) Concentração de impurezas em função da profundidade; (b) concentração líquida de impurezas em função da profundidade. Em ambos os gráficos destaca-se a profundidade  $x_j$  da junção pn [10].

### 4.1.2. Parâmetros de Caracterização

A dopagem pode ser caracterizada pelos seguintes parâmetros: concentração em superfície ( $C_s$ ) e pela profundidade de junção ( $x_j$ ), que resultam em uma resistência de folha ( $R_{\square}$ ). Esta é um parâmetro relacionado à dopagem produzida pela difusão de impurezas doadoras e/ou aceitadoras, conforme indica a equação:

$$R_{\square} = \left[ \int_0^{x_j} q\mu C(x) dx \right]^{-1} \quad 4.6$$

onde  $\mu$  corresponde a mobilidade do portador de carga,  $q$  é a carga do elétron,  $C(x)$  é a concentração de impurezas (tipo n ou tipo p) e  $x_j$  é a profundidade da junção pn mostrada na Figura 4.6, que se define como a posição em que a concentração de dopante se iguala à concentração no substrato [10].

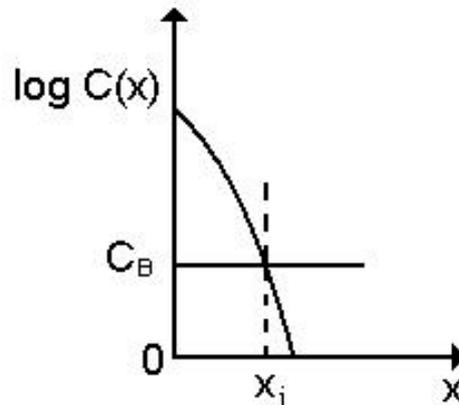


Figura 4.6. O perfil de impurezas e parâmetros básicos.

## 4.2. Difusão em Fornos Convencionais com $\text{POCl}_3$

### 4.2.1. Descrição do Forno

Os fornos convencionais são usados tanto para difusão quanto para oxidação. Nos fornos convencionais o aquecimento do tubo de quartzo é proporcionado por resistências elétricas. No forno ilustrado na Figura 4.7 podem ser processadas lâminas de até 152 mm de diâmetro. Este forno é totalmente automatizado com

controles de temperatura, vazão dos gases e velocidade de entrada/saída das lâminas.

Na fabricação industrial de células solares são utilizados normalmente fornos convencionais para realizar os processos de difusão de dopantes nas lâminas de silício. Este forno possui um sistema de aquecimento que é constituído por resistências elétricas cobertas com cerâmica, tubo de quartzo de alta pureza conforme a ilustração da Figura 4.8, unidade de controle de potência, refrigeração e extração de vapores. A temperatura do forno é controlada pela corrente elétrica que passa pelas espiras resistivas.



Figura 4.7. Forno convencional para difusões e oxidações.

As lâminas são colocadas no interior do tubo de quartzo e injetam-se gases de processo: nitrogênio, oxigênio, além das impurezas dopantes desejadas. O sistema de carregamento das lâminas para entrada e saída do tubo de quartzo é constituído de um suporte controlado pela unidade geral de controle. Esse controlador geral de cada forno permite controlar e executar vários parâmetros dos

processos de difusão, tais como rampas de aumento e diminuição de temperatura, temperatura de difusão, velocidade do suporte das lâminas e tipo de gás e vazão.



Figura 4.8. Detalhe do forno convencional para difusão de fósforo.

#### 4.2.2. Difusão com $\text{POCl}_3$

A difusão com  $\text{POCl}_3$  ocorre em um forno convencional onde as lâminas são colocadas em um tubo com uma fonte de fósforo de gases de alta pureza. A quantidade de dopante que entra no tubo de difusão deve ser controlada para obter uniformidade na  $R_{\square}$  de lâmina para lâmina e em cada lâmina. A Figura 4.9 mostra uma configuração típica para processos de difusão com  $\text{POCl}_3$ .

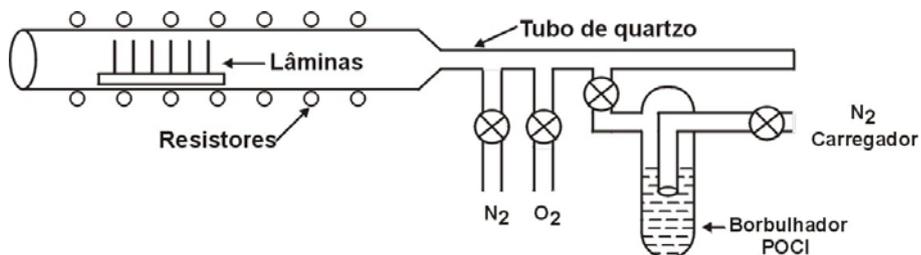
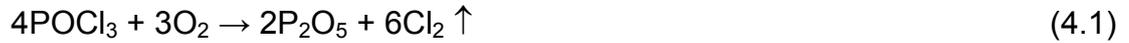


Figura 4.9. Configuração típica de um processo de difusão.

O oxiclreto de fósforo,  $\text{POCl}_3$ , é uma fonte líquida de fósforo usada para formar regiões do tipo-n em processos convencionais de difusão. O  $\text{POCl}_3$  é injetado no forno em presença de oxigênio e forma o óxido de fósforo  $\text{P}_2\text{O}_5$ . Este material

reage com o silício na superfície da lâmina, formando fósforo elementar e dióxido de silício [13]. O processo de difusão de fósforo a partir de oxiclreto de fósforo pode ser resumido nas seguintes reações químicas:



Assim, a reação depende das quantidades de dopante e oxigênio e estas estão relacionadas com as vazões de gases e temperatura do  $\text{POCl}_3$ .

No NT-Solar (Núcleo Tecnológico de Energia Solar.) da PUCRS, Filomena [14] realizou uma série de experimentos para caracterizar a difusão de fósforo no forno convencional, marca *Tystar*. Foram realizados processos em três temperaturas, 800 °C, 850 °C e 900 °C, para três tempos de difusão. Estas são as temperaturas típicas para difusão de fósforo para a produção de regiões  $n^+$  próprias para células solares.

A Figura 4.10 mostra os resultados de resistência de folha para os processos realizados. Observa-se que com a temperatura de 850 °C e com tempo de 30 min a 45 min, obtém-se valores de resistência de folha inferiores a 50  $\Omega/\square$ .

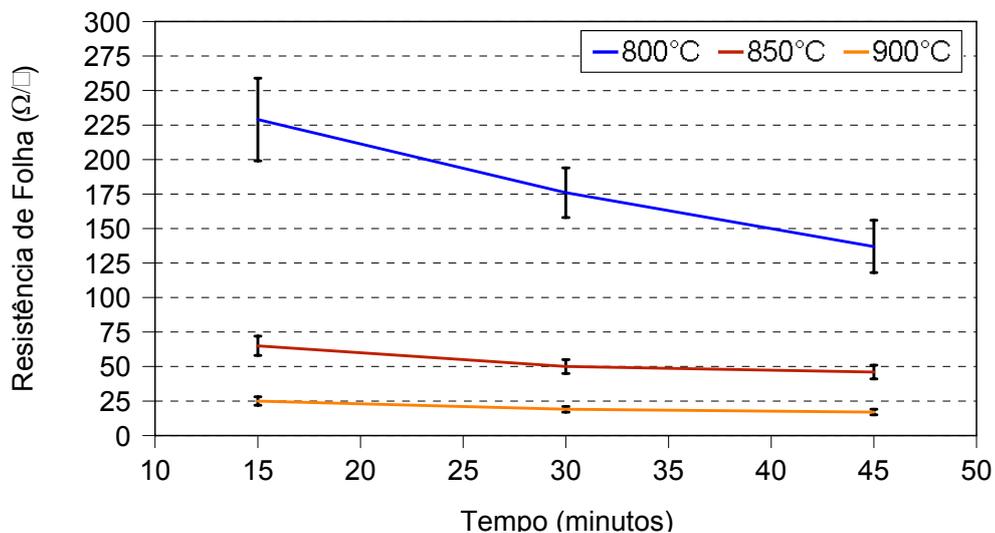


Figura 4.10. Resistência de folha da região  $n^+$  em função da temperatura e tempo de difusão. Processos com  $\text{POCl}_3$  [14].

A Figura 4.11 apresenta os resultados da medida do tempo de vida dos portadores minoritários antes e após os processos de difusão. O tempo de vida dos minoritários é um ótimo indicador da qualidade da lâmina de silício. Neste caso, este parâmetro foi medido pela técnica do decaimento da fotocondutividade, com um equipamento comercial WCT100, da empresa *Sinton Consulting*. Como se pode observar, o processo de difusão de fósforo a partir de  $\text{POCl}_3$  melhora o tempo de vida dos portadores minoritários na maioria dos casos, sendo está uma grande vantagem deste processo de difusão. Os mecanismos nos quais impurezas indesejadas, extraídas das regiões ativas dos dispositivos e conduzidos a outras onde ficam neutralizadas, denominado *gettering*, presente na difusão de fósforo, é uma das técnicas mais utilizadas para melhorar ou recuperar a qualidade de substratos de silício [14]- [17].

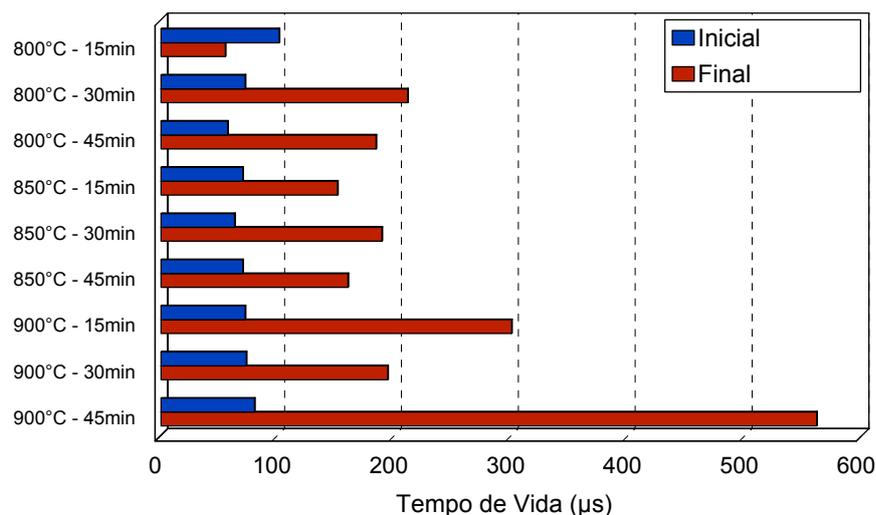


Figura 4.11. Tempo de vida dos minoritários antes e após a difusão de fósforo com  $\text{POCl}_3$  [14].

Com a aplicação de uma alta concentração de dopante é possível obter efeitos de *gettering* eficazes, mas pode-se produzir um efeito indesejado que é a formação da “camada morta”. Esta camada ocorre quando há excesso de fósforo durante a difusão e a quantidade de átomos eletricamente ativos na lâmina de silício é menor que a quantidade de átomos introduzida na mesma. Por exemplo, na Figura 4.12 (a) pode-se ver o perfil de átomos de fósforo eletricamente ativos presente em uma lâmina de silício, onde se observa que há uma saturação na concentração e que este valor corresponde a solubilidade do fósforo em silício. O excesso de fósforo introduzido na lâmina cria uma camada rica em fósforo (*phosphorus rich layer*) que

reduzirá o tempo de vida dos portadores minoritários e por isto é chamada de camada morta (*dead layer*) [18]. A Figura 4.12 (b) apresenta a probabilidade de coleta de portadores de carga em função da profundidade na lâmina de silício, observando-se que na região correspondente ao excesso de átomos de fósforo, a probabilidade de coleta é nula porque os elétrons e lacunas se recombinam antes de serem coletados pela junção pn.

### 4.3. Difusão de Dopante por *Spin-on*

#### 4.3.1. Técnica de *spin-on*

Uma técnica muito investigada para a deposição de dopantes em lâminas de silício é denominada de *spin-on*, ou seja, sobre a lâmina de silício é gotejado um líquido que contém a concentração desejada de dopante. A lâmina é submetida a altas rotações e este líquido forma uma película homogênea por toda a superfície da lâmina. Posteriormente, é realizado o processamento no forno em alta temperatura (800 °C a 1000 °C). A concentração de dopantes é diretamente afetada pela quantidade de dopante da fonte [4], [19].

A Figura 4.13 apresenta um esquema do processo de deposição de dopante por *spin-on*. Nesta figura ilustra-se um exemplo de difusão de boro, mas o processo é idêntico para o caso de dopagem com fósforo. Neste último caso, o dopante líquido, fonte de fósforo, é composto por  $P_2O_5$  e  $SiO_2$  e é dissolvido em solvente orgânico, sendo que é gotejado no centro da lâmina. A lâmina é colocada em rotação de 3000 rpm durante 20 s e o dopante espalha-se uniformemente na superfície da lâmina. Após a rotação a lâmina é retirada e colocada em uma estufa para que o solvente seja evaporado a uma temperatura da ordem de 200 °C.

Após a evaporação do solvente a lâmina pode ser colocada em três fornos distintos para difusão: forno convencional [19], forno de processamento térmico rápido (RTP) ou forno de esteira.

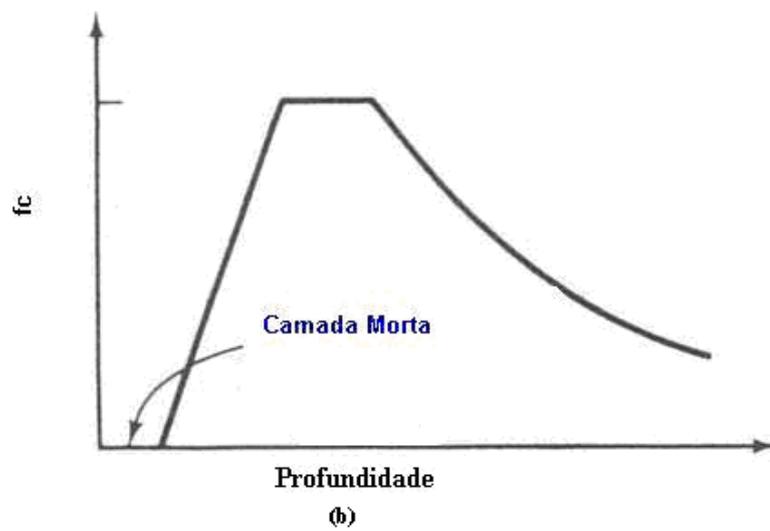
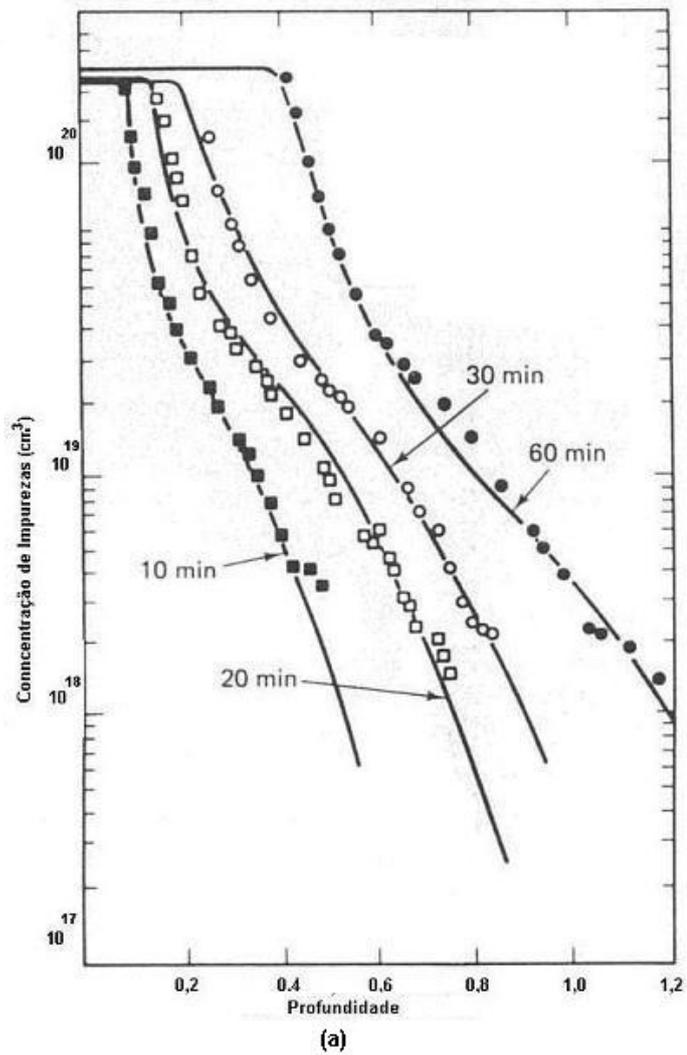


Figura 4.12. (a) Perfil de átomos de fósforo eletricamente ativos para diferentes tempos de difusão; (b) Probabilidade de coleta de portadores de carga ( $f_c$ ) em função da profundidade na lâmina de silício [18].

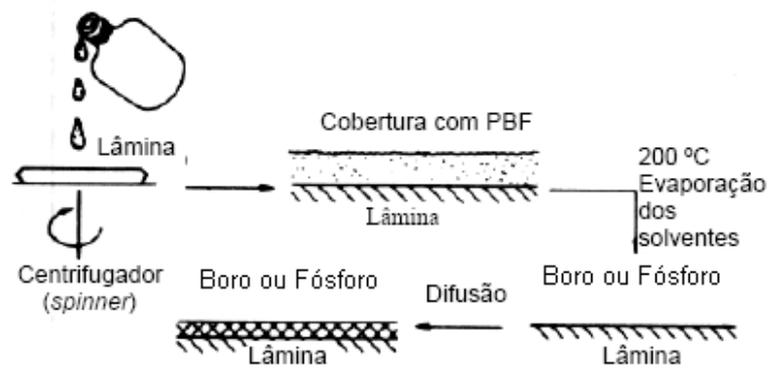


Figura 4.13. Esquema de Processo de deposição de dopantes por *spin-on* [1], [4].

### 4.3.2. Difusão em Forno Convencional

A Figura 4.14 mostra a resistência de folha da região  $n^+$  obtida por difusão de fósforo com o dopante P509 em um forno convencional em função temperatura de difusão e o tempo. Conforme esperado, para cada temperatura, nota-se a tendência de diminuição da resistência de folha com o aumento do tempo de difusão. Também se confirma que a influência do tempo é pequena, predominando a influência da temperatura no valor da resistência de folha [19].

Outro parâmetro de grande influência na performance da célula solar é o tempo de vida dos portadores minoritários. É necessário obter a temperatura e o tempo de difusão que resulta em uma resistência de folha no intervalo ótimo, porém com o maior aumento do tempo de vida dos portadores minoritários. A Figura 4.15 apresenta o tempo de vida dos minoritários após difusões de fósforo em forno convencional, utilizando o dopante *Phosphorus Silica Film P509* como dopante. Como se pode observar, este processo de difusão proporciona *gettering* eficaz para todas as condições de tempo e temperatura.

### 4.3.3. Difusão em Fornos de Processamento Térmico Rápido

Os processos térmicos rápidos, RTP *Rapid Thermal Process* são uma das alternativas estudadas para reduzir os custos na fabricação das células solares. O

custo é reduzido devido a diminuição do tempo de processamento, número de passos térmicos e de limpeza química necessários [20], [21].

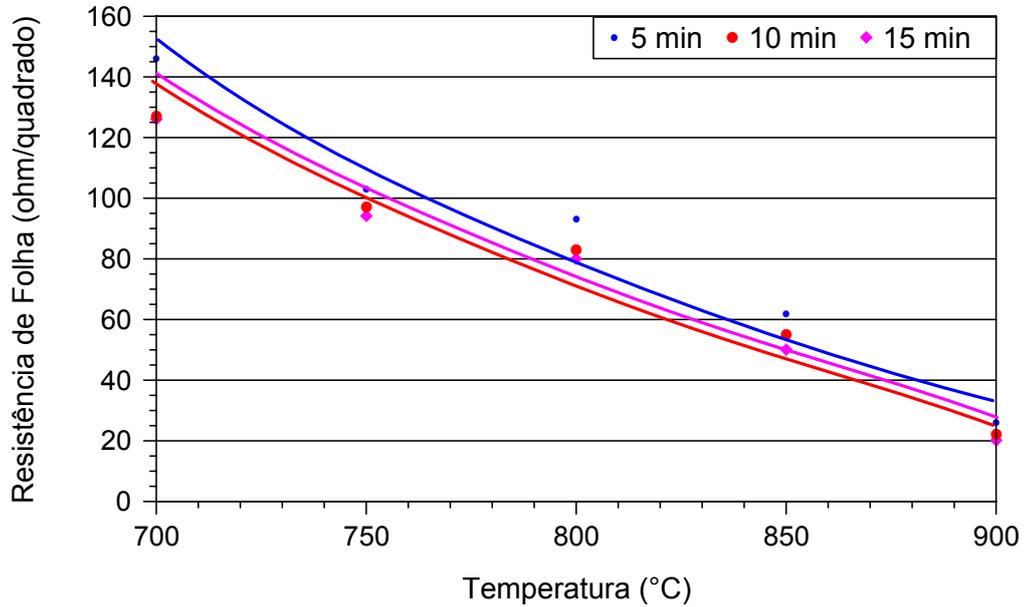


Figura 4.14. Influência do tempo e da temperatura na difusão de fósforo em forno convencional. A fonte de fósforo foi o líquido dopante P509 depositado por *spin-on* [19].

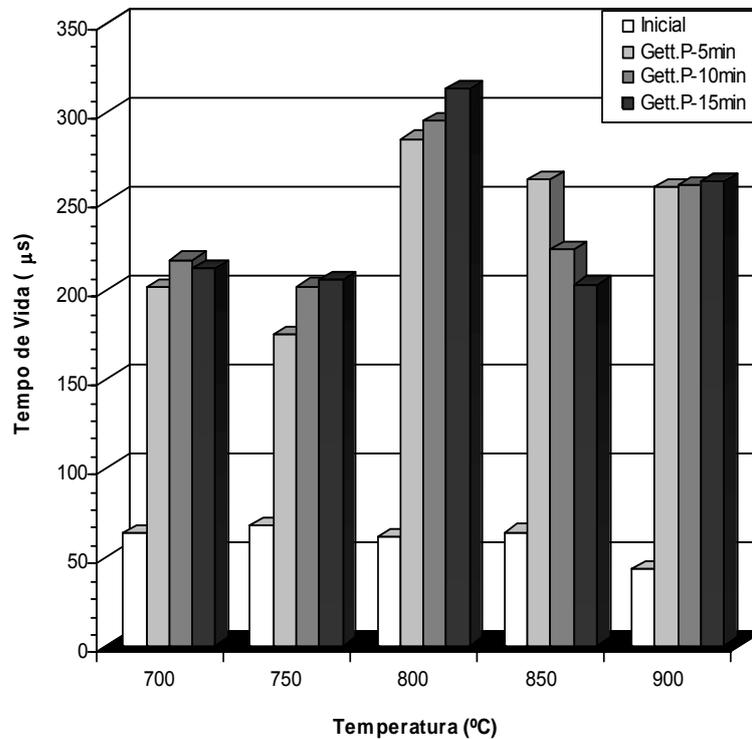


Figura 4.15. Tempo de vida dos portadores minoritários antes e depois de difusões de fósforo em fornos convencionais. Deposição de dopante por *spin-on* [19].

Os fornos de RTP aumentam a temperatura das lâminas de silício rapidamente pela radiação produzida por lâmpadas halógenas. Suas vantagens frente aos fornos convencionais são: a) eliminam-se as longas rampas de aumento/redução da temperatura; b) permitem um maior controle do ambiente de processamento e c) apresentam menor consumo de energia elétrica e gases especiais usados durante o processo térmico de alta temperatura. Na Figura 4.16 apresenta-se o esquema deste tipo de forno.

Cecchini [4] realizou em 2003 uma série de experimentos para encontrar as curvas de resistência de folha e tempo de vida dos minoritários em função de parâmetros do processo de difusão. O forno utilizado no processamento das lâminas de Si foi disponibilizado pelo Lab $\mu$ E da UFRGS, o qual foi fabricado no próprio laboratório e é usado no recozimento de lâminas de silício ou arseneto de gálio que passam por processos de implantação iônica. A Figura 4.17 apresenta uma fotografia do forno. Ele é constituído de um tubo de quartzo, um suporte de quartzo com lâmina de silício e termopar, um sistema de iluminação com lâmpadas halógenas de 1000 W (sete lâmpadas), um circuito de potência para acionar as lâmpadas, um computador que controla o circuito de potência realimentado pelo termopar, um sistema de refrigeração baseado em água para as paredes refletoras metálicas (que estão sobre o tubo de quartzo) e em ar comprimido para os terminais das lâmpadas halógenas. O sistema pode atingir temperaturas de 1100 °C e podem ser processadas amostras de até 2 cm x 2 cm, sem que toquem no termopar

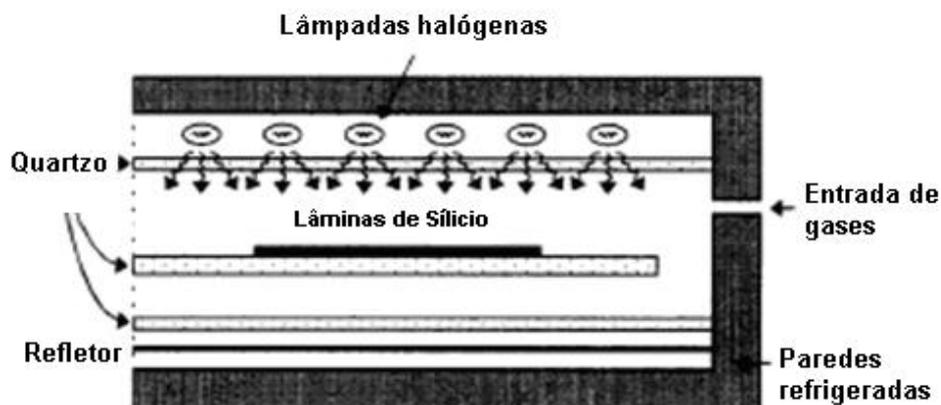


Figura 4.16. Esquema de um forno RTP [4].

As Figuras 4.18 e 4.19 mostram os resultados de resistência de folha em função dos parâmetros de processo (tempo e temperatura) para dopagens com fósforo e boro, respectivamente. Foi observado que para obter os valores ótimos de resistência de folha para metalização baseada em fotolitografia, o processo deveria ser realizado na temperatura entre 950 °C- 1000 °C durante pelo menos 1 min. Como a concentração de fósforo no filme P509 é de aproximadamente  $1 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ , a variação de resistência de folha era basicamente devida ao aprofundamento da junção pn [4].

A Figura 4.20 apresenta o tempo de vida médio de amostras antes de serem processadas e depois de passarem por processos de difusão de fósforo. Como se pode ver, na maioria das vezes, a difusão de fósforo melhora o tempo de vida inicial das amostras. Considerando as contaminações existentes no forno, foi concluído que o *gettering* proporcionado por esta difusão consegue coletar impurezas introduzidas e um percentual daquelas existentes nas lâminas antes do processamento [1].

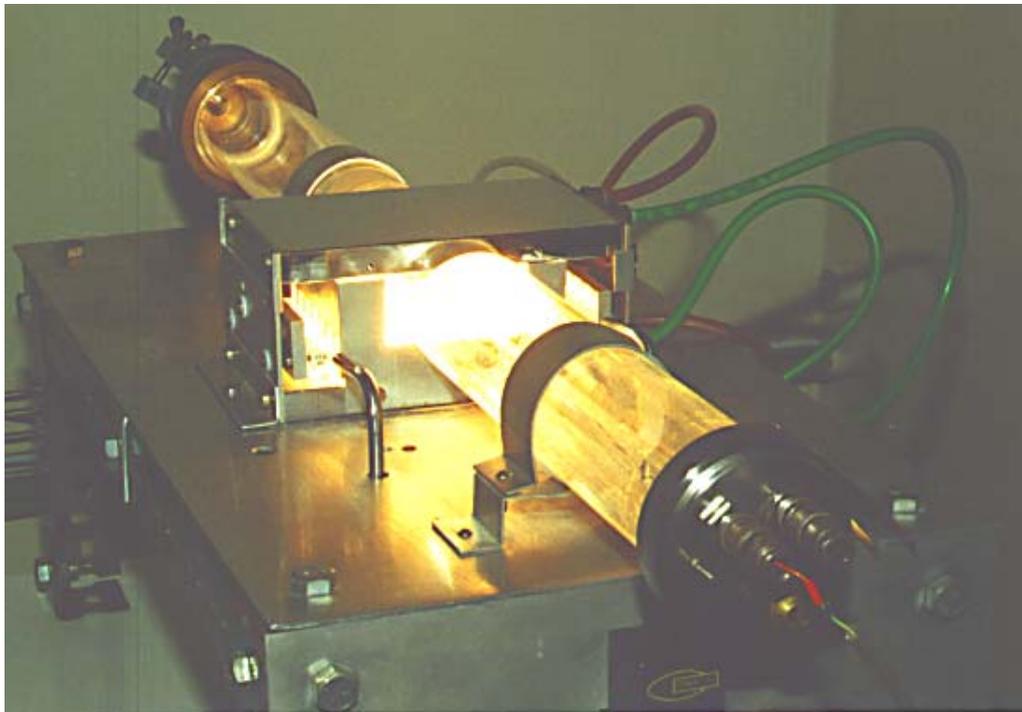


Figura 4.17. Forno RTP (*Rapid Thermal Processing*) do Laboratório de Microeletrônica da UFRGS, utilizado no trabalho de Cechini [4]

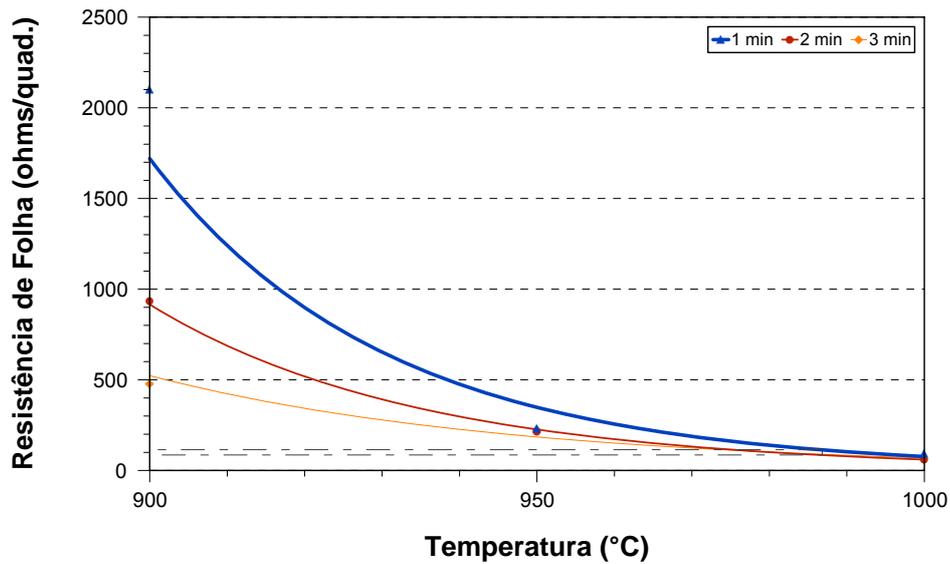


Figura 4.18. Variação da resistência de folha em função dos parâmetros do processo: tempo e temperatura da difusão de fósforo. O intervalo de maior rendimento de células metalizadas por fotolitografia está 60 e 85  $\Omega/\square$  indicado no gráfico através das retas marcadas pelo caracteres --- [4].

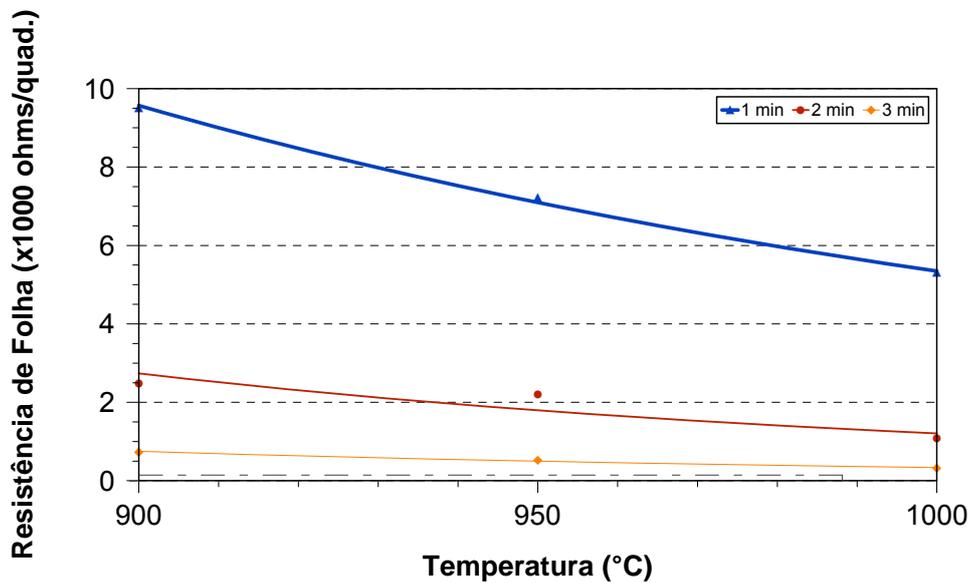


Figura 4.19. Variação da resistência de folha em função dos parâmetros do processo: tempo e temperatura da difusão de boro. O intervalo de maior rendimento está entre 60  $\Omega/\square$  e 100  $\Omega/\square$ , indicado no gráfico através das retas marcadas pelos caracteres -.-. [4].

Nos trabalhos de Mallmann [6] sobre difusão de dopantes depositados por *spin-on* e metalização serigráfica de células solares, foi utilizado um forno marca *JIPELEC*, modelo *JetFirst 100*. Este está constituído de uma câmara de alumínio

com janela de quartzo, três pinos de quartzo que suportam lâminas com até 100 mm de diâmetro, dois termopares medem a temperatura para controlar o forno até aproximadamente 1000 °C (um para medir a temperatura da lâmina e outro para acionar o sistema de controle de potência), um pirômetro para controle de temperaturas entre 400 °C e 1300 °C e um sistema de iluminação com 12 lâmpadas halógenas. O forno utilizado permitia rampas de subida da temperatura de até 200 °C/s e de resfriamento de 40 °C/s (partindo de 1000 °C) e de 30 °C/s (partindo de 800 °C).

As Figuras 4.21 e 4.22 mostram os resultados de resistência de folha para diferentes parâmetros de difusão: tempo, temperatura e combinação de gases, para dopagem n com fósforo e p com boro, respectivamente.

Com o aumento da temperatura de difusão foi verificado que há diminuição na resistência de folha, o que caracteriza uma dopagem mais profunda. De 800 °C para 850 °C a redução nos valores de resistência de folha foi mais drástica e, a partir desta última temperatura, a resistência de folha tendeu a se estabilizar.

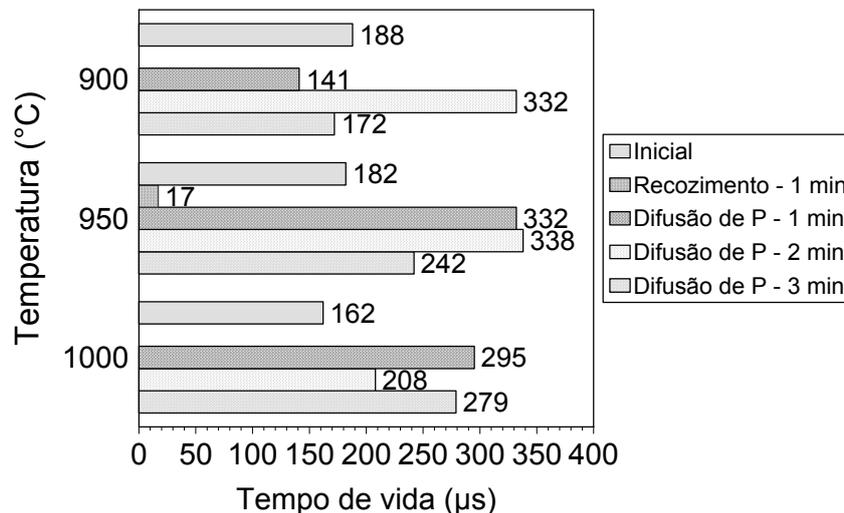


Figura 4.20. Medida do tempo de vida dos portadores minoritários em lâminas de silício monocristalino Cz, antes e depois das difusões de fósforo em forno de RTP. Para 950 °C, a medida do tempo de vida depois do processamento (1 min de *plateau*) sem presença de fósforo indica a alta contaminação existente no ambiente do forno [1,4].

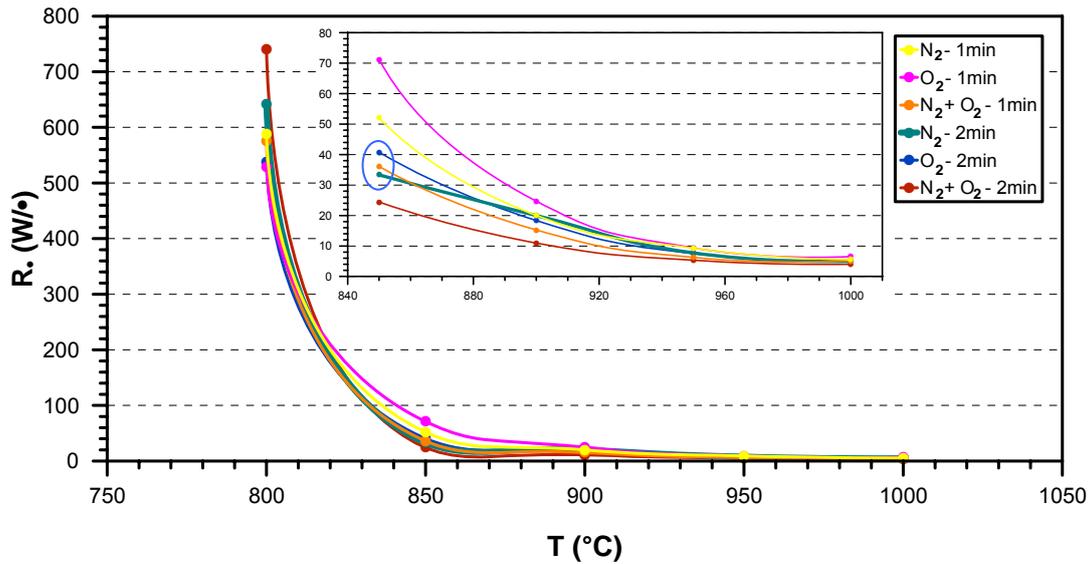


Figura 4.21. Valores médios de resistência de folha de regiões  $n^+$  obtidas por *spin-on* e processamento térmico rápido, a escala da resistência de folha de até  $80 \Omega/\square$  está ampliada no gráfico menor. [6].

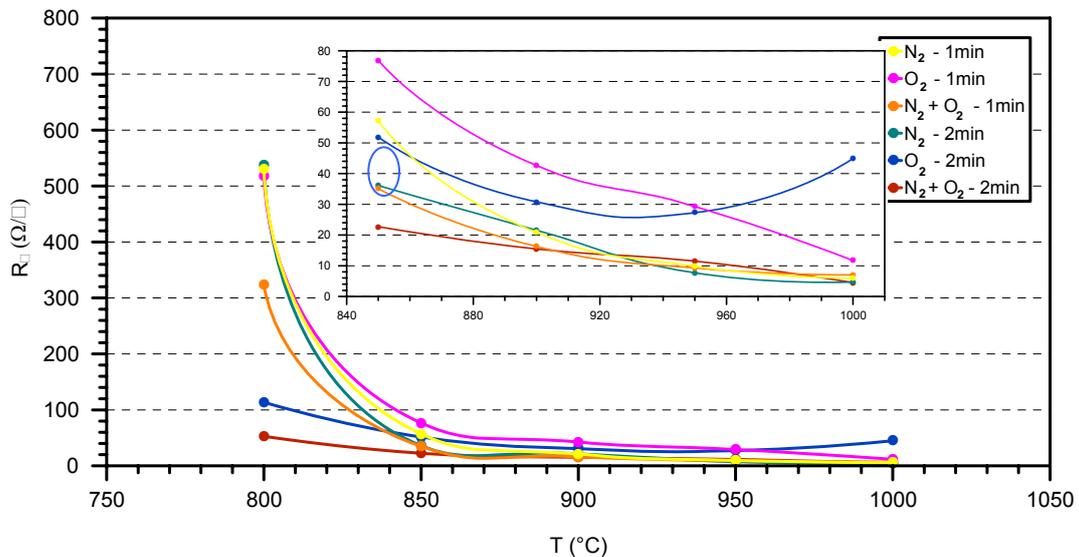


Figura 4.22. Valores médios de resistência de folha de regiões  $p^+$  obtidas por *spin-on* e processamento térmico rápido, a escala da resistência de folha de até  $80 \Omega/\square$  está ampliada no gráfico menor [6].

No caso da difusão de fósforo, a partir de  $900 \text{ }^\circ\text{C}$  a utilização de diferentes gases durante o processamento não mostrou ser um fator relevante, sendo os resultados praticamente os mesmos. Já na difusão de boro, os diferentes gases conduzem a resultados não tão próximos, sendo um fator decisivo na resistência de folha final da região  $p^+$ .

## 4.4. Difusão em Forno de Esteira

### 4.4.1. Característica do Forno e do Perfil de Dopagem

Uma das formas de introduzir o processamento térmico rápido em linhas de produção é por meio do uso de fornos de esteira. A Figura 4.23 apresenta um diagrama deste tipo de forno. Estes são providos de lâmpadas cuja emissão de luz situa-se no infravermelho e no visível. Essas lâmpadas são agrupadas por zonas controladas de maneira independente, tendo normalmente de três a cinco zonas diferentes, dependendo das dimensões do forno. Normalmente o forno de esteira é utilizado para a queima de pastas de metalização onde em um único passo térmico é possível realizar o recozimento dos ligantes, seguido da fusão dos vidros e da sinterização dos demais componentes, processo que se inicia em 600 °C. É preciso neste tipo de forno estabelecer um fluxo de ar criando uma atmosfera adequada para a queima das pastas de metalização [6].

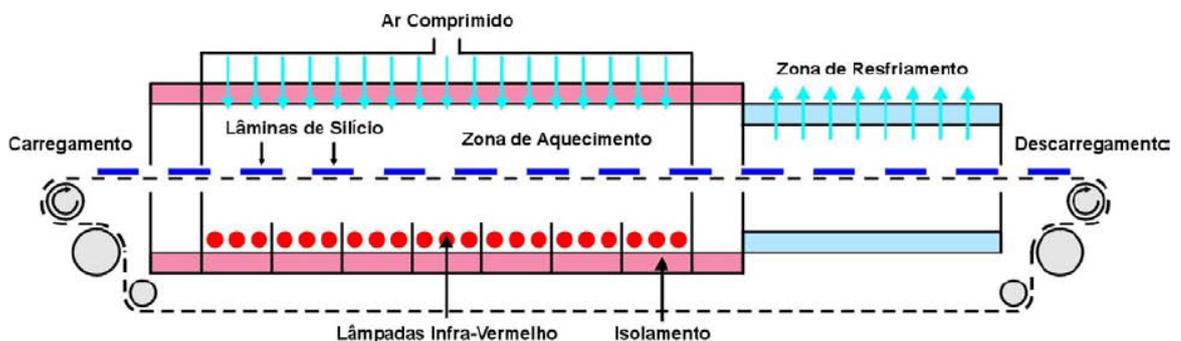


Figura 4.23. Diagrama de um forno de esteira com lâmpadas infravermelhas [6]

Em um forno convencional, principalmente fótons de radiação infravermelha estão presentes. No forno de processamento térmico rápido e de esteira as amostras são submetidas a radiação infravermelha e visível. No entanto, no forno de esteira a proporção de visível frente a infravermelho não é tão elevada quando nos sistemas RTP porque as lâmpadas operam em temperaturas mais baixas, pois o ambiente de processamento é isolado com cerâmicas e deste modo, as lâminas também são aquecidas por condução e convecção.

O forno de esteira pode ser utilizado para difusão de dopantes e suas principais vantagens focam-se no reduzido tempo de processamento, facilidade de automação do processo de carga e descarga das lâminas e obtenção de perfis de dopantes compatíveis com a metalização serigráfica. Segundo Goris e colaboradores [22], utilizando um forno de esteira o tempo de difusão pode ser reduzido em 50% para temperatura de 935 °C e em 25 % para 920 °C, quando comparado com difusões realizadas em fornos convencionais para obtenção de regiões  $n^+$  com resistências de folha típicas para metalização por serigrafia. Um dos problemas do uso deste tipo de forno é a possível contaminação pela esteira a altas temperaturas, que geralmente é fabricada com ligas metálicas resistentes.

A Figura 4.24 apresenta os gráficos de variação da resistência de folha da região  $n^+$  em função de diferentes condições de processamento em forno de esteira com lâmpadas infravermelhas e forno de esteira com resistências, denominado pelos autores do artigo como “convencional” [22]. Neste trabalho, o dopante tipo n utilizado estava na forma de pasta. Pode-se verificar que é possível obter resistências de folha de 40  $\Omega/\square$ - 50  $\Omega/\square$  com tempos de difusão da ordem de 1,2 min a 2 min, segundo a temperatura de processamento. Para as mesmas condições de tempo e temperatura, os autores estimaram a espessura da camada morta por meio da medida da mobilidade, verificando que esta camada é reduzida segundo se aumenta a resistência de folha da região  $n^+$  como mostra a Figura 4.25. Além disto, observaram que não há uma relação direta entre temperatura e espessura da camada morta.

Em outro trabalho de Goris et al [23], foi realizada uma comparação entre dopagem com fornos de esteira com dopante em pasta e com fornos convencionais e  $\text{POCl}_3$  como dopante. Eles constataram que é possível obter perfis de dopantes similares com ambos os processos. Simularam células com os perfis experimentais de impurezas e observaram que as eficiências das células solares seriam similares para diversas condições de passivação de superfícies. Realizaram medidas de tempo de vida dos portadores minoritários e observaram que os resultados da comparação entre dopagem em forno de esteira ou em convencional com  $\text{POCl}_3$  dependem da qualidade das lâminas. Por exemplo, para lâminas da parte superior e central do lingote, deste modo, de maior qualidade, as difusões por ambos os

métodos resultam em tempos de vida similares. Por outro lado, para lâminas da base do lingote, ou seja, as que geralmente possuem a maior quantidade de impurezas, o processamento em fornos de esteira foi o que produziu os melhores resultados para o tempo de vida dos portadores minoritários.

Na Figura 4.26 são apresentados os perfis de fósforo obtidos por difusões em fornos convencionais (CFP), de processamento térmico rápido e em fornos de esteira (*belt furnace*, BLP). Para os três casos, o dopante de fósforo foi depositado por *spin-on* e a temperatura de processo foi de 880 °C para tempos de 30 min (CFP), 6 min (BLP) e 3 min (RTP), tempos necessários para obter regiões  $n^+$  de  $40 \Omega/\square$ . Como era esperado, o perfil de impurezas obtido com o forno de esteira produziu regiões  $n^+$  de profundidade intermediária entre as três técnicas de difusão.

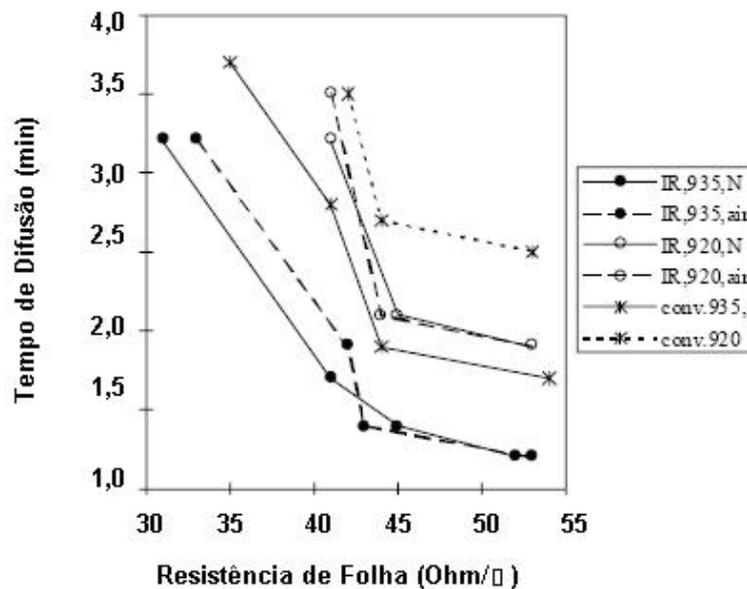


Figura 4.24. Resistência de folha em função dos parâmetros de processo de difusão [20].

#### 4.4.2. Resultados de Células Solares com Difusão em Forno de Esteira

A Tabela 4.1 apresenta dados experimentais obtidos por Ebong et al. [24] para células solares monofaciais de diferentes substratos e fabricados com diferentes técnicas de difusão de metalização. Dentre estes dados, pode-se destacar que: substratos de silício obtido por fusão zonal flutuante (FZ) de emissores com  $80 \Omega/\square$  formados rapidamente em 3 minutos em um sistema RTP podem produzir

células 19,0 % de eficiência em dispositivos simples sem texturação, e com metalização por fotolitografia e evaporação de metais. Para lâminas obtidas por Si-Cz a eficiência cai em torno de 2,0 % por causa do menor valor do tempo de vida dos portadores minoritários em volume.

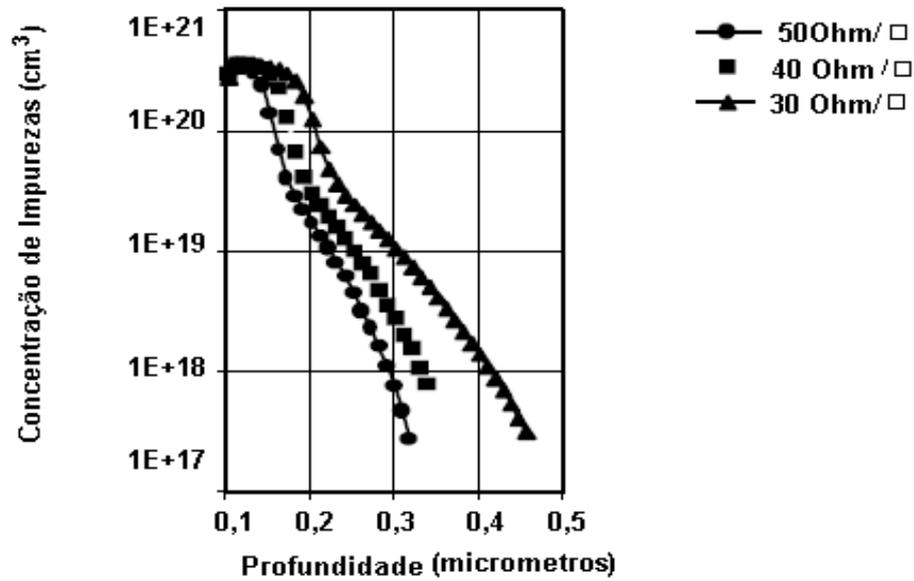


Figura 4.25. Perfis de fósforo para diferentes processos de difusão com forno de esteira [20].

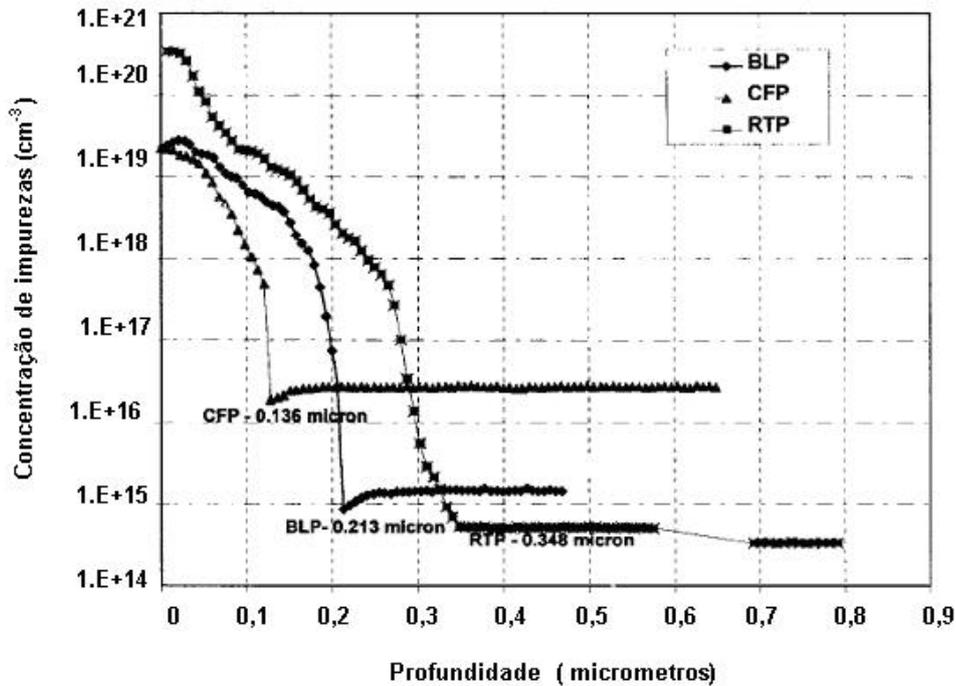


Figura 4.26. Comparação entre perfis de fósforo obtidos com forno convencional (CFP), forno de esteira (BLP) e forno de processamento térmico rápido (RTP) difundido. O fósforo foi depositado por *spin-on* [20].

No caso de fornos de esteira, foi possível obter o mesmo valor de eficiência para lâminas FZ e 0,6 % absolutos acima das células fabricadas em fornos RTP. Também é importante destacar que neste trabalho, com forno de esteira e metalização serigráfica, foram obtidos células solares em lâminas FZ com eficiência de 17%. Em resumo, os fornos de esteira podem produzir regiões  $n^+$  e células solares de igual qualidade que as obtidas com fornos convencionais ou RTP.

Tabela 4.1. Resultados experimentais de células solares processadas por diferentes técnicas de difusão, onde  $V_{oc}$  é a tensão de circuito aberto,  $J_{sc}$  é a densidade de corrente de curto circuito, FF é o fator de forma e  $\eta$  é a eficiência [24].

Célula	$V_{oc}$ (mV)	$J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	FF (%)	$\eta$ (%)
BFP-PL-FZ	636	37,3	80,2	19,0
RTP-PL-FZ	641	36,2	81,9	19,0
CFP-PL-FZ	634	37,1	80,5	18,9
BFP-SP-FZ	629	34,9	77,4	17,0
BFP-PL Cz (boro)	610	36,1	79,5	17,5
RTP-PL Cz (boro)	608	35,1	79,0	16,9
BFP-MCz-PL	636	35,6	81,3	18,4

BFP-PL-FZ: Processamento em forno por esteira – fotolitografia – silício FZ

RTP-PL-FZ: Processamento térmico rápido – fotolitografia – silício FZ

CFP-PL-FZ: Processamento em forno convencional – fotolitografia – silício FZ

BFP-SP-FZ: Processamento em forno por esteira – serigrafia – silício FZ

BFP-PL Cz (boro): Processamento em forno por esteira – fotolitografia–silício Cz

RTP-PL Cz (boro): Processamento térmico rápido – fotolitografia – silício Cz

BFP-MCz-PL: Processamento em forno por esteira fotolitografia – silício Cz magnético

Utilizando silício multicristalino (Si- MC), Goris e colaboradores [22-23] fabricaram células solares utilizando ar e nitrogênio bem como compararam os resultados com células fabricadas com fornos de esteira aquecidos com resistências elétricas e com fornos convencionais com  $POCl_3$ . Para os processos com forno de esteira, uma pasta contendo fósforo foi depositada sobre a lâmina de silício. As Tabelas 4.2 e 4.3 apresentam os resultados.

Dos valores apresentados na Tabela 4.2, os autores concluíram que os fornos de infravermelho produzem células de eficiência similar aos de resistência e o mais

importante, que em vez de nitrogênio pode ser usado ar (*clean dry air*, CDA) no processamento das células solares.

Tabela 4.2. Características elétricas de células processadas em fornos de esteira com aquecimento por lâmpadas de infravermelho (IR) e por resistências onde  $V_{oc}$  é a tensão de circuito aberto,  $J_{sc}$  é a densidade de corrente de curto-circuito, FF é o fator de forma e  $\eta$  é a eficiência [22].

Tipo de aquecimento/gás/ Temperatura	$I_{sc}$ (A)	$V_{oc}$ (mV)	FF (%)	$\eta$ (%)
IR, N <sub>2</sub> , 935°C	3,16	607	74	14,2
IR, N <sub>2</sub> , 920°C	3,14	606	74	14,0
Resistência, N <sub>2</sub> , 935°C	3,14	606	75	14,2
Resistência, N <sub>2</sub> , 920 °C	3,13	607	75	14,4
IR, ar, 935°C	3,12	604	74	14,0
IR, ar, 920°C	3,17	607	72	13,8

Tabela 4.3. Características elétricas de células com região n<sup>+</sup> obtidas por difusão convencional com POCl<sub>3</sub> e por difusão em forno de esteira (IR) [23].

Difusão	Qualidade do substrato	$I_{sc}$ (A)	$V_{oc}$ (mV)	FF (%)	$\eta$ (%)
IR	Alta	3,065	606	77,9	14,4
POCl <sub>3</sub>	Alta	3,139	615	78,5	15,2
IR	Baixa	2,855	588	78,3	13,2
POCl <sub>3</sub>	Baixa	2,258	551	76,9	9,6

Na comparação entre os dois diferentes processos de difusão os autores observaram, uma dependência com a qualidade do substrato. É interessante notar que a difusão convencional com POCl<sub>3</sub> resultou em melhores células solares que as obtidas por difusão em forno de esteira quando o substrato de Si-Mc é de maior qualidade. No entanto, este último tipo de difusão foi eficaz para os substratos de menor qualidade. Os autores não esclareceram este tema, mas normalmente tais efeitos estão relacionados a mecanismos de *gettering* e sua relação com temperatura e rampas de temperaturas.

## 4.5. Campo Retrodifusor Formado por Alumínio

### 4.5.1. Característica do Campo Retrodifusor

O BSF (*Back Surface Field*) também denominado de campo retrodifusor tem como função diminuir a recombinação dos portadores minoritários na região no contato posterior da célula solar. Pode-se conseguir este efeito por meio de uma difusão de alumínio ou boro em lâminas de silício tipo p, que forma um campo elétrico que repele parcialmente os portadores minoritários que se aproximam da região posterior e reduz a recombinação. As células com BSF apresentam tensão elétrica superior as células sem BSF, aumentando assim a eficiência da célula solar [15], [25- 26].

Com a face posterior de uma célula solar completamente coberta de metal, pode se ter uma superfície com alta velocidade de recombinação, devido ao contato metal-semicondutor [25].

Em células com estrutura  $n^+pp^+$ , que é o caso de uma célula solar com fósforo na parte frontal e alumínio na parte posterior, a criação de uma região  $p^+$  altamente dopada na região posterior da célula solar forma o campo retrodifusor. Devido ao campo elétrico criado, menos portadores de carga minoritários irão se recombinar na superfície posterior [15], [25].

O campo retrodifusor com alumínio depende de alguns parâmetros:

- da concentração superficial na dopagem da região  $p^+$  assim como seu perfil de concentração e profundidade;
- da recombinação na própria camada  $p^+$ ;
- da relação entre o comprimento de difusão do portador e a espessura da lâmina de Si [15].

Para um bom contato ôhmico é requerida alta dopagem na região  $p^+$  embaixo dos contatos metálicos, que também funciona como um BSF local. Neste caso, a taxa efetiva de recombinação em superfície que é composta da recombinação de

portadores de carga na interface Si-SiO<sub>2</sub> entre as trilhas metálicas e uma pequena porcentagem relativa à área de metal com alta recombinação. Camadas de SiO<sub>2</sub> são utilizadas para passivação da superfície das células solares [15], [25].

O BSF de Al pode ser formado a partir de quatro passos [27- 30]:

- deposição de alumínio;
- formação da liga de Al-Si em temperatura acima do ponto eutético do alumínio que é de 577 °C;
- resfriamento e crescimento epitaxial na região p<sup>+</sup> BSF,
- solidificação final na temperatura do ponto eutético.;

Em geral, a opacidade do BSF pode ser melhorada aumentando a profundidade de junção e/ ou a dopagem [27]-[30]. Analisando o diagrama de fase do Al- Si para o estudo de um BSF-Al devemos levar em consideração:

- a profundidade de junção é aumentada por camadas mais grossas de alumínio depositado sobre o substrato antes da liga;
- o nível de dopagem é aumentado elevando-se a temperatura [30];

Porém, outro aspecto crítico deve ser considerado na formação do BSF de Al, a uniformidade da junção.

A uniformidade da região de BSF-Al é controlada pela rampa de aquecimento para atingir a temperatura de difusão. Em condições de rampas lentas, a liga entre Al e Si pode ocorrer em certos locais, que conduz a não-uniformidades da região de BSF de Al. Esta não-uniformidade pode incluir variações em profundidade da junção, aumento da velocidade de recombinação em superfície e a não-formação planar da junção. A temperatura típica para este tipo de processo é de 800 °C e a camada de alumínio é difundida e penetra em toda a superfície da lâmina [28].

#### 4.5.2. Deposição de Alumínio

A deposição de alumínio para formar a região de BSF pode ser realizada por pastas de serigrafia, pela técnica de *spin-on* e por evaporação em vácuo.

A utilização de serigrafia para deposição de alumínio na parte posterior da célula solar a fim de formar o campo retrodifusor está sendo muito utilizado nos últimos tempos devido ao custo e a rapidez do processo. A deposição do alumínio com a finalidade de formar um BSF por serigrafia é realizada no fim do processo pela impressão de uma pasta de alumínio na superfície posterior da lâmina, seguida da difusão em fornos de esteira para se obter a região  $p^+$  de alumínio.

Na técnica de *spin-on*, soluções líquidas de alumínio são depositadas sobre a lâmina de silício. O processo consiste em depositar uma pequena quantidade de solução líquida do dopante no centro do substrato. O substrato é sucessivamente colocado em altas rotações, espalhando uniformemente sobre a lâmina e criando um filme fino na superfície. A espessura final do filme e outras propriedades dependem de algumas informações do dopante a ser depositado, como a viscosidade do dopante e dos parâmetros escolhidos para o processo de rotação, tais como aceleração, velocidade angular, entre outros [31].

A vantagem de utilizar o *spin-on* está relacionada com o baixo custo.

A técnica mais usada para deposição do alumínio é a deposição por PVD (*Physical Vapour Deposition*). A deposição física de vapor é muito usada no processo de fabricação de células solares de alta eficiência porque gera uma deposição de alumínio de alta qualidade [32].

Este processo é realizado em uma câmara em alto vácuo onde o aquecimento de uma fonte de metal forma um vapor deste material que é depositado no substrato. Durante a deposição, para que a taxa de vapor seja significativa, o vácuo existente na câmara é menor que 10 militorr. Com este nível de vácuo, o vapor do metal não sofre colisão com partículas do gás residual dentro da câmara, podendo percorrer livremente o caminho entre a fonte metálica e o substrato [32].

Normalmente, as evaporadoras possuem um sistema de monitoração da espessura do filme durante o processo. A uniformidade da espessura é obtida distribuindo-se as lâminas em um suporte tipo sistema planetário que, durante a evaporação, gira em torno do eixo vertical da câmara de processo enquanto que os vários suportes giram em torno de um eixo secundário [2].

A evaporação do metal pode ser realizada de três maneiras: por aquecimento resistivo, aquecimento indutivo ou bombardeamento de feixe de elétrons.

A técnica utilizada nesta dissertação foi o bombardeamento com feixe de elétrons. Neste processo, um feixe de elétrons de alta energia (5 keV a 30 keV) bombardeia o material a ser evaporado, aquecendo o material fonte, que está localizado em um cadinho resfriado, a uma temperatura na qual a sua pressão de vapor seja bastante alta de forma que partículas difundam da fonte para o restante do recipiente onde se encontram confinados os substratos. Esta temperatura de evaporação é bastante reduzida pelo fato do sistema estar em uma pressão bem menor do que a atmosférica, geralmente em torno de  $10^{-4}$  Pa a  $10^{-5}$  Pa. Existe, então, um fluxo de material da fonte em direção aos substratos. É importante que a concentração do gás residual no interior da câmara de deposição seja suficientemente baixa de modo que o livre caminho médio das partículas na pressão do sistema seja muito maior que a distância fonte-substrato. A energia cinética aumenta com a temperatura e, desta forma, a evaporação ocorre com a perda de energia interna do material, sendo suprida continuamente pelo sistema de deposição. Ao encontrar a superfície do substrato com uma temperatura mais baixa, as partículas, desde que haja coeficiente de adesão não-nulo, condensarão e formarão o filme. Em todos os casos é necessário um bom sistema de vácuo que garanta a pureza do material depositado [33].

#### **4.5.3. Resultados de Células Solares com Campo Retrodifusor**

Conforme Meemongkolkiat et al. [29], foi realizado um estudo sobre fatores que limitam a formação uniforme da deposição do alumínio por serigrafia. Este artigo mostra que existe uma temperatura crítica para cada espessura de Al depositado por

serigrafia. Após uma determinada temperatura a camada começa a se degradar devido a uma não uniformidade ocorrendo assim uma aglomeração do Al-Si. Esta temperatura crítica diminui com o aumento da espessura do alumínio.

Para examinar o efeito da não uniformidade do BSF causado pela aglomeração do Al- Si fundido foram fabricadas células com lâminas de 300  $\mu\text{m}$  de espessura, 1,3  $\Omega\text{m}$ , tipo p FZ, com várias combinações de temperatura em forno de RTP. A região  $n^+$  foi obtida por difusão de  $\text{POCl}_3$  a temperatura de 880  $^\circ\text{C}$  e o alumínio foi depositado por serigrafia com diferentes espessuras.

Os autores verificaram que existe uma temperatura crítica para a formação liga de alumínio-silício com Al depositado por serigrafia que acima da qual o BSF-Al é não uniforme e a célula solar começa a degradar, como mostra a Figura 4.27, por meio do  $V_{oc}$ .

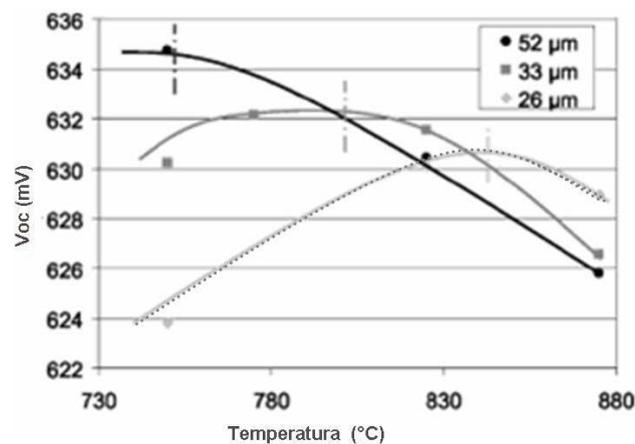


Figura 4.27. Voc das células solares em função da temperatura para três espessuras diferentes do Al.

Na Figura 4.28 é possível verificar a variação da temperatura crítica em função da espessura.

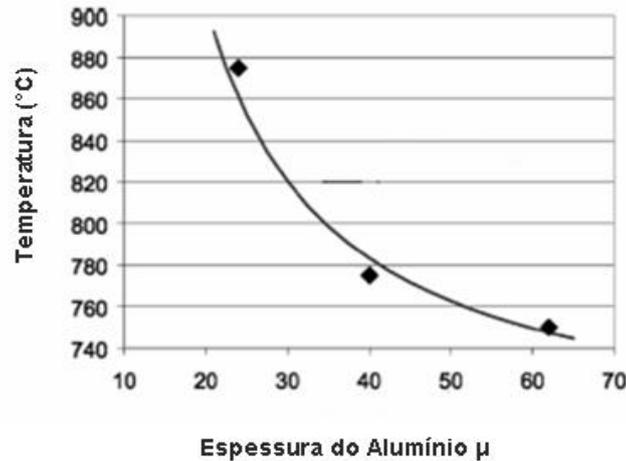


Figura 4.28. Temperatura crítica para cada espessura da camada de alumínio.

Narasimha e Rohatgi [30] analisaram alguns parâmetros importantes para a célula solar como o efeito das temperaturas (rampas de subida e descida) e o efeito da espessura de alumínio. Verificaram que a uniformidade de um Al-BSF é controlada pela taxa da rampa usada para alcançar a temperatura de liga.

Os autores [30] Si-FZ, selecionadas da mesma região do lingote. A pasta que usaram foi Alumínio FX-53038 da empresa *Ferro Corporation*, a tela foi de 128 fios/cm e o diâmetro do fio de  $2,3 \times 10^{-4}$  cm e a espessura da emulsão de  $2,5 \times 10^{-3}$  cm. Foi depositado  $4,10 \text{ mg/cm}^2$  de Al que corresponde a espessura eficaz de 15 μm.

Um problema da utilização de pasta de Al e deposição por serigrafia é contaminação das lâminas durante a formação da liga em alta temperatura. Conforme a Figura 4.29 é possível perceber que ocorre a degradação em temperaturas acima 850 °C, reduzindo a tensão de circuito aberto das células solares.

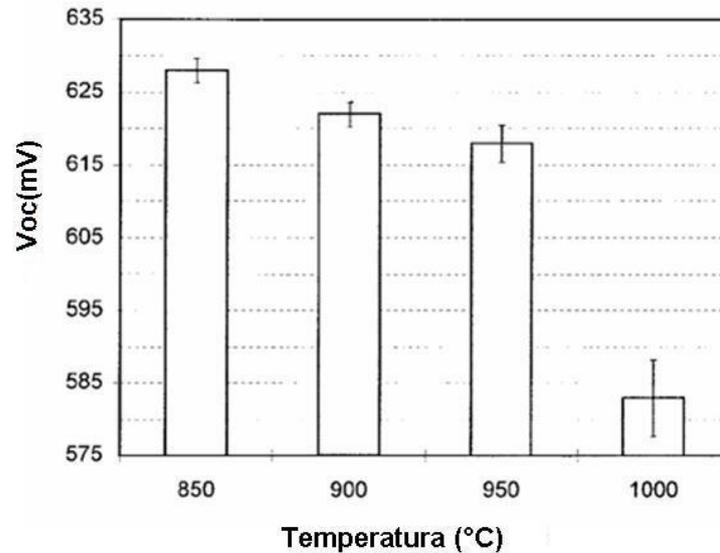


Figura 4.29. Degradação célula solar degradada em temperaturas acima de 850 °C.

No processo da deposição de alumínio por serigrafia foram realizadas difusões em forno de esteira em três ciclos diferentes com uma velocidade 38 cm/min para manter o processo por 2 min. O primeiro ciclo possui a temperatura de 425 °C na zona 1 730 °C na zona 3. O segundo, com temperatura de 550 °C na zona 1, 850 °C na zona 3 e o terceiro ciclo com todas as zonas com a mesma temperatura de 850 °C. O ciclo 1 representa um processo típico para queima dos contatos na região frontal. Nesta análise foi realizada a difusão simultaneamente de Al na região posterior e a queima da pasta de Ag na face frontal. O ciclo 2 é uma variação de ciclo 1 em que a temperatura até 850 °C é mais apropriada para o BSF de Al depositado por serigrafia. O ciclo 3 simula um processo próximo a com a rampa rápida típica de RTP. Na Figura 4.30 é apresentado uma comparação do efeito de todos os ciclos utilizando o forno de esteira e o RTP.

A análise das regiões ótimas do BSF- Al foi estabelecida pela modelagem teórica e os resultados experimentais. Os cálculos teóricos indicam que a velocidade de recombinação em superfície na região de BSF é melhorada aumentando a espessura de 1  $\mu\text{m}$  a 10  $\mu\text{m}$ .

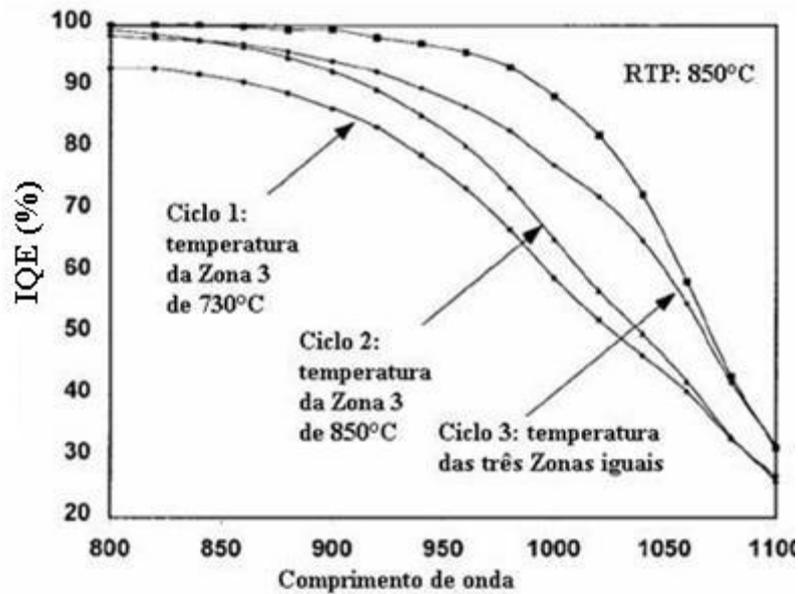


Figura 4.30. Mostra uma curva de comprimento de onda por eficiência quântica interna (IQE)

A análise dos resultados experimentais mostrou que há uniformidade quando rampas rápidas de RTP são usadas. A combinação de filme de alumínio espessos depositados e rampas rápidas em fornos RTP por serigrafia até 850 °C, resulta em velocidade de recombinação em superfície do BSF tão baixo como 200 cm/s. Integrando a deposição de Al por serigrafia a difusão em forno RTP em um processo de fabricação em laboratório foi possível alcançar eficiências de 19 %-20 %. A mesma etapa de BSF aplicado a um processo industrial de fabricação de células solares resultou em eficiências de 17 % com filme AR de nitreto de Si.

O processo de BSF-Al implementado em um forno de esteira é um pouco menos efetivo que o processo em RTP.

## **5. DESENVOLVIMENTO DE CÉLULAS SOLARES COM CAMPO RETRODIFUSOR DE ALUMÍNIO EM FORNO DE ESTEIRA**

### **5.1. Desenvolvimento e Caracterização de Células Solares com Difusão de Alumínio e Queima de Pastas Metálicas Simultaneamente**

#### **5.1.1. Metodologia**

Desenvolveu-se um processo para verificar a eficácia da região de BSF obtida com difusão de Al depositado por evaporação simultaneamente à queima de pasta metálica.

A Figura 5.1 mostra um diagrama do processo utilizado para fabricação das células solares em substrato de Si-Cz, tipo p, orientação  $\langle 100 \rangle$  resistividade de base entre 7  $\Omega$ .cm e 13  $\Omega$ .cm, espessura da lâmina de 300  $\mu$ m, 100 mm de diâmetro e sem textura superficial.

No primeiro momento foi realizada a textura das superfícies das lâminas de silício. Esta textura é obtida por meio de um ataque químico preferencial, baseado em solução com KOH. A refletância média da superfície texturada por meio do processo padrão desenvolvido no NT-Solar/ CB-Solar é de 12 %.

A seguir foi realizada a limpeza química das lâminas de Si-Cz com RCA2 e as lâminas foram oxidadas. As lâminas para serem oxidadas a 1000 °C foram submetidas a uma limpeza de RCA1(NH<sub>4</sub>OH: H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>: H<sub>2</sub>O) e RCA2 (HCl: H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>: H<sub>2</sub>O).

A oxidação tem o objetivo de passivar a superfície e de proteger as lâminas.

No processo desenvolvido a oxidação também é utilizada para a proteção em relação a difusão de uma das faces da lâmina de silício.

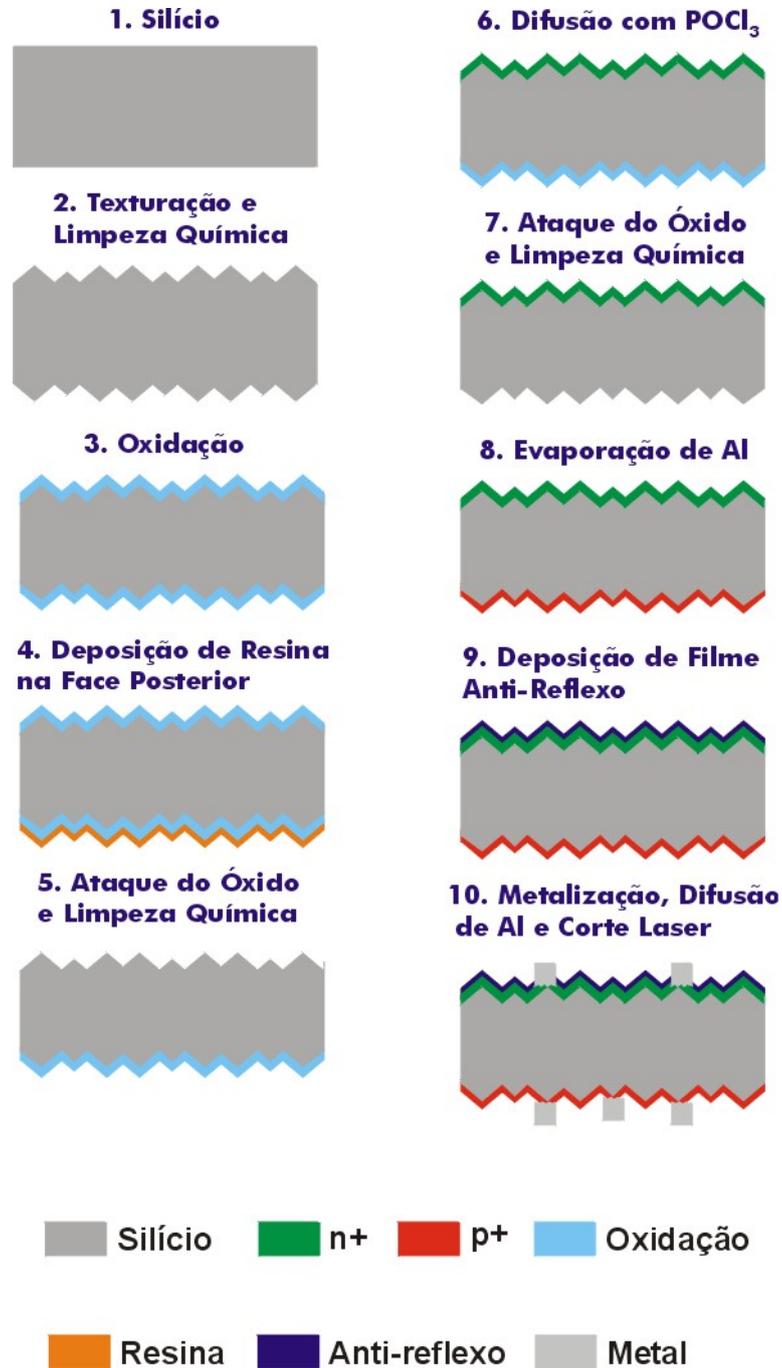


Figura 5.1. Diagrama do processo da fabricação de células solares com difusão de Al evaporado no forno de esteira e queima das pastas metálicas simultaneamente.

Após a oxidação, deposita-se por centrifugação (*spin-on*) uma resina fotossensível na face posterior da lâmina utilizando-se o equipamento denominado de *spinner*, ilustrado na Figura 5.2. Depois de secar a resina em uma estufa, as

lâminas são imersas em HF tampão (HF:  $\text{NH}_4\text{F}$ ) para extração do óxido de silício da face frontal e em seguida são imersas em  $\text{H}_2\text{O}$ , acetona, propanol e  $\text{H}_2\text{O}$  para retirada da resina. Deste modo uma das faces da lâmina ficará protegida durante a difusão de fósforo subsequente. Finalmente, as lâminas são submetidas a uma limpeza em RCA1 e RCA2 para realizar a difusão de fósforo.



Figura 5.2. *Spinner* utilizado para deposição de filmes dopantes.

O objetivo da difusão é introduzir a impureza desejada em quantidade controlada e formar a junção pn (em lâminas tipo p) e desta forma, modificar as propriedades elétricas do material semiconductor.

Foi utilizado para dopagem da região  $n^+$  o  $\text{POCl}_3$ , o qual é um líquido ultrapuro mantido em um borbulhador de quartzo. As lâminas são cuidadosamente colocadas em um porta-lâminas de quartzo para serem introduzidas no forno de difusão. O forno utilizado neste trabalho é da marca *Tystar* com um diâmetro do tubo de quartzo de 201 mm e comprimento de 960,2 mm.

As temperaturas de difusão de fósforo utilizadas neste processo foram de 875 °C e de 900°C típica de laboratório. O porta-lâminas é introduzido no tubo por meio de uma haste de carregamento. Na Figura 5.3 é possível visualizar as lâminas sendo introduzidas no forno para a difusão.

Após a difusão, as lâminas são retiradas do forno e submetidas à limpeza em HF e RCA2 e são levadas para a evaporadora com a finalidade de depositar alumínio.



Figura 5.3. Forno utilizado para difusão de fósforo.

Foram evaporados 2  $\mu\text{m}$  de alumínio e depois um filme anti-reflexo. Na Figura 5.4 mostra-se a refletância em função do comprimento de onda para lâminas processadas sem óxido e com filme AR de espessura de 62 nm de  $\text{TiO}_2$ . Nota-se que o comprimento de onda correspondente a refletância mínima ( $\lambda_{\text{mim}}$ ) antes da queima é de 580 nm e após a queima o  $\lambda_{\text{mim}}$  é de 545 nm, ocorrendo um deslocamento na direção de maiores comprimentos de onda. A refletância média entre o comprimento de onda de 400 nm a 1050 nm é de 2,4 % e 2,9 %, antes e depois da queima, respectivamente.

Após os dois processos de evaporação, é realizada a metalização por serigrafia.

O forno utilizado para realizar simultaneamente a difusão do alumínio e a metalização é o forno de esteira da marca RTC modelo LA-309, com três zonas com controle independente de temperatura.

Para a metalização por serigrafia foi depositada pasta de alumínio e prata; (PV-202, Du Pont) na face posterior e depois as lâminas foram levadas ao forno para secagem da pasta.

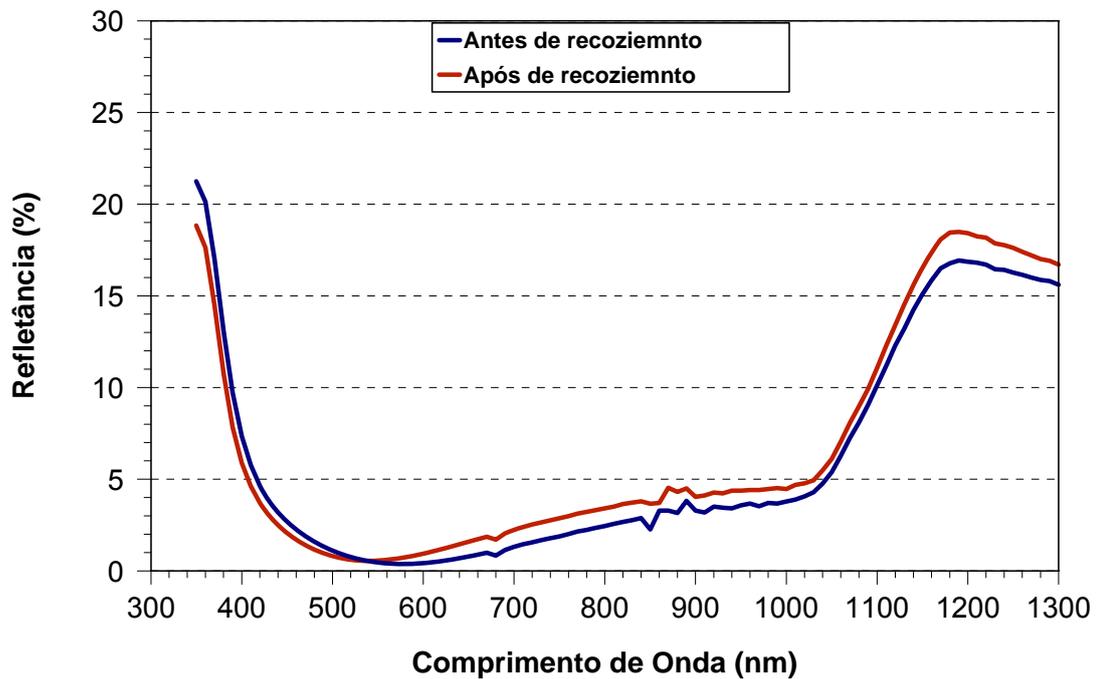


Figura 5.4. Curva de refletância em função do comprimento de onda para filme Ar de  $\text{TiO}_2$  espessura de 62 nm.

Na face frontal foi depositada e secada a pasta de prata (PV 156, Du Pont). Logo após as lâminas retornaram ao forno para a queima das pastas e difusão de alumínio, na temperatura entre 860 °C a 960 °C, com a finalidade de estabelecer o contato elétrico com o silício e implementar o BSF. Então, neste processo realiza-se a queima das pastas de metalização e a difusão de Al simultaneamente, com velocidade da esteira de 180 cm/min. Por fim as células solares são processadas no sistema laser para cortá-las em pseudo-quadrado de 80 mm x 80 mm.

Após a fabricação, são medidas as curvas I-V das células solares de 62 cm<sup>2</sup> no sistema de caracterização elétrica do NT-Solar.

### 5.1.2. Difusão de Fósforo a 900°C

Nesta etapa, o objetivo foi implementar a difusão de fósforo com  $\text{POCl}_3$  a 900 °C e otimizar experimentalmente a queima das pastas de metalização e a difusão de Al simultaneamente. A resistência de folha ( $R_{\square}$ ) média obtida com a difusão a 900 °C foi de 30  $\Omega/\square$ .

O objetivo da queima e difusão de Al simultaneamente no forno de esteira é reduzir passos do processo de fabricação de células solares e consequentemente, reduzir o custo dos dispositivos. Para otimizar este processo a temperatura de queima e difusão de alumínio foi variada de 860 °C a 900 °C.

Na Tabela 5.1 apresenta-se a tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ), densidade de corrente elétrica de curto-circuito ( $J_{sc}$ ), fator de forma (FF) e eficiência ( $\eta$ ) em função da temperatura de queima das pastas de metalização e difusão de alumínio simultaneamente ( $T_{Q-D}$ ).

Verifica-se que neste processo onde a difusão de fósforo foi a 900 °C, os melhores resultados ocorreram para as temperaturas de queima e difusão de Al simultaneamente de 930 °C e de 960 °C, com eficiência média das células solares de 12,8 %. Para a  $T_{Q-D}$  de 960 °C o FF e a  $J_{sc}$  são ligeiramente maiores que a 900 °C. A máxima eficiência de 13,3 % é alcançada para  $T_{Q-D}$  = 930 °C, na qual mediu-se a maior de  $J_{sc}$  de 31,2 mA/cm<sup>2</sup>.

O maior valor médio de  $\eta$  e de FF ocorreram para  $T_{Q-D}$  de 960 °C. No entanto, o maior valor médio da  $J_{sc}$  é de 30,8 mA/cm<sup>2</sup> e foi encontrado para  $T_{Q-D}$  = 930 °C. Também verificou-se que os maiores valores médios da  $V_{oc}$  ocorreram para a  $T_{Q-D}$  = 860 °C e 940 °C.

### 5.1.3. Difusão de Fósforo a 875 °C

O objetivo desta etapa foi difundir fósforo na temperatura de 875 °C e então implementar a queima das pastas de metalização e a difusão do alumínio

Tabela 5.1. Tensão de circuito aberto (Voc), densidade de corrente elétrica de curto-circuito (Jsc), fator de forma (FF) e eficiência ( $\eta$ ) em função da temperatura de queima das pastas de metalização e difusão de alumínio ( $T_{Q-D}$ ) para processo com temperatura de difusão de fósforo de 900°C.

$T_{Q-D}$ (°C)	Célula	Voc (mV)	Jsc (mA/cm <sup>2</sup> )	FF	$\eta$ (%)
860	27/08-L1	551	30,5	0,634	10,68
	27/08-L2	550	30,2	0,669	11,10
	27/08-L3	567	29,9	0,602	10,21
	<b>Média</b>	<b>556 ± 10</b>	<b>30,2 ± 0,3</b>	<b>0,63 ± 0,03</b>	<b>10,77 ± 0,4</b>
$T_{Q-D}$ (°C)	Célula	Voc (mV)	Jsc (mA/cm <sup>2</sup> )	FF	$\eta$ (%)
880	18/08-L2	545	30,2	0,653	10,75
	18/08-L3	544	29,5	0,748	12,00
	18/08-L4	549	30,5	0,695	11,62
	<b>Média</b>	<b>546 ± 2</b>	<b>30,1 ± 0,5</b>	<b>0,699 ± 0,04</b>	<b>11,46 ± 0,64</b>
900	18/08-L5	548	29,3	0,770	12,38
	18/08-L5	546	29,7	0,763	12,41
	18/08-L7	545	29,8	0,756	12,27
	<b>Média</b>	<b>546 ± 2</b>	<b>29,63 ± 0,24</b>	<b>0,763 ± 0,007</b>	<b>12,35 ± 0,07</b>
920	18/08-L8	544	29,8	0,758	12,31
	18/08-L9	549	30,5	0,765	12,80
	18/08-L10	544	30,3	0,764	12,60
	<b>Média</b>	<b>546 ± 3</b>	<b>30,1 ± 0,3</b>	<b>0,762 ± 0,004</b>	<b>12,57 ± 0,25</b>
930	08/09-L1	544	30,8	0,744	12,5
	08/09-L2	554	31,2	0,770	13,3
	08/09-L4	548	30,5	0,761	12,7
	<b>Média</b>	<b>549 ± 5</b>	<b>30,8 ± 0,3</b>	<b>0,758 ± 0,014</b>	<b>12,8 ± 0,4</b>
940	27/08-L4	569	29,9	0,761	12,9
	27/08-L5	566	28,4	0,777	12,5
	08/09-L5	548	30,8	0,749	12,7
	08/09-L6	547	30,8	0,748	12,6
	08/09-L7	549	30,8	0,763	12,9
	08/09-L8	547	30,7	0,760	12,8
	<b>Média</b>	<b>555 ± 10</b>	<b>30 ± 1</b>	<b>0,760 ± 0,011</b>	<b>12,74 ± 0,16</b>

$T_{Q-D}$ (°C)	Célula	Voc (mV)	Jsc (mA/cm <sup>2</sup> )	FF	$\eta$ (%)
950	08/09-L10	541	28,2	0,751	11,5
	08/09-L11	540	30,1	0,751	12,2
	08/09-L12	539	29,7	0,751	12,0
	<b>Média</b>	<b>540 ± 1</b>	<b>29,32 ± 1,02</b>	<b>0,751 ± 0</b>	<b>11,9 ± 0,4</b>
960	27/08-L7	552	30,2	0,772	12,9
	27/08-L8	550	30,4	0,760	12,7
	27/08-L9	549	30,5	0,766	12,8
	<b>Média</b>	<b>551 ± 2</b>	<b>30,34 ± 0,15</b>	<b>0,766 ± 0,006</b>	<b>12,8 ± 0,1</b>

simultaneamente. Após estes passos, a região  $n^+$  apresentou uma resistência de folha média de 35  $\Omega/\square$ . Os resultados são mostrados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2. Tensão de circuito aberto (Voc), densidade de corrente elétrica de curto-circuito (Jsc), fator de forma (FF) e eficiência ( $\eta$ ) em função da temperatura de queima das pastas de metalização e difusão de alumínio ( $T_{Q-D}$ ) para processo com temperatura de difusão de fósforo de 875°C.

$T_{Q-D}$ (°C)	Célula	Voc (mV)	Jsc (mA/cm <sup>2</sup> )	FF	$\eta$ (%)
860	12/08-L2	547	27,3	0,540	8,9
	12/08-L3	549	27,8	0,560	8,6
	<b>Média</b>	<b>548 ± 1</b>	<b>27,6 ± 0,4</b>	<b>0,550 ± 0,014</b>	<b>8,73 ± 0,24</b>
880	12/08-L4	552	31,3	0,684	11,9
900	12/08-L6	550	31,3	0,725	12,5
920	29/08-L1	555	32,3	0,746	13,3
	29/08-L2	556	31,9	0,762	13,5
	<b>Média</b>	<b>556 ± 1</b>	<b>32,13 ± 0,29</b>	<b>0,754 ± 0,012</b>	<b>13,46 ± 0,10</b>
940	29/08-L3	554	26,7	0,720	10,6
	29/08-L4	553	31,6	0,745	13,0
	<b>Média</b>	<b>554 ± 1</b>	<b>29,17 ± 3,4</b>	<b>0,733 ± 0,17</b>	<b>11,85 ± 1,65</b>
960	29/08-L5	554	31,6	0,743	13,0
	29/08-L6	555	31,8	0,753	13,3
	<b>Média</b>	<b>555 ± 1</b>	<b>31,71 ± 0,10</b>	<b>0,748 ± 0,007</b>	<b>13,18 ± 0,19</b>

Da Tabela 5.2 é possível verificar que os melhores resultados das células solares ocorreram para a temperatura de queima de 920 °C e 960 °C. Para a maior

temperatura de queima a  $V_{oc}$  é de 556 mV, a  $J_{sc}$  é de 32,13 mA/cm<sup>2</sup>, o fator de forma é de 0,754 resultando na eficiência de 13,5%. Nota-se que para esta  $T_{Q-D} = 920$  °C, somente a  $J_{sc}$  é menor que o resultado para  $T_{Q-D} = 960$  °C. Também verifica-se que o FF apresenta valores típicos do processo de metalização por serigrafia para  $T_{Q-D}$  maiores que 900 °C.

A eficiência máxima foi de 13,5 %, a  $J_{sc}$  de 31,9 mA/cm<sup>2</sup> e a  $V_{oc}$  de 556 mV para  $T_{Q-D}$  de 920 °C. As Células processadas em lâminas do mesmo lote, com estrutura  $n^+ pn^+$ , isto é, sem BSF, alcançaram eficiência de 12,6 % com  $J_{sc}$  de 30,5 mA/cm<sup>2</sup>, e  $V_{oc}$  de 550 mV.

#### **5.1.4. Análise da Influência da Difusão de Fósforo**

Nas Figuras 5.5 e 5.6 compara-se a tensão de circuito aberto, a densidade de corrente elétrica de curto-circuito, o fator de forma e a eficiência em função da temperatura de queima e difusão simultânea para o emissor formado a 875 °C e 900 °C. Em todos os processos a velocidade da esteira foi de 180 cm/min. Da análise da Figura 5.5 constata-se que a  $V_{oc}$  e a  $J_{sc}$  são afetadas pela  $T_{Q-D}$  somente para as células solares com difusão de fósforo a 875 °C. Neste caso, ambos parâmetros aumentam com o aumento da temperatura de queima das pastas de metalização e difusão de alumínio simultaneamente.

#### **5.1.5. Análise da Influência da Velocidade da Esteira**

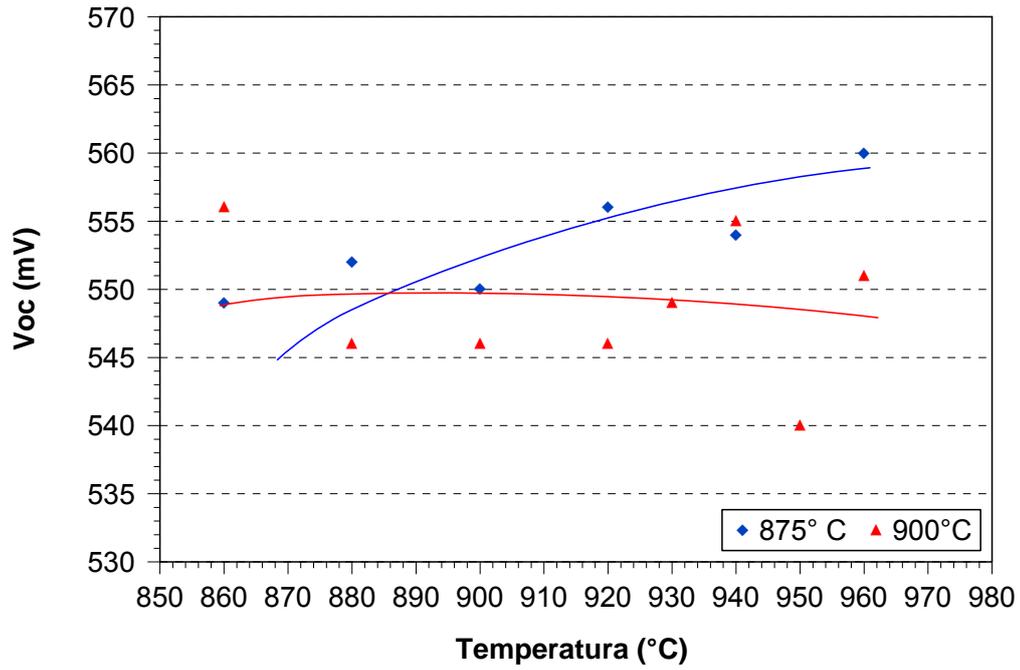
Com a finalidade de analisar a influência da velocidade da esteira do forno durante o processo térmico simultâneo de difusão de alumínio e queima das pastas metálicas ( $V_{E-D}$ ), foram fabricadas células solares variando este parâmetro. A difusão de fósforo foi implementada na temperatura de 900 °C e a  $T_{Q-D}$  foi de 940 °C.

Na Tabela 5.3 apresentam-se os parâmetros de caracterização de cada dispositivo fabricado e os valores médios. Nota-se que a eficiência aumenta com a velocidade da esteira  $V_{E-D}$ , obtendo-se os melhores resultados para  $V_{E-D}$  de 180 cm/min.

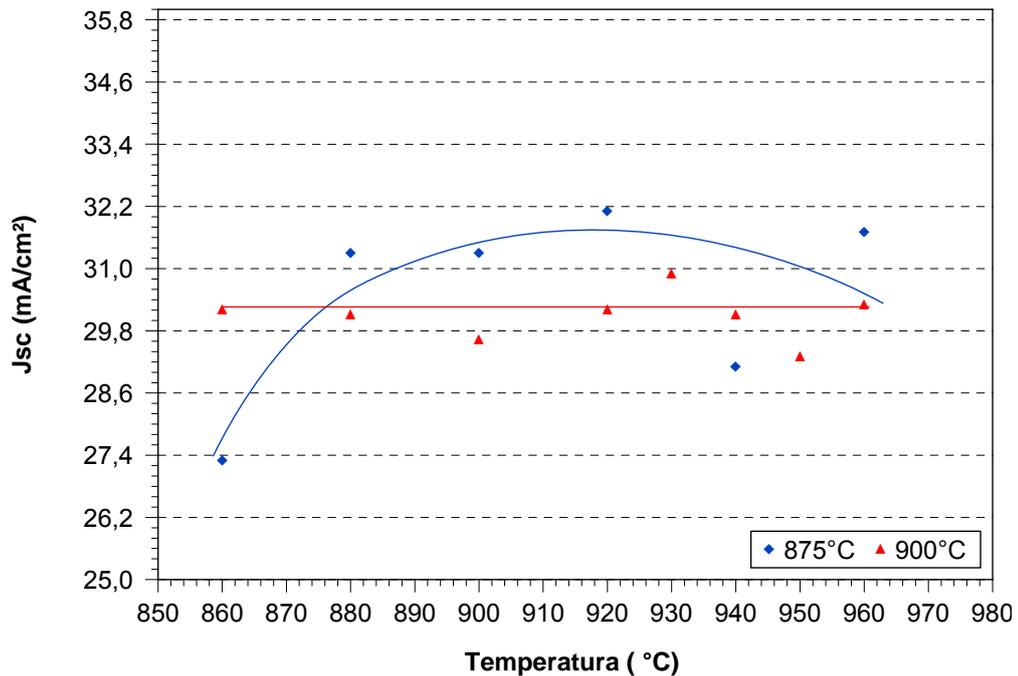
Das Figuras 5.7 e 5.8 observa-se que todos os parâmetros elétricos aumentam com o aumento da velocidade da esteira. A  $J_{sc}$  e a  $V_{oc}$  praticamente estabilizam após a  $V_{E-D} = 150$  cm/min. Somente o fator de forma continua aumentando até a velocidade da esteira de 180 cm/min, provocando o mesmo comportamento na eficiência. Portanto, pode-se concluir que para este processo de difusão de Al depositado por evaporação e queima das pastas de metalização simultânea a velocidade da esteira deveria ser de 180 cm/min.

Tabela 5.3. Tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ), densidade de corrente elétrica de curto-circuito ( $J_{sc}$ ), fator de forma (FF) e eficiência ( $\eta$ ) em função velocidade da esteira durante o processo simultâneo de difusão de Al e queima das pastas de metalização ( $V_{E-D}$ ).

$V_{E-D}$ (cm/min)	Célula	$V_{oc}$ (mV)	$J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	FF	$\eta$ (%)
50	16/09-L1	509	7,2	0,298	1,1
	16/09-L2	503	2,8	0,264	0,4
	16/09-L4	485	2,8	0,264	0,4
	<b>Média</b>	<b>500 ± 12</b>	<b>4,3 ± 2,6</b>	<b>0,275 ± 0,019</b>	<b>0,6 ± 0,4</b>
100	16/09-L5	540	28,9	0,608	9,5
	16/09-L6	535	29,0	0,676	10,5
	16/09-L7	542	29,2	0,651	10,3
	16/09- L8	544	29,6	0,693	11,1
	<b>Média</b>	<b>541 ± 4</b>	<b>29,18 ± 0,26</b>	<b>0,66 ± 0,04</b>	<b>10,4 ± 0,7</b>
150	16/09-L9	546	30,13	0,742	12,2
	16/09-L10	551	30,37	0,742	12,4
	16/09-L11	550	30,63	0,721	12,1
	16/09-L12	552	30,37	0,739	12,4
	<b>Média</b>	<b>550 ± 2</b>	<b>30,37 ± 0,20</b>	<b>0,736 ± 0,010</b>	<b>12,29 ± 0,13</b>
180	8/09- L5	548	30,88	0,749	12,7
	8/09- L6	547	30,85	0,748	12,6
	8/09- L7	549	30,77	0,763	12,9
	8/09- L8	548	30,69	0,760	12,8
	<b>Média</b>	<b>548 ± 1</b>	<b>30,79 ± 0,09</b>	<b>0,755 ± 0,008</b>	<b>12,75 ± 0,11</b>

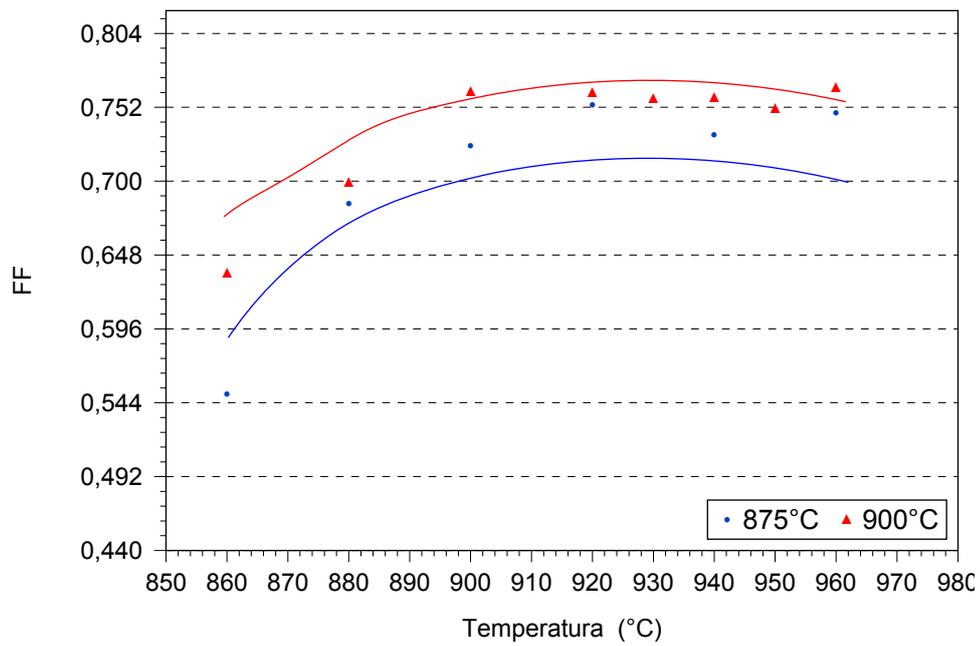


(a)

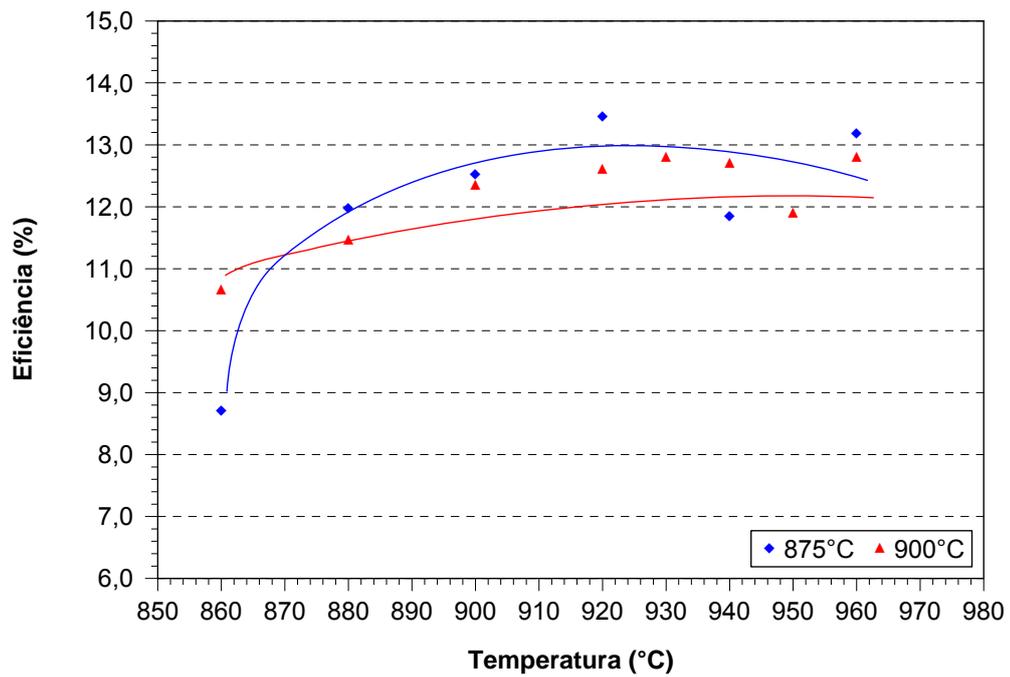


(b)

Figura 5.5. (a) Tensão de circuito aberto e (b) densidade de corrente de curto-circuito médios para a temperatura de difusão de fósforo a 875  $^{\circ}C$  e 900  $^{\circ}C$  em função da temperatura da difusão de alumínio e queima das pastas metálicas simultaneamente no forno de esteira.



(a)



(b)

Figura 5.6. (a) Fator de forma e (b) eficiência médias das células solares para a temperatura de difusão de fósforo a 875 °C e 900 °C em função da temperatura da difusão de alumínio e queima das pastas metálicas simultaneamente no forno de esteira.

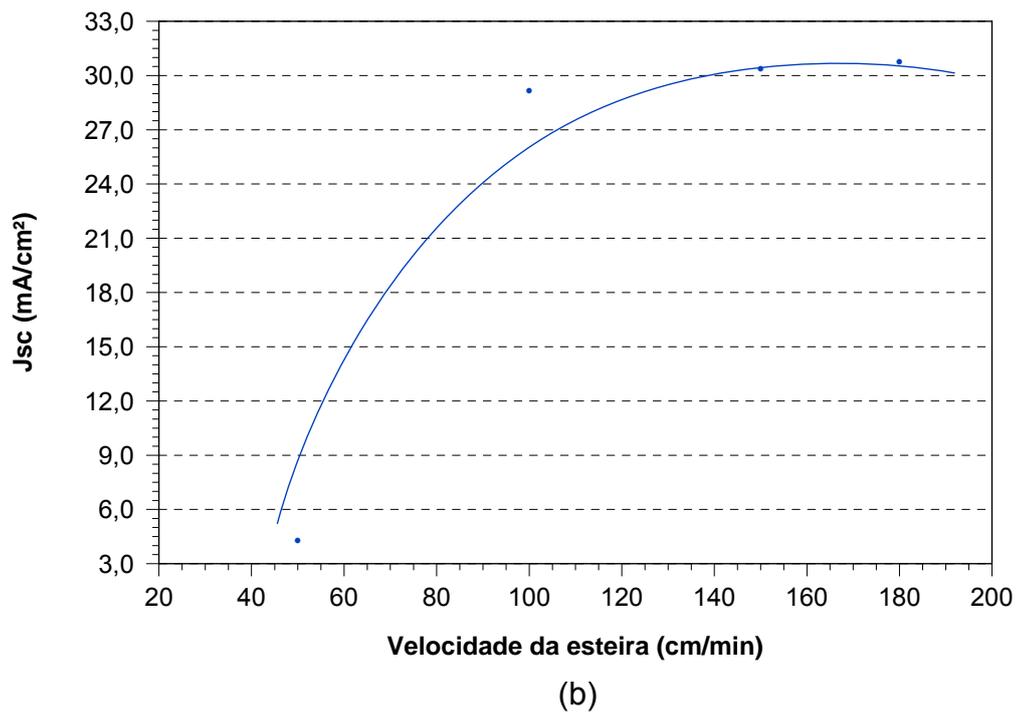
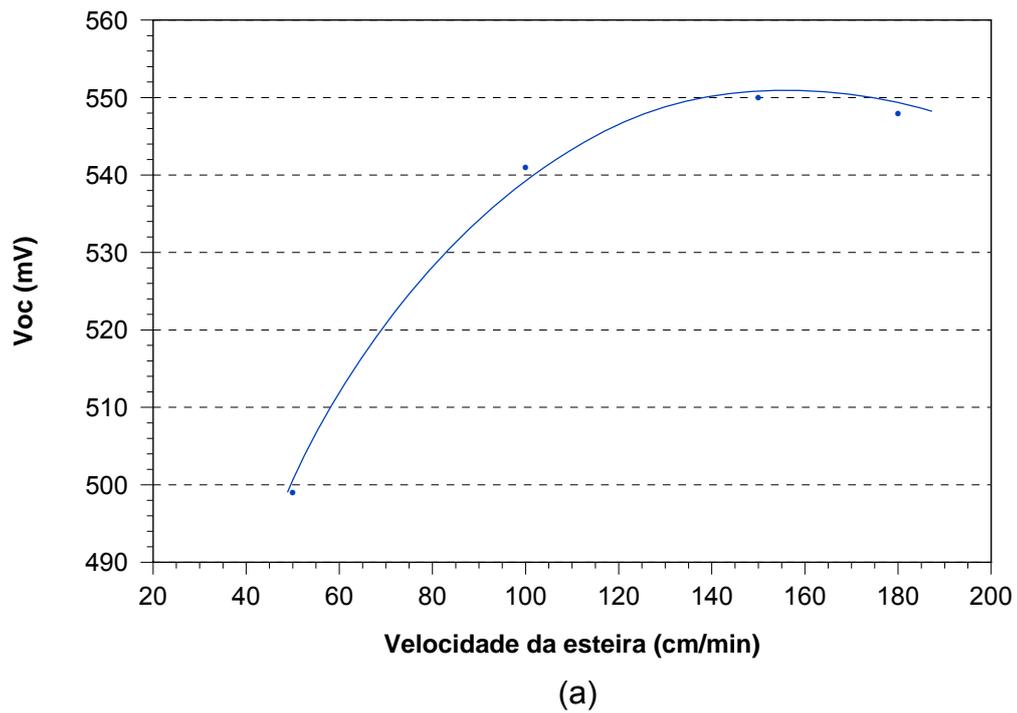


Figura 5.7. (a) Tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ) e (b) densidade de corrente elétrica de curto-circuito ( $J_{sc}$ ) em função da velocidade da esteira durante o processo de difusão de Al depositado por evaporação e queima das pastas de metalização simultaneamente.

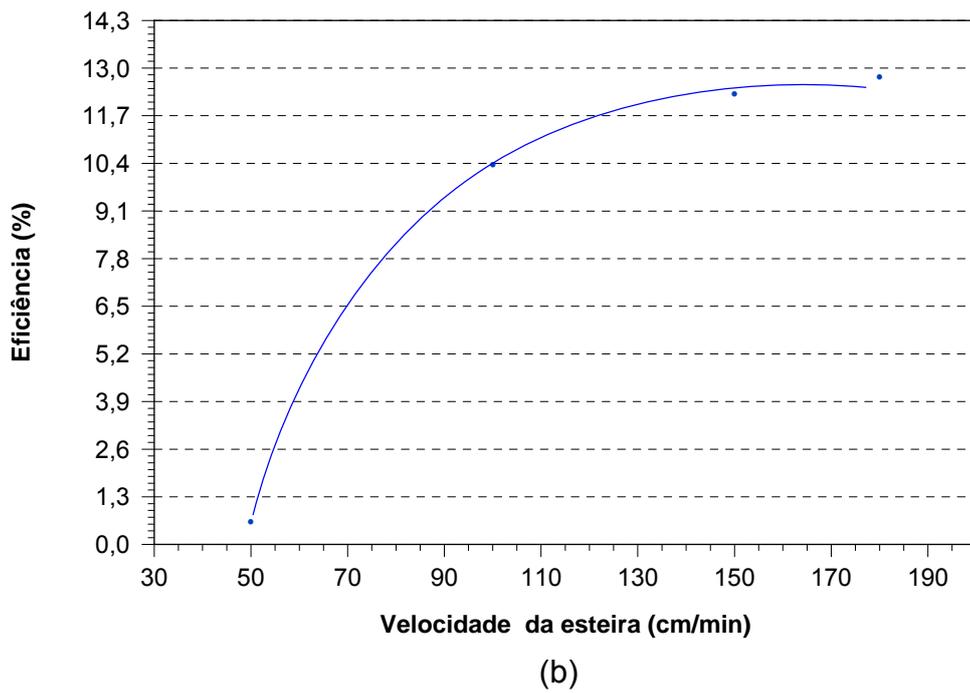
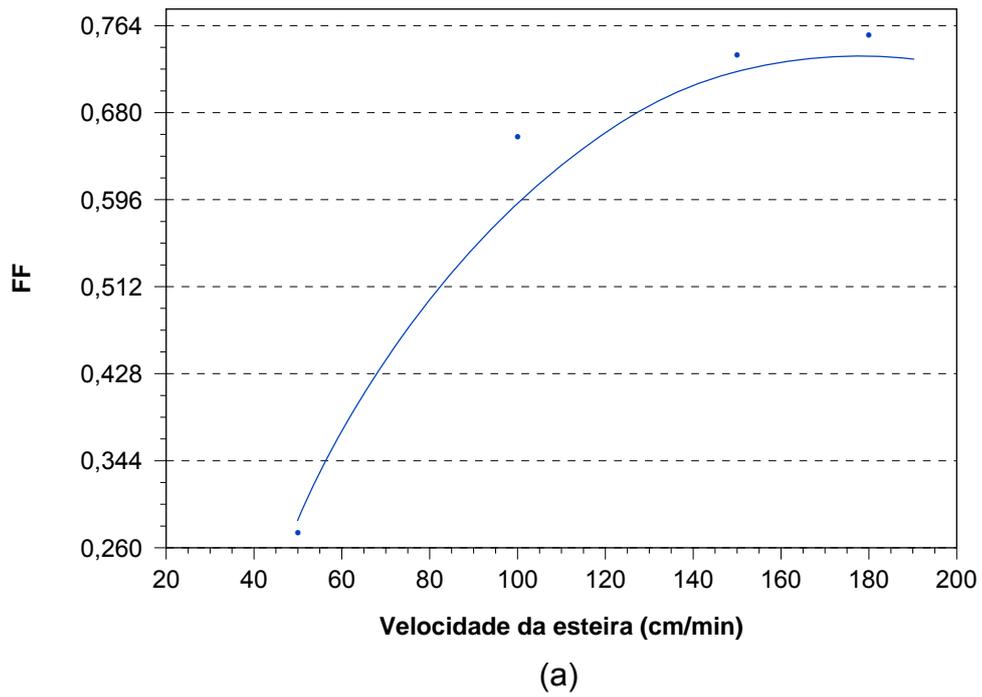


Figura 5.8. (a) Fator de forma (FF) e (b) eficiência ( $\eta$ ) em função da velocidade da esteira durante o processo de difusão de Al depositado por evaporação e queima das pastas de metalização simultaneamente.

## 5.2. Células Solares com Difusão de Alumínio Experimentalmente Otimizada

### 5.2.1. Metodologia

Após realizar e analisar os processos de difusão de alumínio e queima da pasta de metalização simultaneamente, desenvolveu-se um processo com a difusão do alumínio implementada em forno de esteira previamente à metalização por serigrafia. Na Figura 5.9 apresenta-se o esquema deste processo.

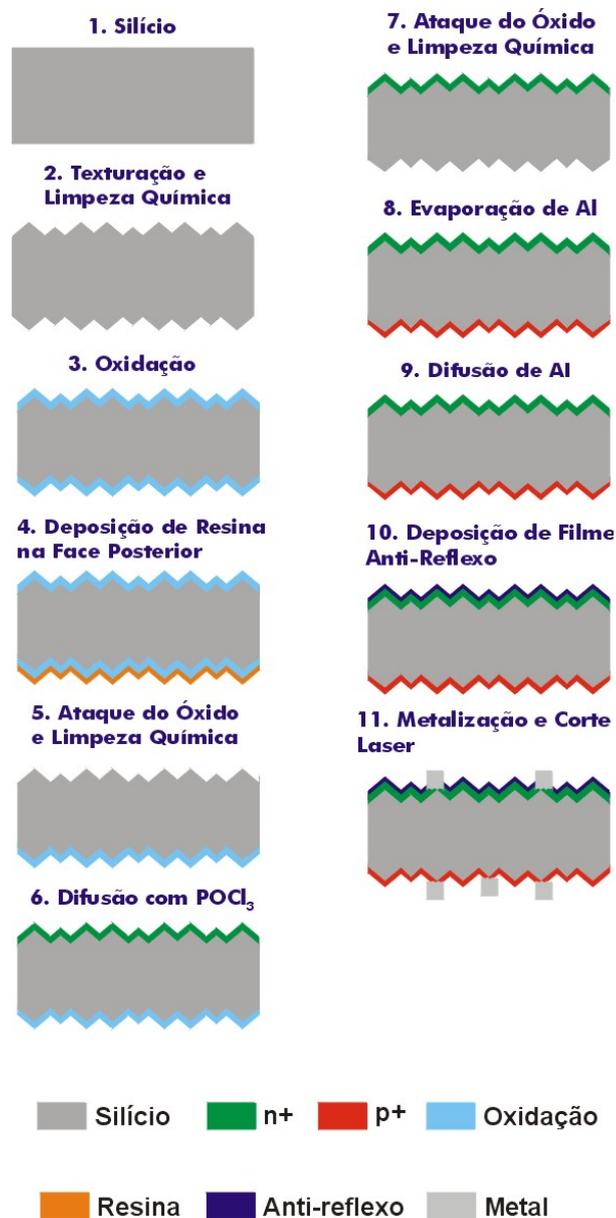


Figura 5.9. Esquema do processo de fabricação de células solares com difusão de alumínio em forno de esteira.

Conforme os resultados anteriores, a difusão de fósforo com  $\text{POCl}_3$  foi realizada na temperatura de  $875\text{ }^\circ\text{C}$ .

A difusão no forno de esteira foi realizada com a temperatura de  $900\text{ }^\circ\text{C}$  na zona 3 com a velocidade da esteira variável. A temperatura da zona 1 e zona 2 foi  $430\text{ }^\circ\text{C}$  e de  $670\text{ }^\circ\text{C}$ , respectivamente.

Nas lâminas evaporaram-se  $2\text{ }\mu\text{m}$  de alumínio com a evaporadora ilustrada na Figura 5.10.



Figura 5.10. Evaporadora de filmes antirreflexo e alumínio.

Após a difusão do alumínio, as lâminas foram novamente inseridas na evaporadora para formar o filme antirreflexo de  $\text{TiO}_2$ . Neste caso salienta-se que a espessura de filme antirreflexo foi aumentada para  $68\text{ nm}$  de  $\text{TiO}_2$ , com o objetivo de deslocar o comprimento de onda correspondente a refletância mínima. Na Figura 5.11 ilustra-se a refletância antes e após a queima das pastas de metalização.

Da Figura 5.11, constata-se que o  $\lambda_{\text{mín}}$  é de  $630\text{ nm}$  e após a queima este parâmetro é deslocado para o comprimento de onda correspondente e refletância mínima é de  $580\text{ nm}$ . A refletância média entre os comprimentos de onda de  $400\text{ nm}$  a  $1050\text{ nm}$  é de  $2,2\%$ , menor que o valor obtido da Figura 5.11.

Após a deposição de filme antirreflexo e metalização foi otimizada variando a temperatura de queima das pastas metálicas, mantendo a velocidade da esteira durante o processo de queima de 180 cm /min. Após a metalização a células solares foram cortadas no sistema laser.

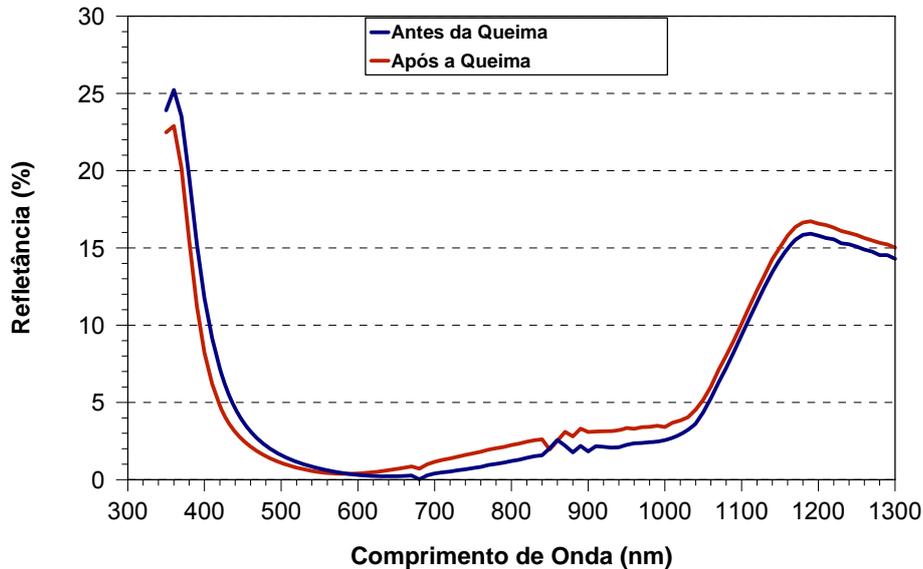


Figura 5.11. Refletância em função do comprimento de onda para o filme AR de  $\text{TiO}_2$  com espessura de 68 nm.

### 5.2.2. Influência da Velocidade da Esteira Durante a Difusão do Alumínio

Para otimizar experimentalmente este processo de fabricação de células solares, a velocidade da esteira ( $V_{E-D}$ ) do forno durante a difusão de Al foi variada bem como a temperatura da queima das pastas de metalização ( $T_Q$ ).

#### 5.2.2.1. Velocidade da esteira de 80 cm /min

Nesta etapa foram fabricadas células solares com difusão de alumínio com  $V_{E-D}$  de 80 cm/min. A queima das pastas de metalização foi realizada com diferentes temperaturas. Na Tabela 5.3 mostram-se os parâmetros elétricos das células solares em função da temperatura de queima.

Analisando a Tabela 5.3, pode-se verificar que a maior eficiência média ocorre para  $T_Q = 900$  °C, com valor de 13,5 %. Os valores médios do FF são similares para

processos relativos a temperatura e queima ( $T_Q$ ). O maior valor médio Voc ocorre para maior  $T_Q$ . A Jsc é superior aos valores obtidos com o processo de queima das pastas de metalização e difusão de alumínio simultâneas.

Tabela 5.3. Tensão de circuito aberto (Voc), densidade de corrente elétrica de curto-circuito (Jsc), fator de forma (FF) e eficiência ( $\eta$ ) em função da temperatura de queima ( $T_Q$ ) para processo de difusão de alumínio com a velocidade da esteira de 80cm/min.

$T_Q$ (°C)	Célula	Voc (mV)	Jsc (mA/cm <sup>2</sup> )	FF	$\eta$ (%)
870	18/09-L1	544	33,1	0,729	13,11
	18/09-L2	548	33,1	0,746	13,54
	<b>Média</b>	<b>546 ± 3</b>	<b>33,10 ± 0,02</b>	<b>0,738 ± 0,012</b>	<b>13,3 ± 0,3</b>
880	30/09-L1	558	31,0	0,771	13,55
890	18/09-L3	553	32,7	0,748	13,50
	18/09- L4	552	32,2	0,736	13,10
	30/09-L2	558	33,0	0,753	13,88
	<b>Média</b>	<b>554 ± 3</b>	<b>32,6 ± 0,4</b>	<b>0,746 ± 0,009</b>	<b>13,5 ± 0,4</b>
900	30/09- L3	557	33,12	0,738	13,62
	30/09- L4	554	32,78	0,742	13,48
	<b>Média</b>	<b>555± 2</b>	<b>32,95 ± 0,24</b>	<b>0,740 ± 0,030</b>	<b>13,6 ± 0,1</b>

Na Figura 5.12 e 5.13 mostram-se os parâmetros elétricos médios das células solares em função da temperatura de queima das pastas de metalização. Observe-se que a Voc aumenta com  $T_Q$ , porém os maiores valores do FF ocorreram na temperatura intermediária. O comportamento do Jsc e  $\eta$  é similar, com os melhores resultados para maiores temperaturas.

#### 5.2.2.2. Velocidade da Esteira de 100 cm/min

A velocidade da esteira durante a difusão do Al evaporado foi aumentada para 100 cm/min a fim de avaliar a influência deste parâmetro de processo na eficiência das células solares. Da mesma forma que para o  $V_{E-D} = 80$  cm/min, a  $T_Q$  foi variada de 860°C a 890 °C. Os valores médios e de cada dispositivo fabricado são mostrados na Tabela 5.4.

Foi possível verificar neste processo de fabricação de células solares com velocidade da esteira de 100 cm/min que a temperatura de queima que apresentou o melhor resultado foi de 880 °C, menor que a melhor temperatura de queima para velocidade de difusão de 80 cm/min. A eficiência média para está  $T_Q$  é de 14 %,

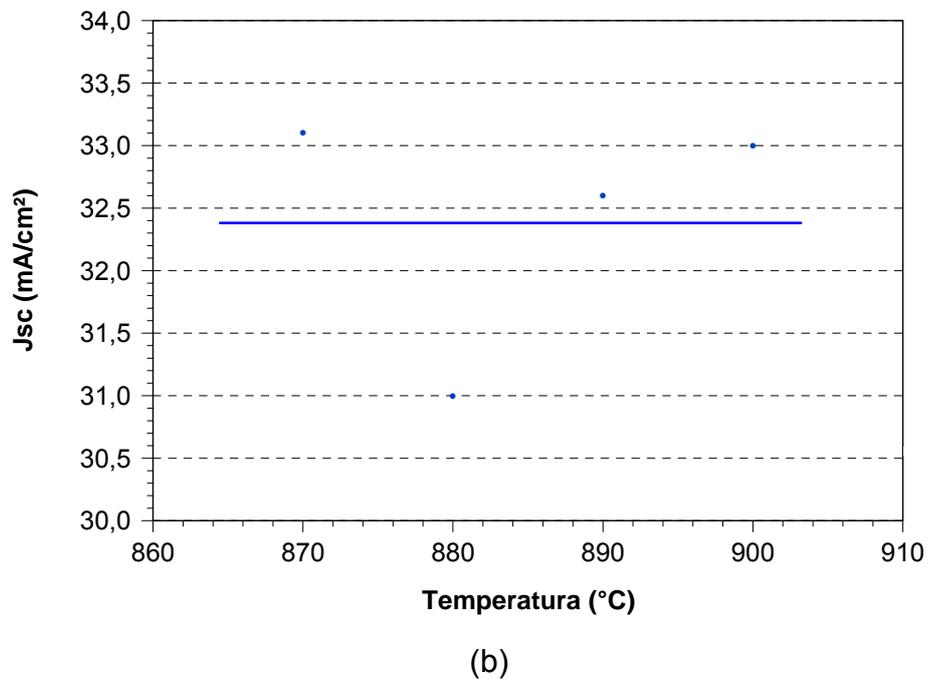
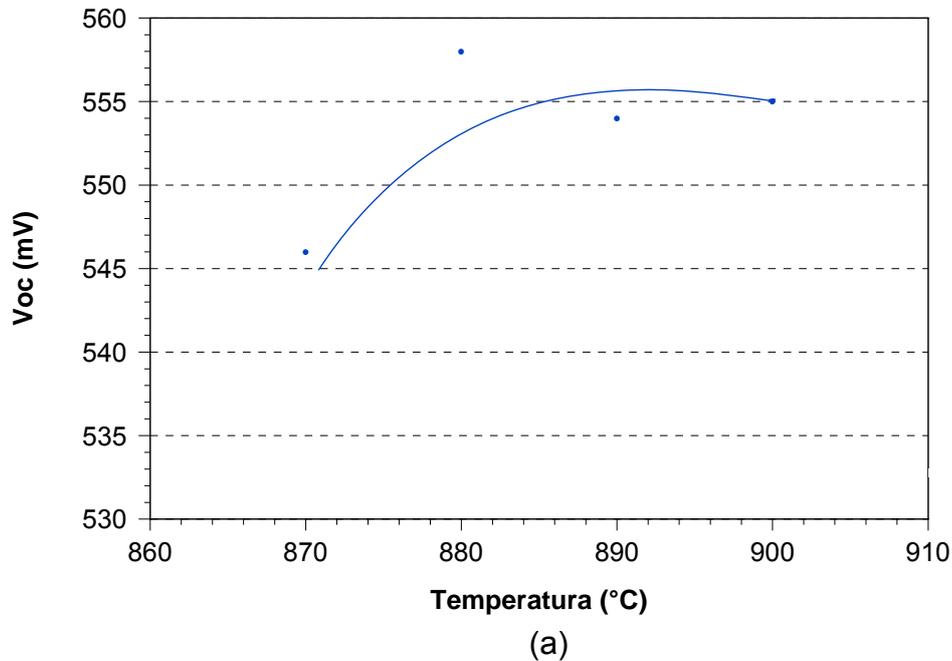
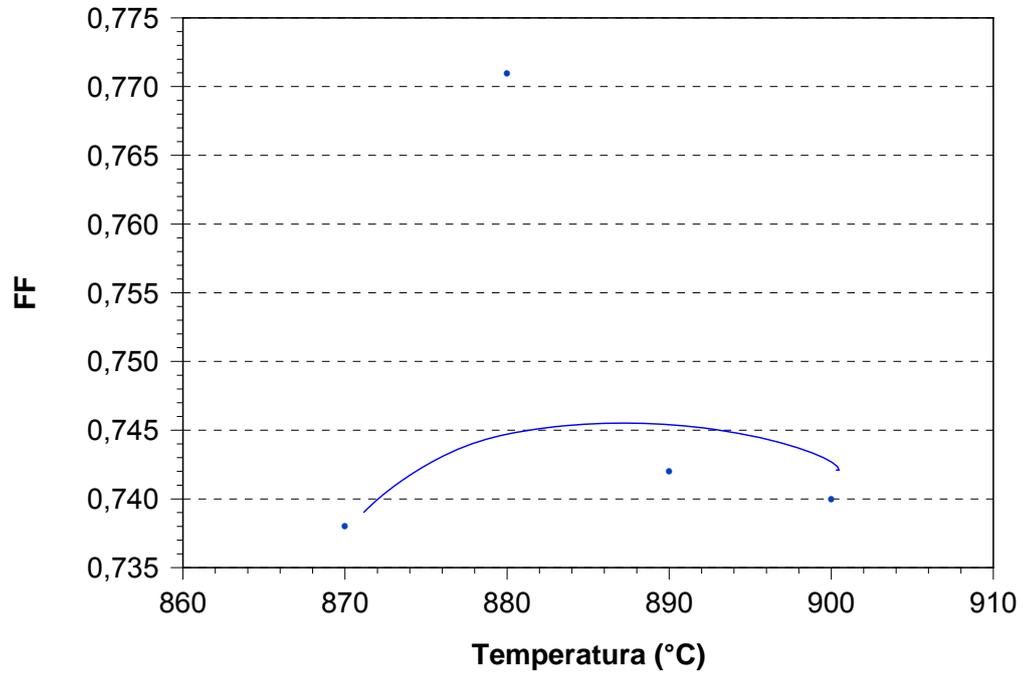
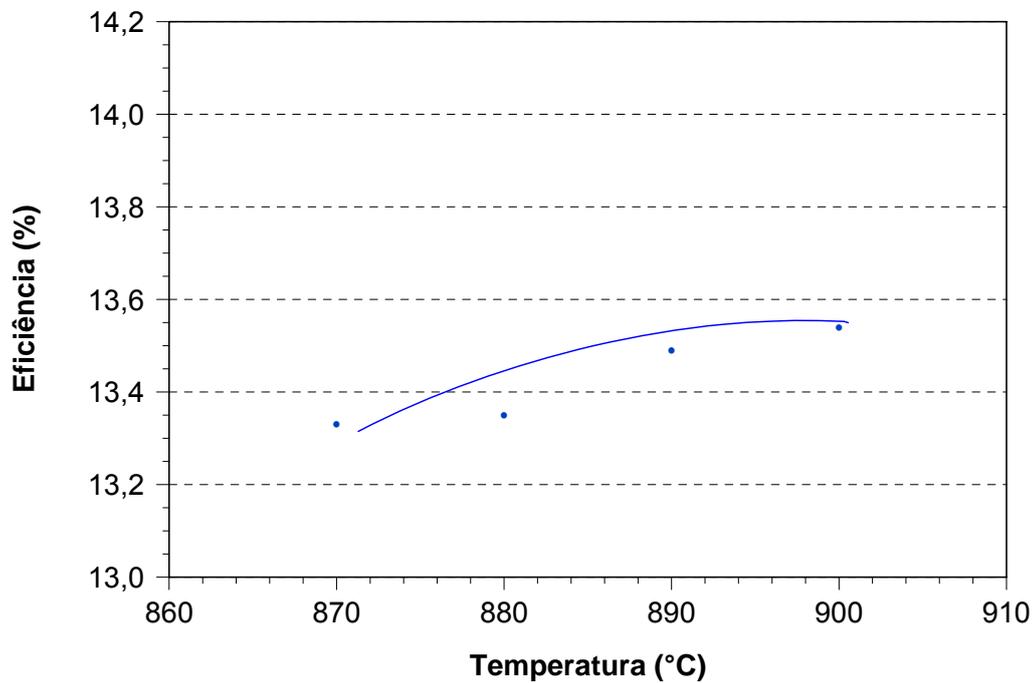


Figura 5.12. (a) Tensão de circuito aberto (Voc), (b) densidade de corrente elétrica de curto-circuito (Jsc), em função da temperatura de queima ( $T_Q$ ) para a velocidade da esteira de 80 cm/min durante a difusão de Al

sendo a  $J_{sc}$  o parâmetro que mais aumentou em relação ao processo com  $V_{E-D} = 80$  cm/min.



(a)



(b)

Figura 5.13. (a) fator de forma (FF), (b) eficiência ( $\eta$ ) em função da temperatura de queima ( $T_0$ ) para a velocidade da esteira de 80 cm/min durante a difusão de Al.

Tabela 5.4. Tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ), densidade de corrente de curto-circuito ( $J_{sc}$ ), fator de forma (FF), eficiência ( $\eta$ ) em função da temperatura de queima ( $T_Q$ ) para processo com a velocidade da esteira de 100 cm/min.

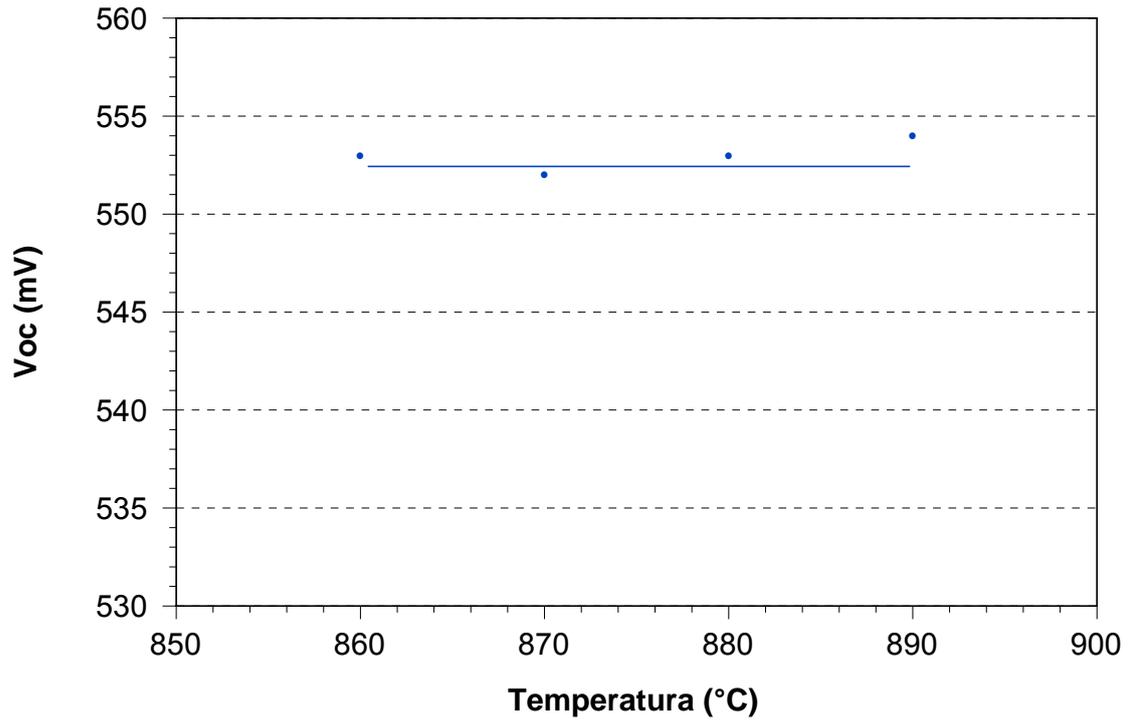
$T_Q$ (°C)	Célula	$V_{oc}$ (mV)	$J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	FF	$\eta$ (%)
860	30/09- L5	554	32,6	0,769	13,9
	30/09-L6	554	32,8	0,770	14,0
	<b>Média</b>	<b>554 ± 0</b>	<b>32,75 ± 0,14</b>	<b>0,769 ± 0,001</b>	<b>13,9 ± 0,9</b>
870	30/09- L8	553	33,0	0,769	14,03
	18/09-L5	553	32,7	0,759	13,72
	18/09-L6	551	32,6	0,759	13,65
	30/09- L9	552	32,9	0,764	13,87
	<b>Média</b>	<b>552 ± 1</b>	<b>32,82 ± 0,18</b>	<b>0,763 ± 0,005</b>	<b>13,82 ± 0,17</b>
880	30/09-L10	554	33,1	0,767	14,1
	30/09- L11	553	33,1	0,762	13,9
	<b>Média</b>	<b>553 ± 1</b>	<b>33 ± 0</b>	<b>0,765 ± 0,004</b>	<b>14,0 ± 0,1</b>
890	18/09-L7	551	31,6	0,744	12,9
	18/09-L8	556	32,4	0,742	13,4
	<b>Média</b>	<b>554 ± 3</b>	<b>32,0 ± 0,6</b>	<b>0,743 ± 0,002</b>	<b>13,15 ± 0,30</b>

A influência da  $T_Q$  nas características elétrica das células solares é apresentada nas Figuras 5.14 e 5.15.

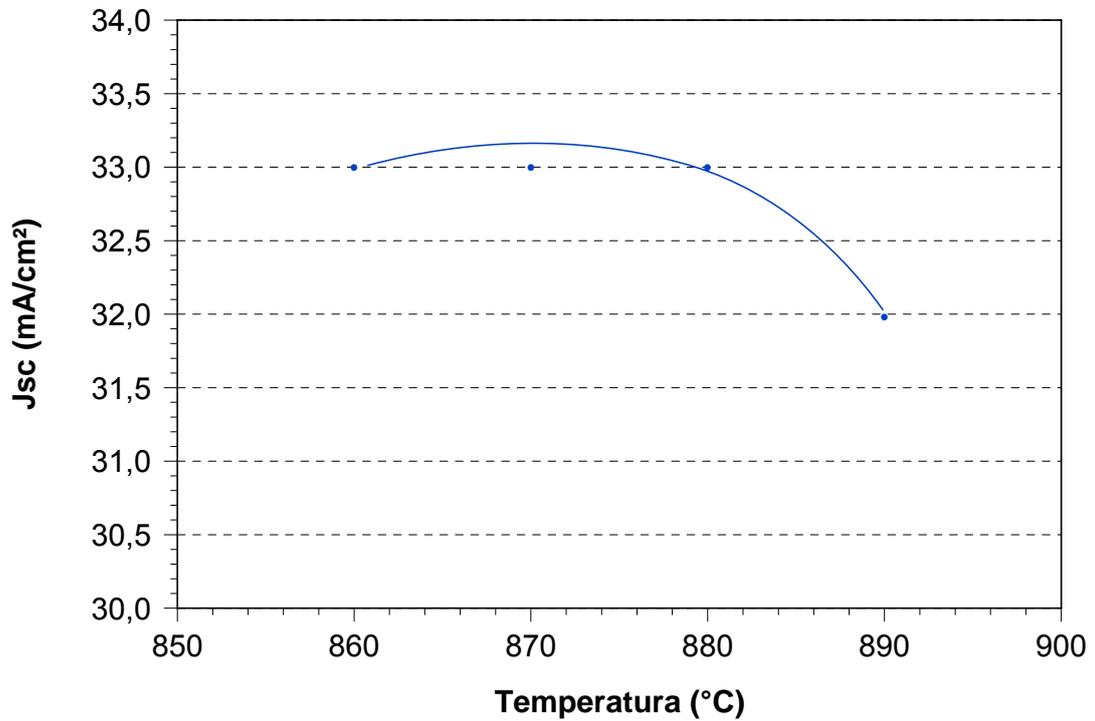
Constata-se que depois de uma certa temperatura a tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ), densidade de corrente de curto-circuito ( $J_{sc}$ ), fator de forma (FF) e a eficiência ( $\eta$ ) tendem a diminuir. Somente a  $V_{oc}$  permanece praticamente inalterada e com valores similares aos do processo com  $V_{E-D}$  de 80 cm/min.

#### 5.2.2.3. Velocidade da esteira de 120 cm/min

Neste processo, a difusão de alumínio foi implementada com  $V_{E-D}$  de 120 cm/min variando a temperatura de queima das pastas de metalização conforme mostra a Tabela 5.5 os resultados podem ser analisados a partir da Tabela 5.5 e das Figuras 5.16 e 5.17.

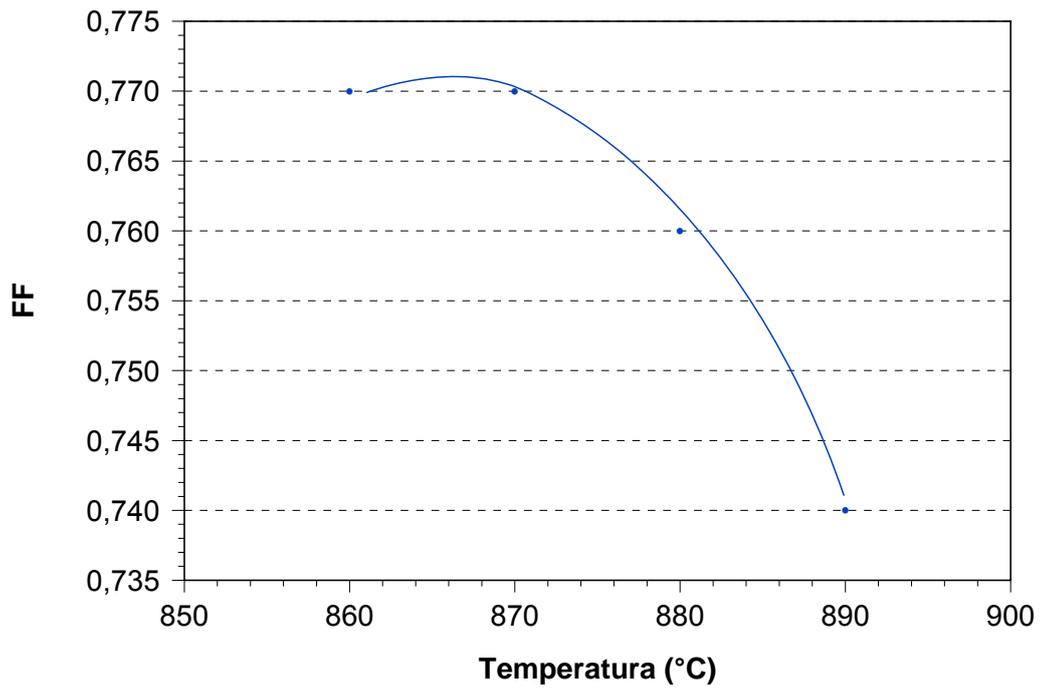


(a)

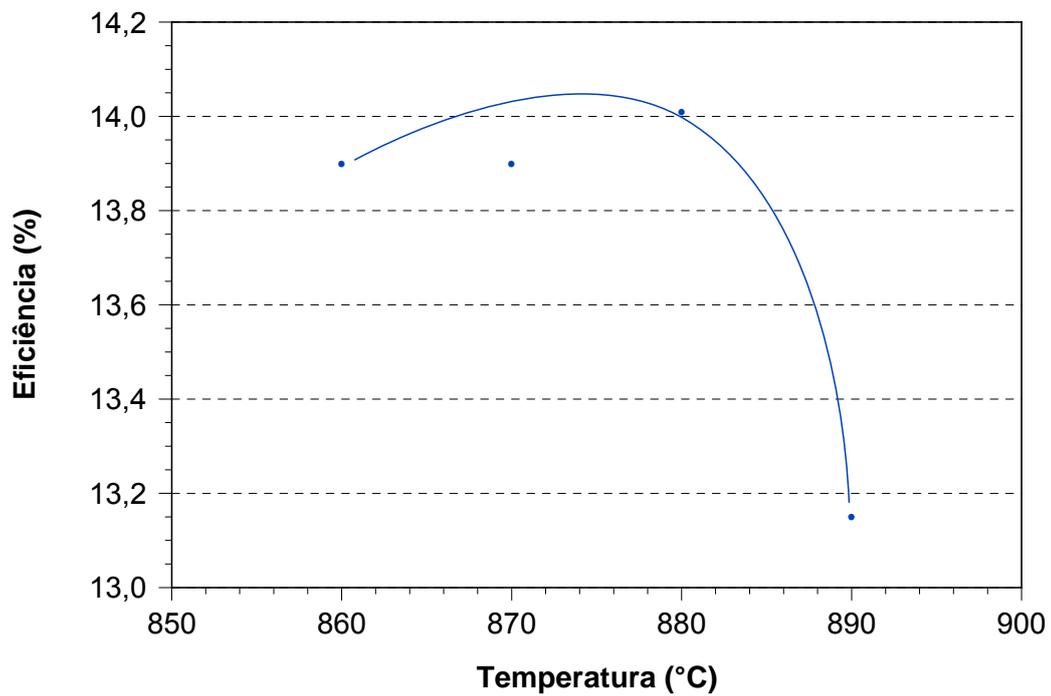


(b)

Figura 5.14. a) Tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ), (b) densidade de corrente elétrica de curto-circuito ( $J_{sc}$ ), em função da temperatura de queima ( $T_Q$ ) para a velocidade da esteira de 100 cm/min durante a difusão de Al.



(a)



(b)

Figura 5.15. (a) fator de forma (FF), (b) eficiência ( $\eta$ ) em função da temperatura de queima ( $T_Q$ ) para a velocidade da esteira de 100 cm/min durante a difusão de Al.

É possível perceber que a eficiência média das células solares é praticamente a mesma no intervalo de  $T_Q$  de 860 °C a 880 °C. A partir de  $T_Q = 880^\circ\text{C}$  todos os quatro parâmetros elétricos das células solares diminuem, mostrando que para a difusão de alumínio no forno de esteira existe uma temperatura de queima que a partir do qual a eficiência começa a diminuir como mostrado na Tabela 5.5. e as Figuras 5.16 e 5.17.

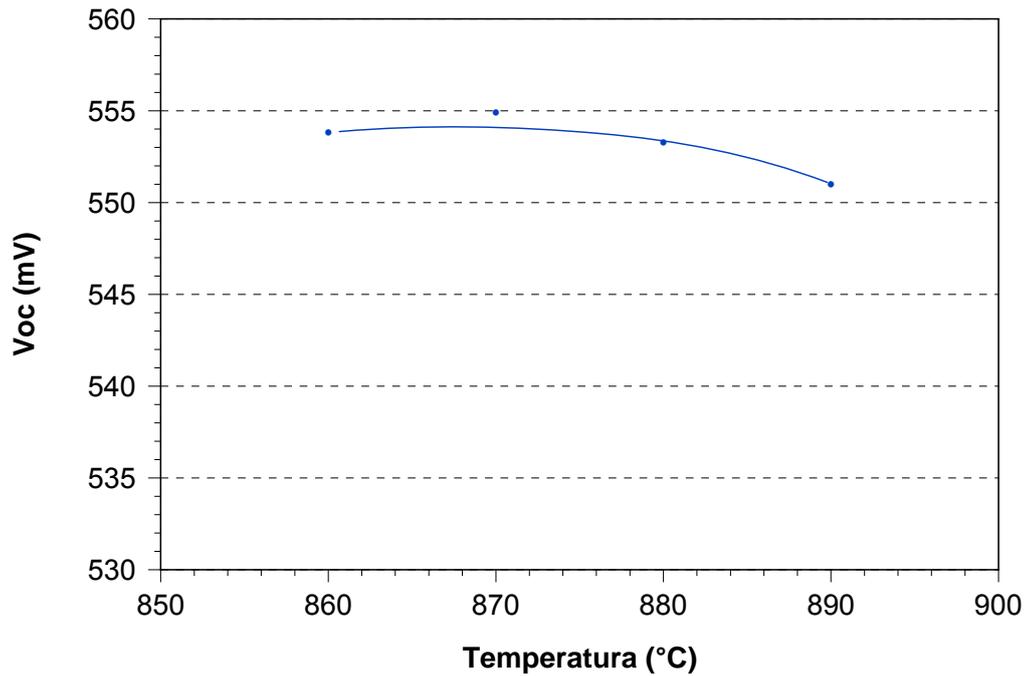
A maior eficiência de 14,4 % ocorre para  $T_Q = 870^\circ\text{C}$ , provocada pela maior  $J_{sc}$  de 33,9 mA/cm<sup>2</sup>.

Tabela 5.5. Tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ), densidade de corrente de curto-circuito ( $J_{sc}$ ), fator de forma (FF), eficiência ( $\eta$ ) em função da temperatura de queima ( $T_Q$ ) para processo com a velocidade da esteira de 120cm/min.

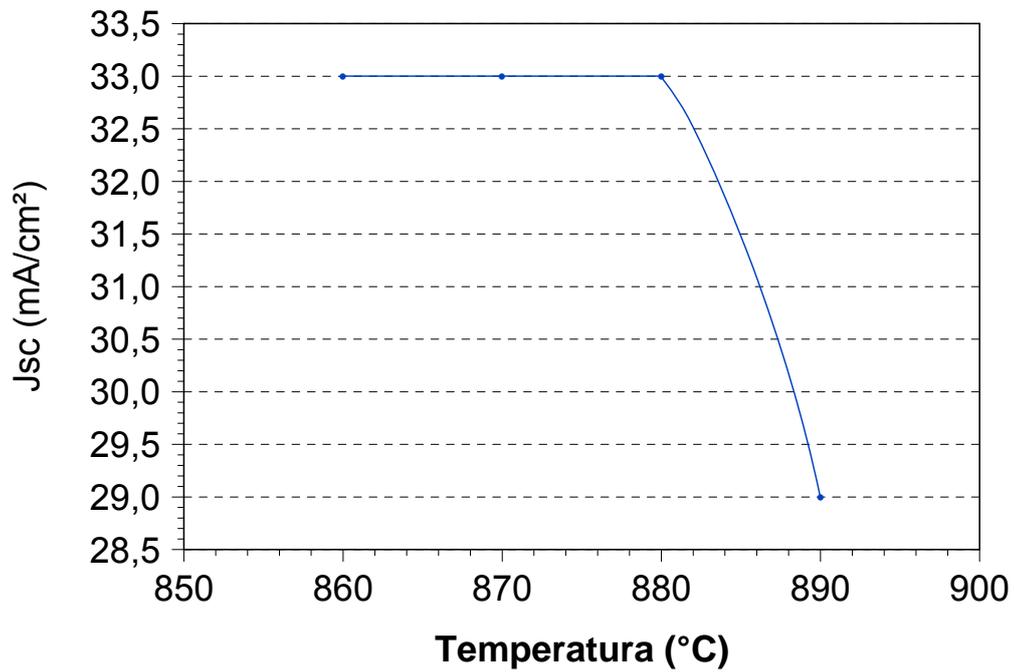
$T_Q$ (°C)	Célula	$V_{oc}$ (mV)	$J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	FF	$\eta$ (%)
860	30/09-L11	554	33,0	0,768	14,0
	30/09-L12	553	33,3	0,768	14,2
	<b>Média</b>	<b>554± 1</b>	<b>33,20±0,20</b>	<b>0,77± 0</b>	<b>14,1 ± 0,1</b>
870	30/09-L13	555	33,4	0,770	14,1
	30/09-L14	555	33,9	0,767	13,9
	18/09-L9	554	32,6	0,754	13,6
	18/09-L10	555	32,4	0,755	13,6
	<b>Média</b>	<b>555 ± 1</b>	<b>33,1 ± 0,7</b>	<b>0,762 ± 0,008</b>	<b>13,1 ± 0,4</b>
880	30/09-L15	554	33,1	0,770	14,1
	30/09-L16	553	33,0	0,761	13,9
	<b>Média</b>	<b>553 ± 1</b>	<b>33,05 ± 0,07</b>	<b>0,766 ± 0,006</b>	<b>14,0 ± 0,2</b>
890	18/09-L11	551	26,3	0,718	10,4
	18/09-L12	551	32,4	0,732	13,1
	<b>Média</b>	<b>551 ± 1</b>	<b>29,4 ± 4,3</b>	<b>0,725 ± 0,010</b>	<b>11,7± 1,9</b>

#### 5.2.2.4. Velocidade da Esteira de 140 cm/min

As características elétricas de cada célula solar e os valores médios dos dispositivos processados com  $V_{E-D}$  de 140 cm/min são comparados na Tabela 5.6 e nas Figuras 5.18 e 5.19.

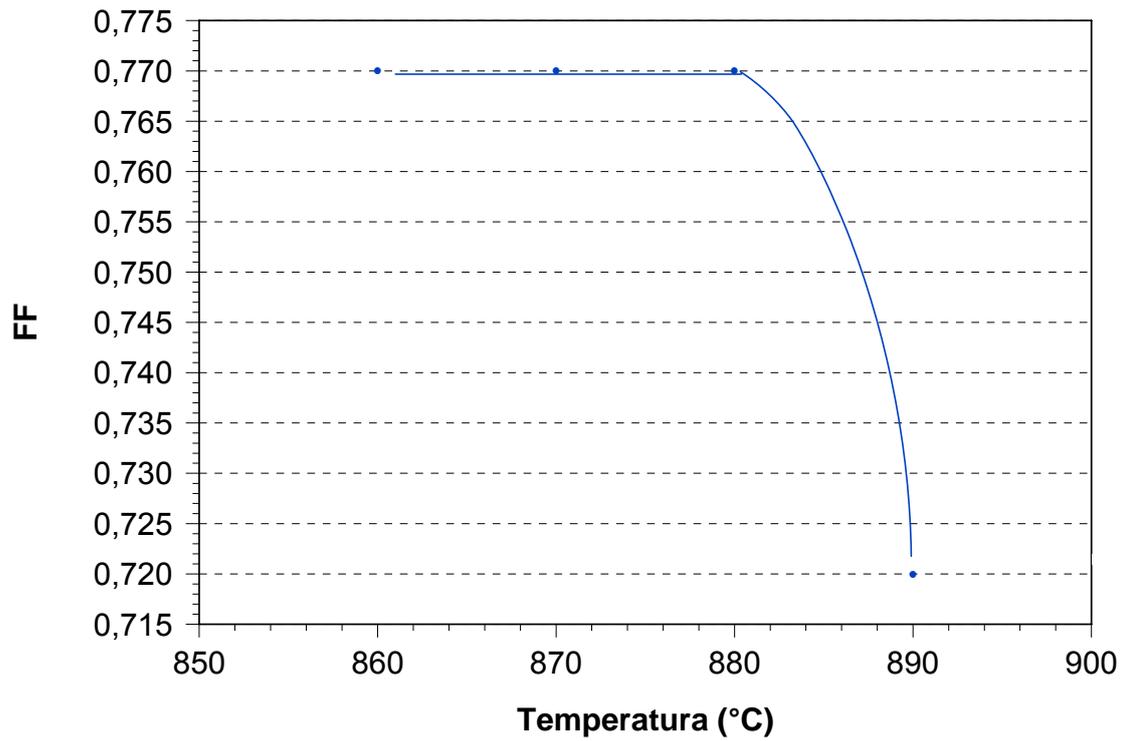


(a)

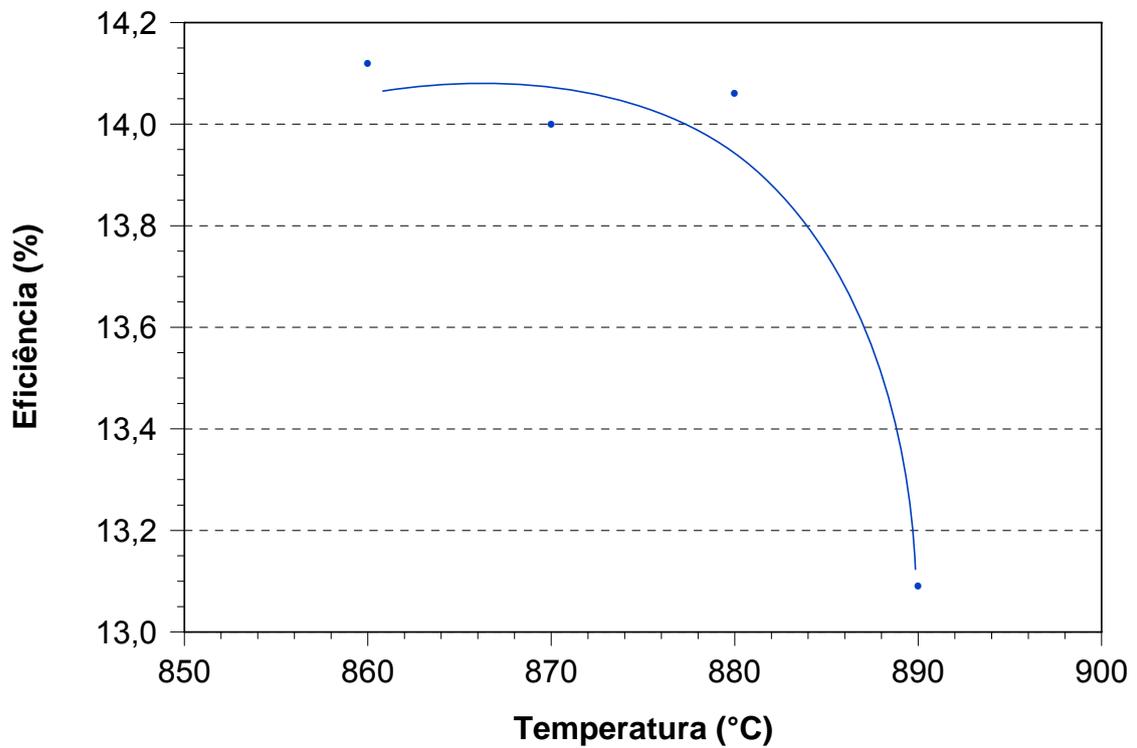


(b)

Figura 5.16. (a) Tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ), (b) densidade de corrente elétrica de curto-circuito ( $J_{sc}$ ), em função da temperatura de queima ( $T_Q$ ) para a velocidade da esteira de 120 cm/min durante a difusão de Al.



(a)



(b)

Figura 5.17. (a) Fator de forma (FF), (b) eficiência ( $\eta$ ) em função da temperatura de queima ( $T_Q$ ) para a velocidade da esteira de 120 cm/min durante a difusão de Al.

Tabela 5.6. Tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ), densidade de corrente de curto-circuito ( $J_{sc}$ ), fator de forma (FF), eficiência ( $\eta$ ) em função da temperatura de queima ( $T_Q$ ) para processo com a velocidade da esteira de 140 cm/min.

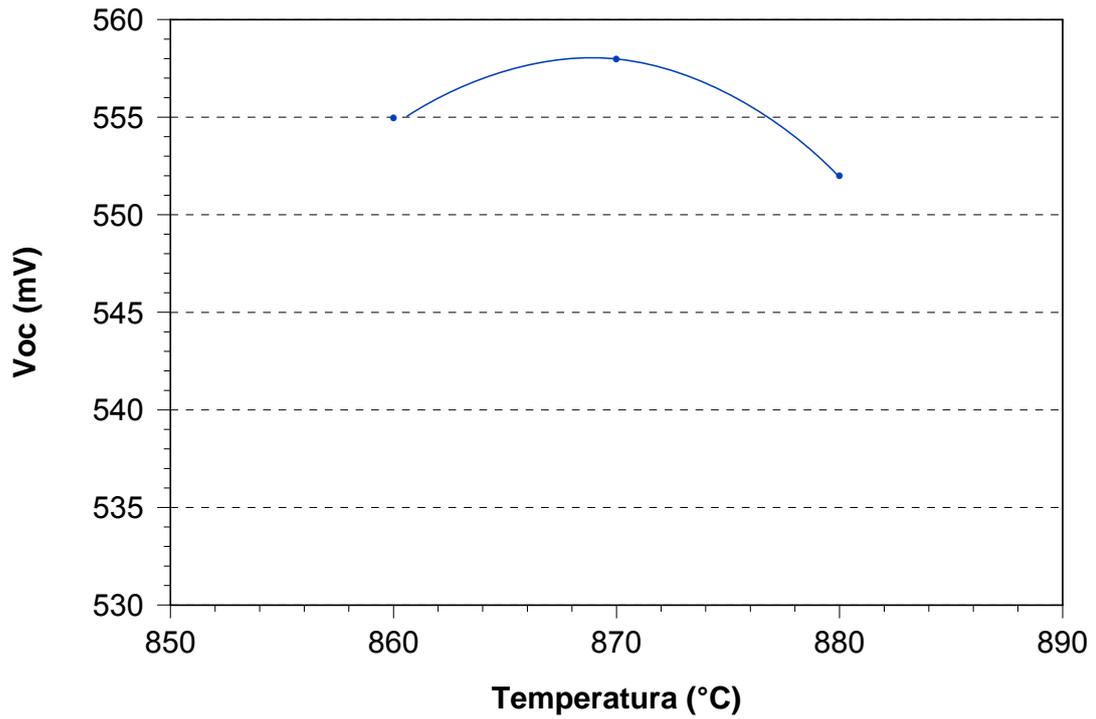
$T_Q$ (°C)	Célula	$V_{oc}$ (mV)	$J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	FF	$\eta$ (%)
860	10/11-L1	555	32,6	0,756	13,7
	10/11-L2	555	32,2	0,759	13,6
	<b>Média</b>	<b>555 ± 0</b>	<b>32,4 ± 0,3</b>	<b>0,757 ± 0,002</b>	<b>13,6 ± 0,1</b>
870	10/11-L3	559	31,9	0,767	13,66
	10/11-L4	557	32,3	0,764	13,76
	<b>Média</b>	<b>558 ± 1</b>	<b>32,11 ± 0,29</b>	<b>0,765 ± 0,002</b>	<b>13,71 ± 0,07</b>
880	10/11-L5	549	28,7	0,76	11,5
	10/11-L6	555	31,8	0,759	13,4
	10/11-L7	552	31,6	0,751	13,1
	<b>Média</b>	<b>552 ± 3</b>	<b>30,53 ± 2,0</b>	<b>0,752 ± 0,007</b>	<b>12,7 ± 1</b>

Analisando a Tabela 5.6 e as Figuras 5.18 e 5.19 é possível verificar que os melhores resultados ocorreram para a temperatura de queima de 860 °C e 870 °C. Após este último valor de temperatura ocorre um decréscimo de todos os parâmetros elétricos das células solares. A eficiência média encontrada é ligeiramente inferior que para o processo de fabricação com  $V_{E-D}$  de 120 cm/min.

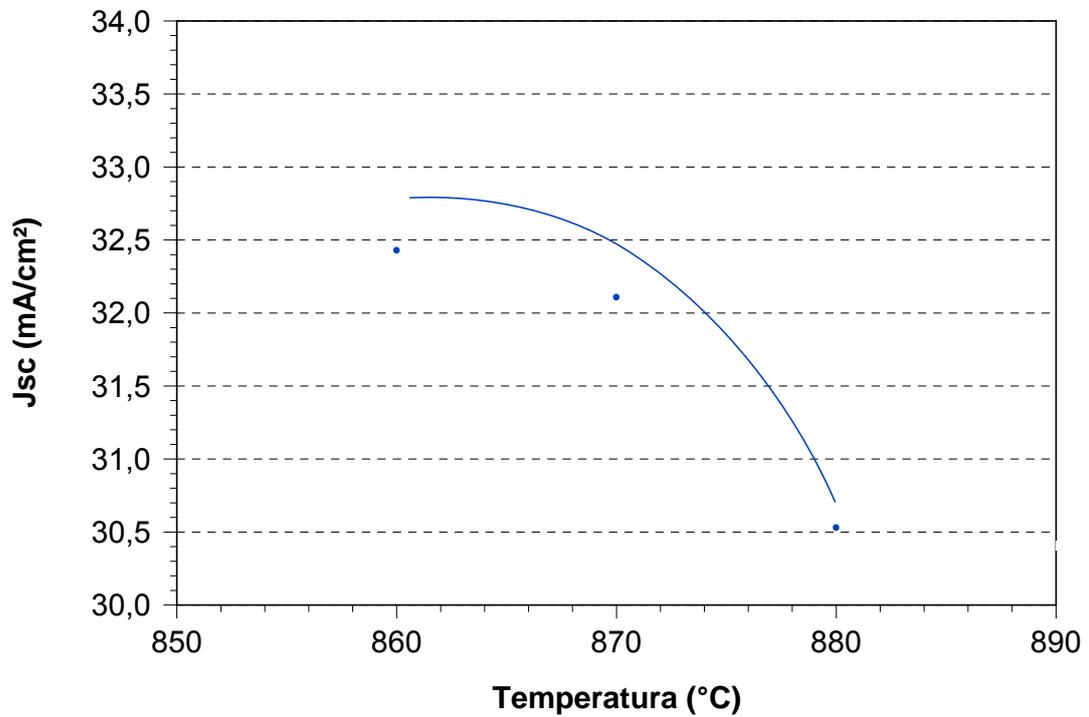
#### 5.2.2.5. Velocidade da Esteira de 150 cm/min

Nestes processos a difusão de alumínio foi implementada com  $V_{E-D}$  de 150 cm/min. Os resultados obtidos estão mostrados na Tabela 5.7 e nas representações gráficas da Figura 5.20 e 5.21.

Os resultados são similares aos processos com  $V_{E-D}$  de 120 cm/min, com valores de eficiência de 13,5 % e 13,4 % para temperatura de queima de 860 °C e 870 °C, respectivamente. Observa-se que a  $V_{oc}$  diminui com o aumento da  $T_Q$ , porém a  $J_{sc}$  e o FF praticamente não são afetados pelo  $T_Q$ .

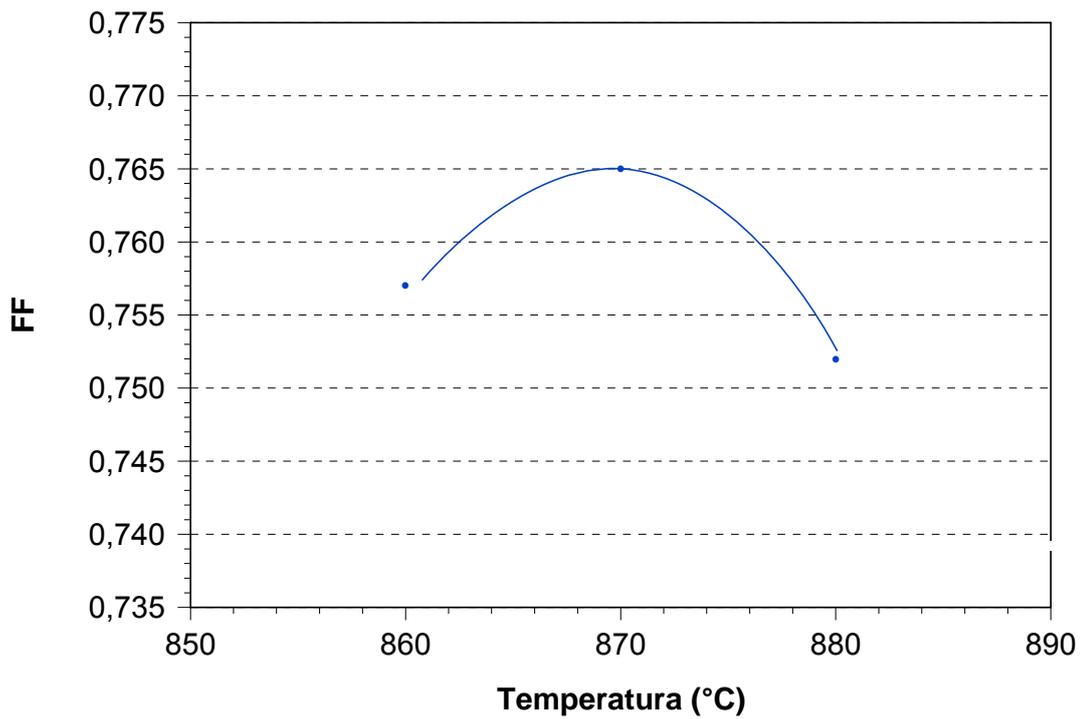


(a)

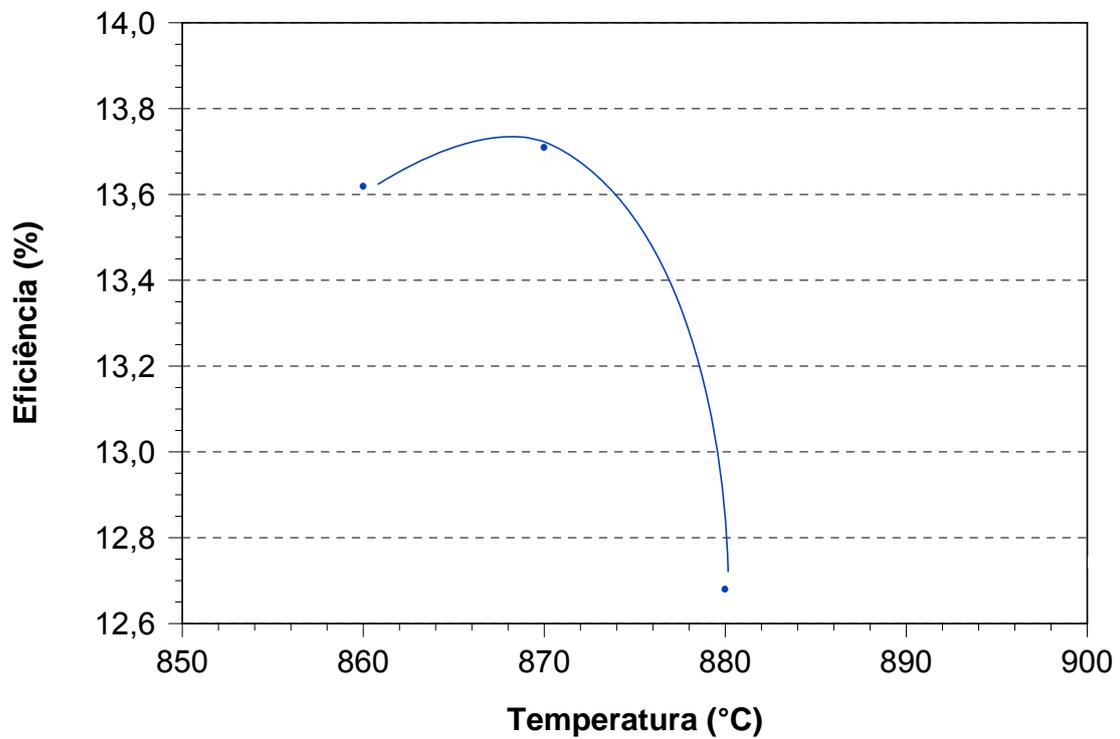


(b)

Figura 5.18. (a) Tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ), (b) densidade de corrente elétrica de curto-circuito ( $J_{sc}$ ), em função da temperatura de queima ( $T_Q$ ) para a velocidade da esteira de 140 cm/min durante a difusão de Al.



(a)



(b)

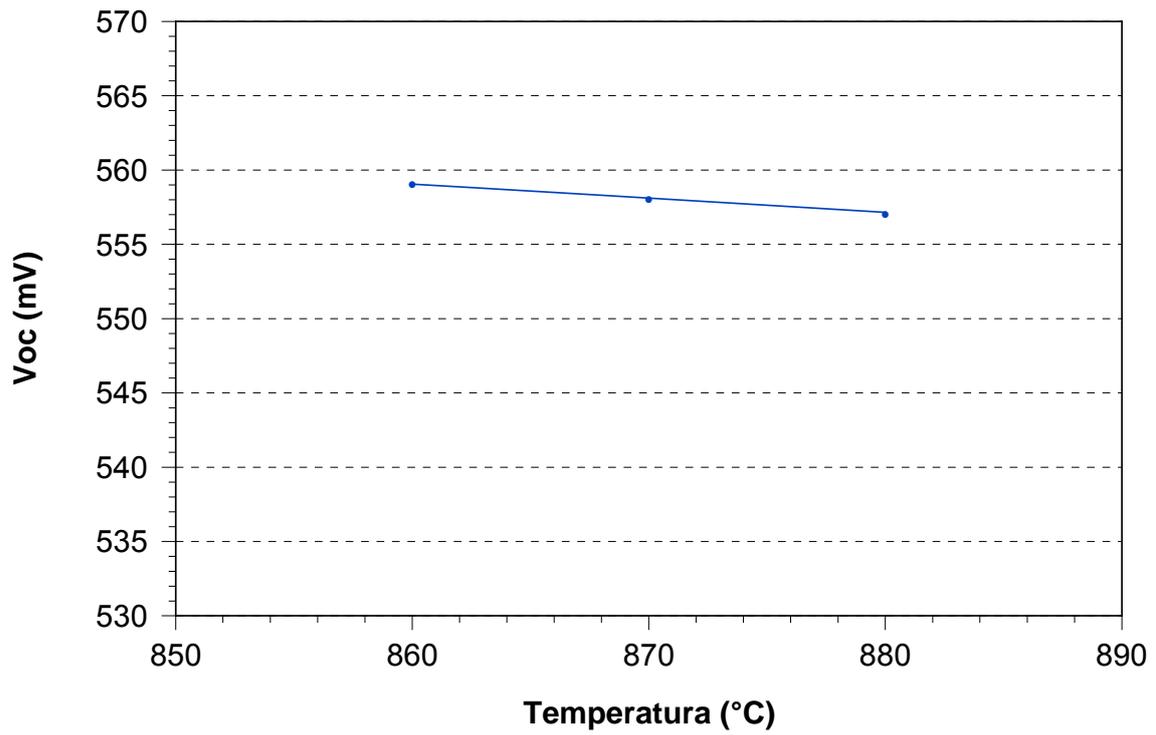
Figura 5.19. (a) Fator de forma (FF), (b) eficiência ( $\eta$ ) em função da temperatura de queima ( $T_Q$ ) para a velocidade da esteira de 140 cm/min durante a difusão de Al.

Tabela 5.7 Tensão de circuito aberto (Voc), densidade de corrente de curto-circuito (Jsc), fator de forma (FF), eficiência ( $\eta$ ) em função da temperatura de queima ( $T_Q$ ) para processo com a velocidade da esteira de 150 cm/min.

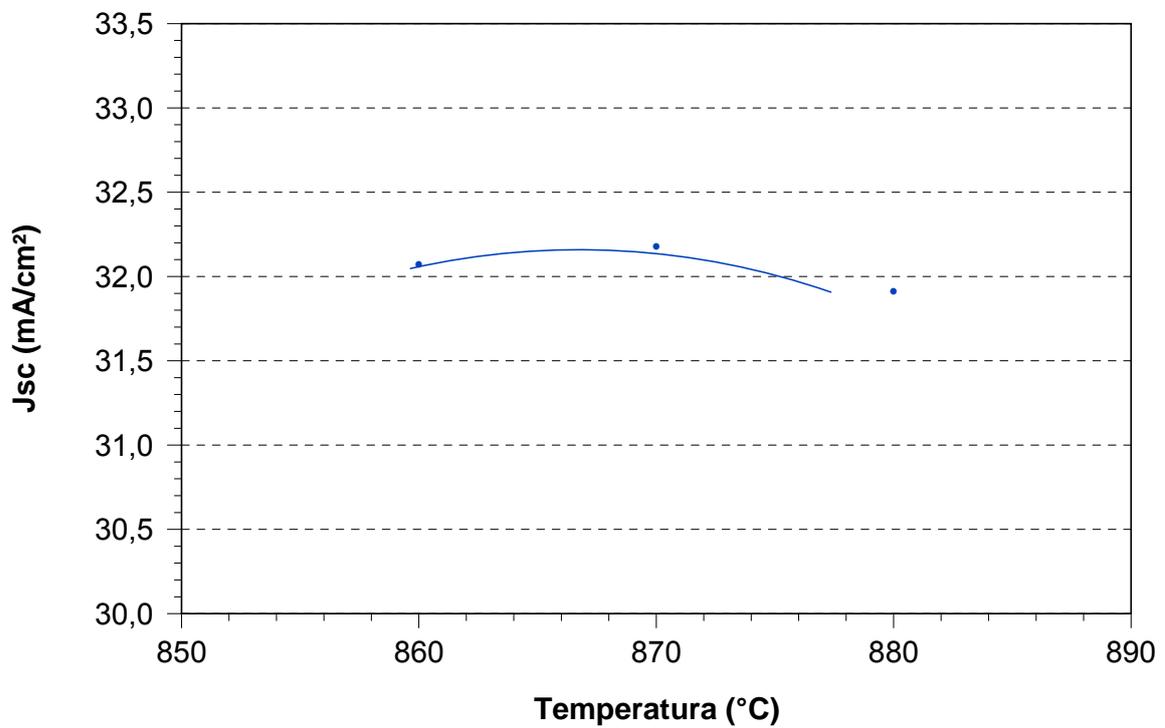
$T_Q$ (°C)	Célula	Voc (mV)	Jsc (mA/cm <sup>2</sup> )	FF	$\eta$ (%)
860	30/10-L1	551	32,5	0,739	13,2
	30/10-L2	554	32,3	0,755	13,5
	17/10-L1	558	32,0	0,754	13,5
	17/10-L2	560	32,2	0,756	13,6
	17/10-L3	559	32,0	0,763	13,7
	10/11-L10	551	31,9	0,57	13,3
	10/11-L11	554	31,9	0,755	13,3
	<b>Média</b>	<b>556 ± 4</b>	<b>32,12 ± 0,24</b>	<b>0,754 ± 0,002</b>	<b>13,46 ± 0,17</b>
870	30/10-L3	553	32,0	0,747	13,2
	30/10-L4	546	31,8	0,720	12,5
	30/10-L5	545	32,2	0,739	12,9
	17/10-L4	558	32,2	0,766	13,8
	17/10-L5	556	32,3	0,765	13,7
	17/10-L6	558	32,0	0,762	13,6
	10/11 L13	553	32,6	0,751	13,6
	10/11-L14	554	32,0	0,743	13,2
	10/11- 15	555	32,4	0,757	13,6
	<b>Média</b>	<b>553 ± 5</b>	<b>32,19 ± 0,21</b>	<b>0,750 ± 0,013</b>	<b>13,37 ± 0,42</b>
880	30/10-L6	555	32,3	0,755	13,6
	30/10-L8	559	31,9	0,760	13,6
	17/10-L7	555	31,8	0,762	13,4
	17/10-L8	558	32,0	0,753	13,5
	10/11-L16	544	32,1	0,725	12,6
	10/11- L17	542	28,9	0,739	11,6
	10/11- L18	544	31,7	0,719	12,4
	<b>Média</b>	<b>551 ± 7</b>	<b>31,54 ± 1,12</b>	<b>0,745 ± 0,013</b>	<b>12,96 ± 0,76</b>

#### 5.2.2.6. Velocidade da Esteira de 160 cm/min

Os resultados dos parâmetros elétricos das células solares com a difusão de alumínio na velocidade de 160 cm/min são comparados na Tabela 5.8 e Figuras 5.22 e 5.23.

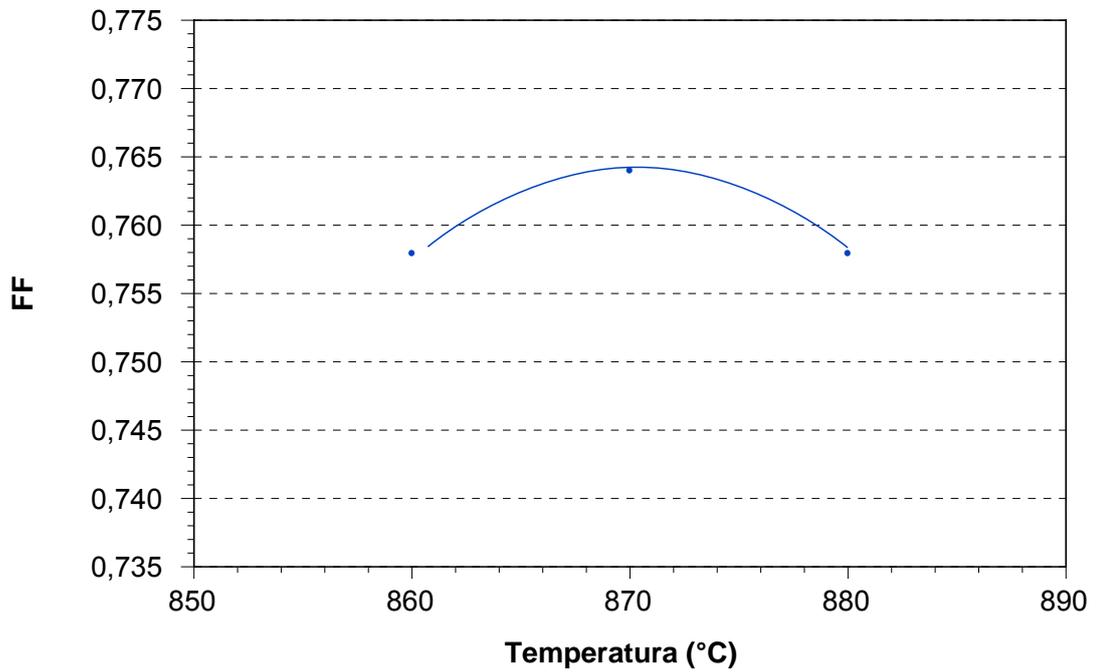


(a)

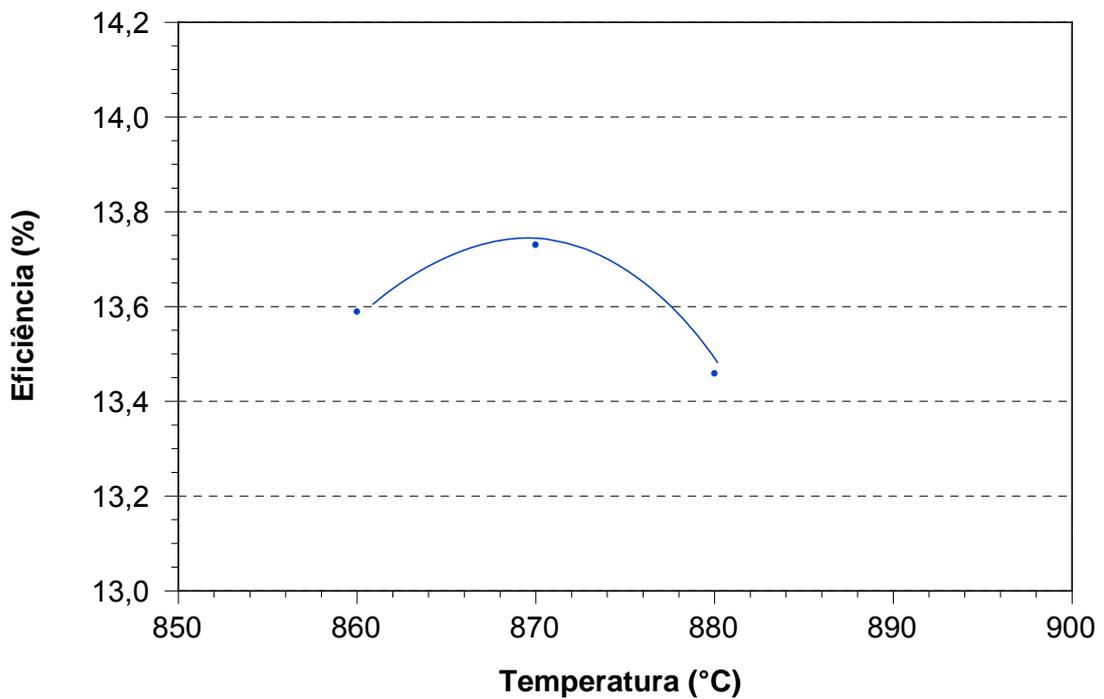


(b)

Figura 5.20. (a) Tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ), (b) densidade de corrente elétrica de curto-circuito ( $J_{sc}$ ), em função da temperatura de queima ( $T_Q$ ) para a velocidade da esteira de 150 cm/min durante a difusão de Al.



(a)



(b)

Figura 5.21. (a) fator de forma (FF), (b) eficiência ( $\eta$ ) em função da temperatura de queima ( $T_Q$ ) para a velocidade da esteira de 150 cm/min durante a difusão de Al.

Nota-se que para todas as temperaturas de queima das pastas a eficiência média é de 13,5 %. Ao contrario do que foi concluído para  $V_{E-D}$  de 150 cm/min, não foi verificada uma redução dos parâmetros elétricos das células solares para maior temperatura de queima.

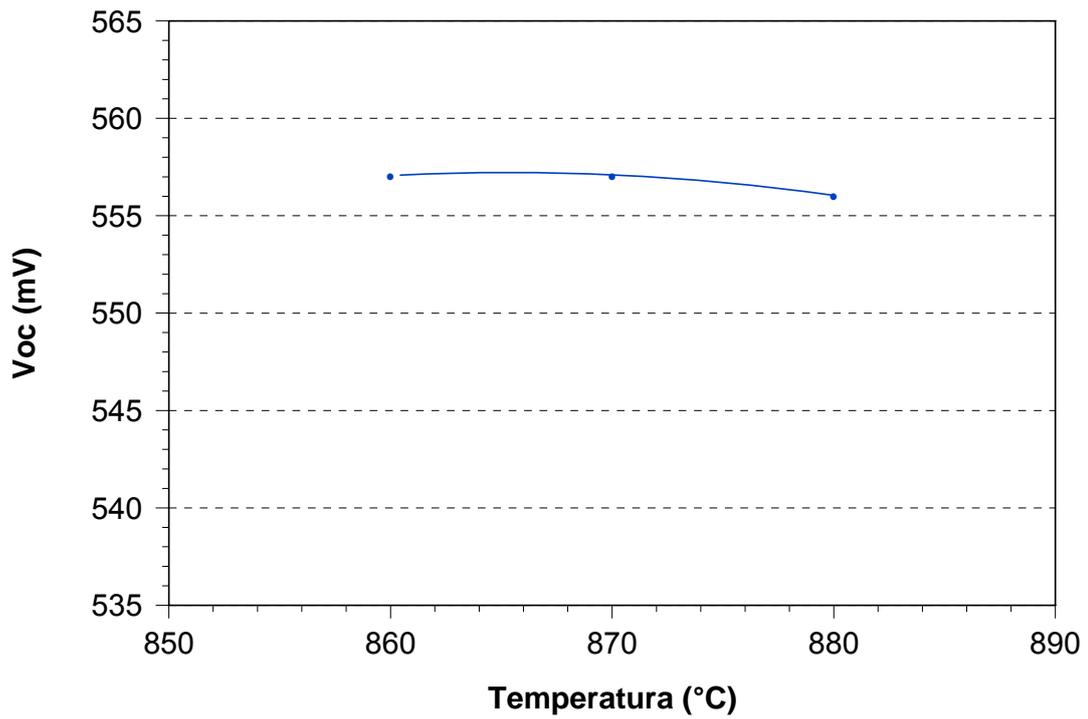
Os melhores resultados obtidos na velocidade da esteira de 160 cm/min foram os que apresentam temperatura de queima de 860 °C.

Tabela 5.8 Tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ), densidade de corrente de curto-circuito ( $J_{sc}$ ), fator de forma (FF), eficiência ( $\eta$ ) em função da temperatura de queima ( $T_Q$ ) para processo com a velocidade da esteira de 160 cm/min.

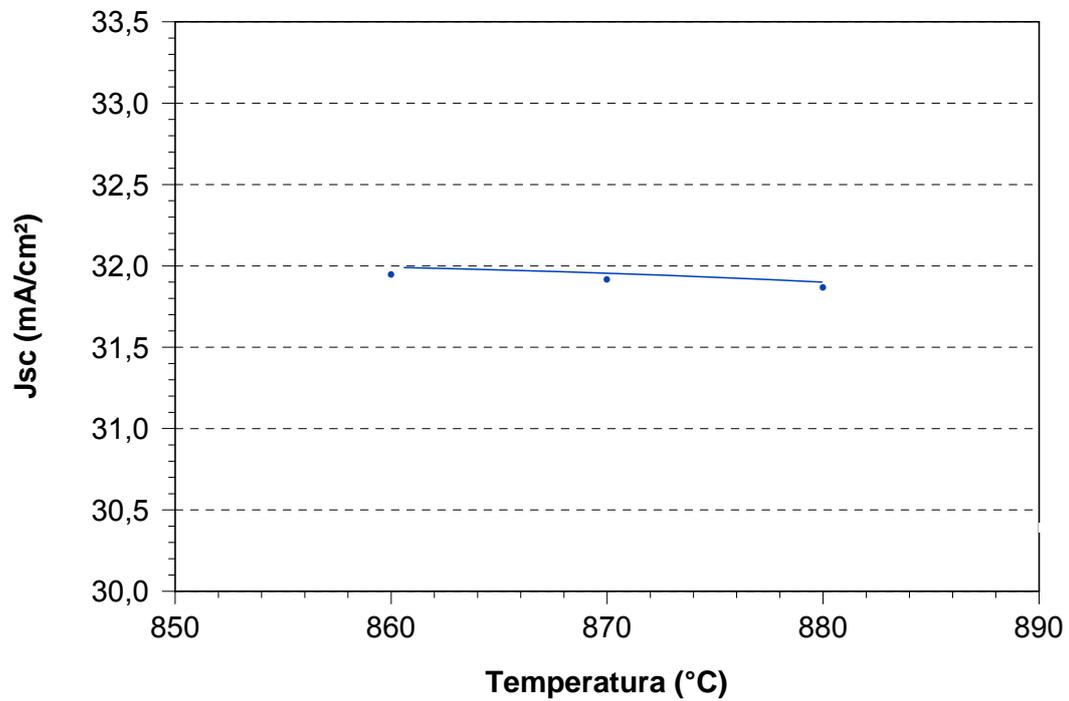
$T_Q$ (°C)	Célula	$V_{oc}$ (mV)	$J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	FF	$\eta$ (%)
860	30/10 - L10	555	32,2	0,756	13,5
	30/10 - L11	555	32,2	0,758	13,5
	30/10 - L12	553	32,3	0,749	13,3
	17/10- L10	558	31,9	0,769	13,7
	17/10- L11	557	31,9	0,765	13,6
	<b>Média</b>	<b>556 ± 2</b>	<b>32,1 ± 0,2</b>	<b>0,759 ± 0,008</b>	<b>13,55 ± 0,12</b>
870	30/10 - L13	554	32,2	0,755	13,4
	30/10 - L14	553	32,8	0,753	13,4
	30/10 - L15	553	32,2	0,756	13,5
	17/10- L13	557	31,9	0,763	13,6
	17/10- L14	557	31,9	0,766	13,6
	17/10- L15	558	31,8	0,768	13,6
<b>Média</b>	<b>555 ± 2</b>	<b>32,07 ± 0,17</b>	<b>0,760 ± 0,006</b>	<b>13,54 ± 0,10</b>	
880	30/10 - L16	553	32,3	0,757	13,5
	30/10 - L17	551	32,2	0,747	13,2
	30/10- L18	552	32,3	0,759	13,6
	17/10- L16	554	31,9	0,755	13,4
	17/10- L18	556	31,8	0,766	13,6
	<b>Média</b>	<b>554 ± 2</b>	<b>32,12 ± 0,24</b>	<b>0,757 ± 0,007</b>	<b>13,46 ± 0,14</b>

### 5.2.3. Análise da Influência da Velocidade da Esteira

Nas Figuras 5.24 e 5.25 compara-se a influência da velocidade da esteira nas características médias das células solares processadas com difusão de Al em forno

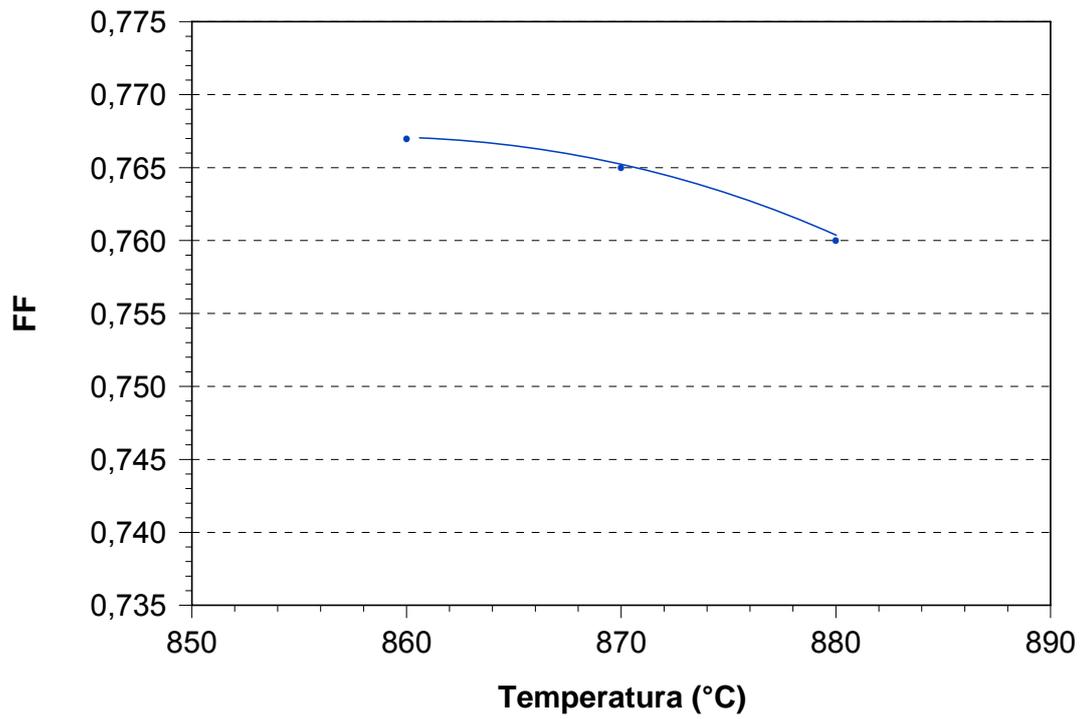


(a)

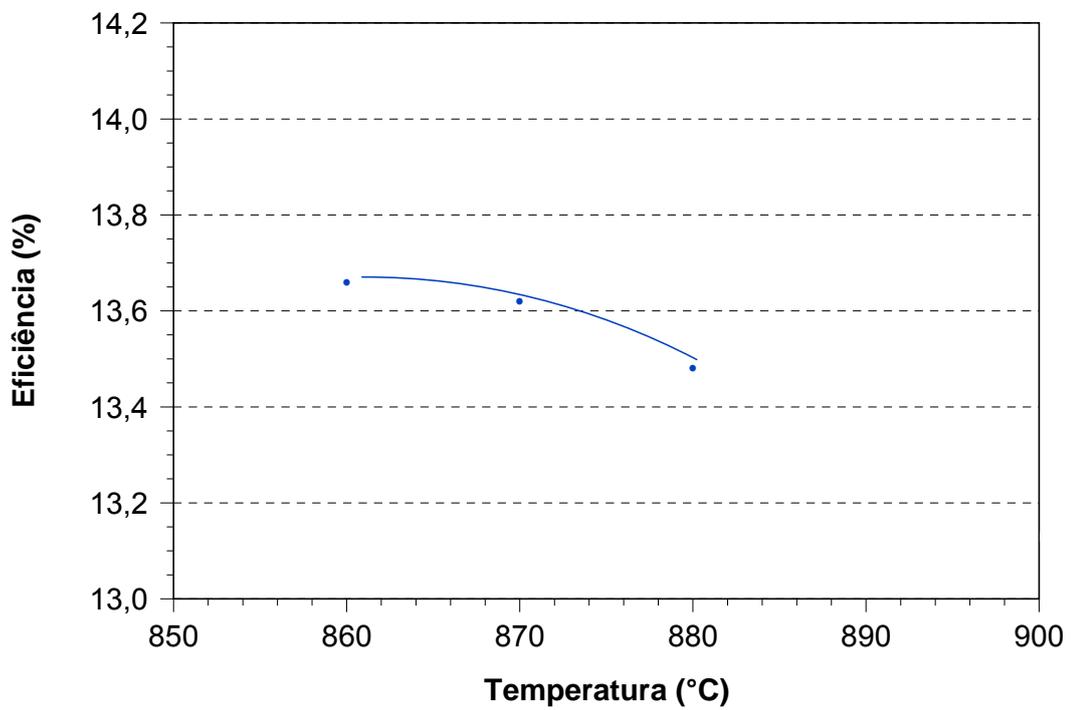


(b)

Figura 5.22. (a) Tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ), (b) densidade de corrente elétrica de curto-circuito ( $J_{sc}$ ), em função da temperatura de queima ( $T_Q$ ) para a velocidade da esteira de 160 cm/min durante a difusão de Al.



(a)



(b)

Figura 5.23. (a) Fator de forma (FF), (b) eficiência ( $\eta$ ) em função da temperatura de queima ( $T_Q$ ) para a velocidade da esteira de 160 cm/min durante a difusão de Al.

de esteira, otimizada experimentalmente para diferentes temperaturas de queima das pastas de metalização.

Verifica-se que somente para a  $T_Q = 870\text{ }^\circ\text{C}$  a velocidade da esteira influencia na Voc. Neste caso, a Voc aumenta com a  $V_{E-D}$ . Os maiores valores deste parâmetro ocorrem na temperatura de  $870\text{ }^\circ\text{C}$  e  $880\text{ }^\circ\text{C}$  e observa-se que a Voc diminuiu com o aumento da temperatura de queima das pastas.

Da Figura 5.24-b nota-se que a Jsc diminuiu com o aumento da velocidade da esteira durante o processo de difusão de Al. Este efeito é mais intenso para as maiores temperaturas de queima das pastas.

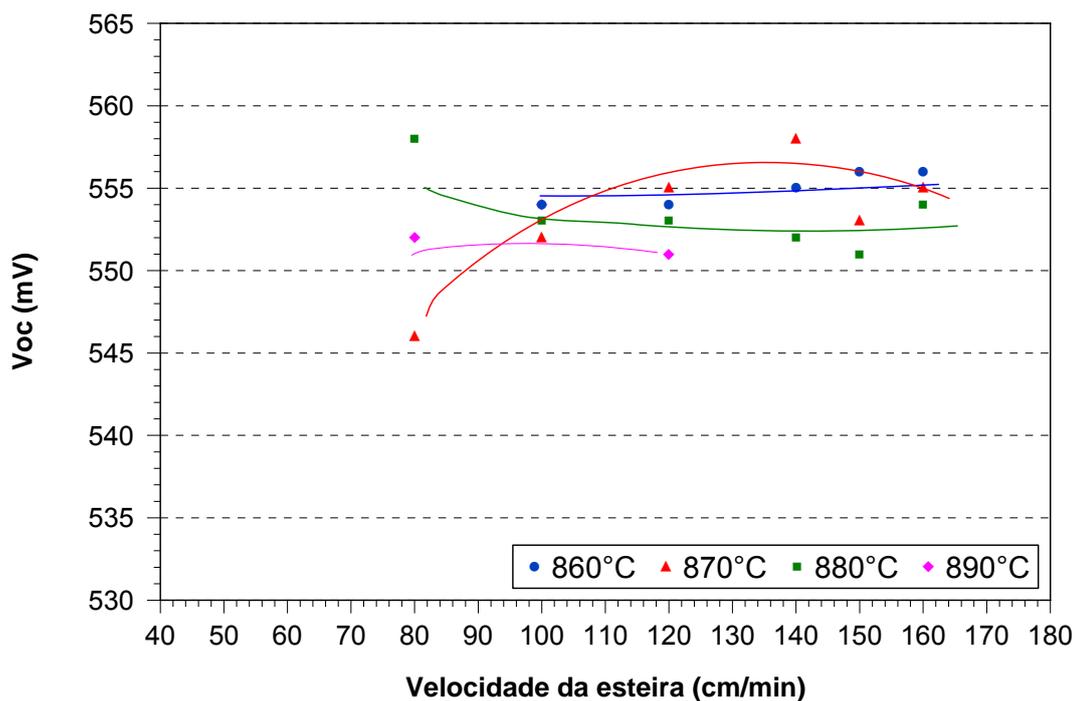
O fator de forma também diminuiu com o aumento da  $V_{E-D}$ . Os melhores valores são encontrados para a velocidade da esteira menor que  $120\text{ cm/min}$  e temperatura de queima inferior a  $880\text{ }^\circ\text{C}$ , como apresenta a Figura 5.25 (a).

A combinação da influência da  $V_{E-D}$  e  $T_Q$  na Voc, Jsc e FF resulta no comportamento da eficiência das células solares. Observa-se que a velocidade da esteira de  $120\text{ cm/min}$  resulta na maior eficiência para todas as temperaturas de queima, com exceção de  $T_Q = 890\text{ }^\circ\text{C}$ . Neste caso, a melhor  $V_{E-D}$  é inferior a  $110\text{ cm/min}$ . Portanto, conclui-se que a velocidade da esteira durante o processo de difusão de Al deve ser próxima a  $120\text{ cm/min}$  e a temperatura de queima das pastas de  $860\text{ }^\circ\text{C}$ .

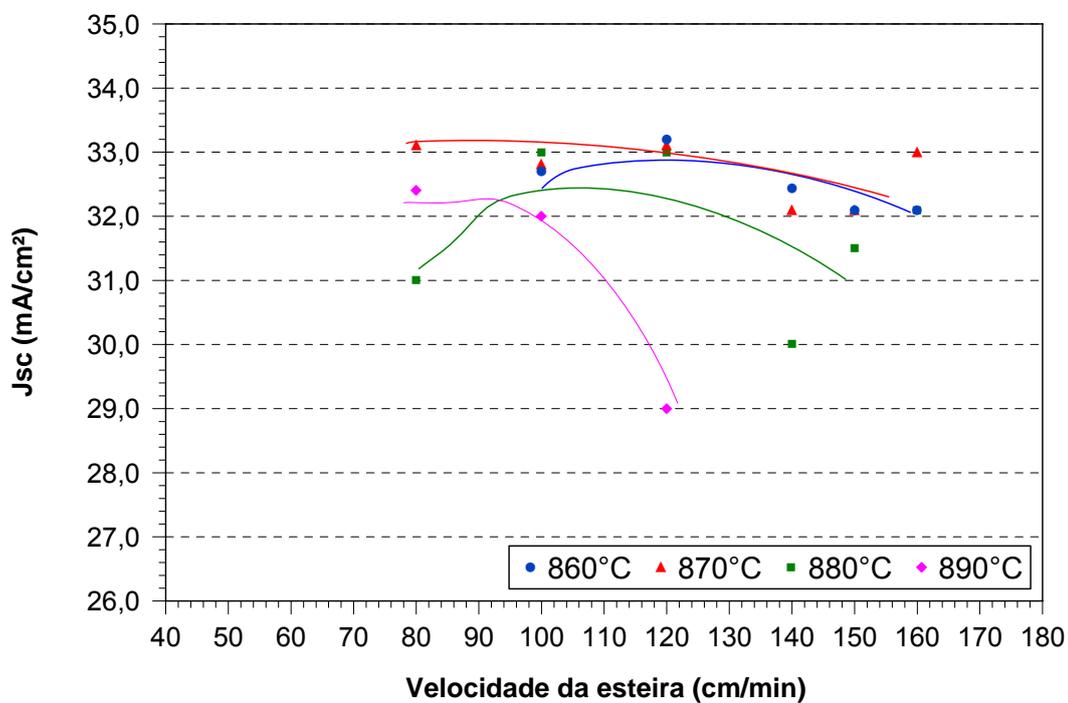
#### **5.2.4. Análise dos Melhores Resultados**

Nas Tabelas 5.9 a 5.13 apresentam-se as características elétricas das melhores células solares processadas com difusão em forno de esteira a  $900\text{ }^\circ\text{C}$  e difusão de fósforo em forno convencional a  $875\text{ }^\circ\text{C}$  para diferentes valores da velocidade da esteira durante a difusão de Al.

Verifica-se que para a difusão de Al com velocidade da esteira de  $80\text{ cm/min}$ , para as três temperaturas de queima das pastas de metalização, a eficiência é superior a  $13,5\%$ , como melhor resultado encontrado para a  $T_Q = 890\text{ }^\circ\text{C}$ .

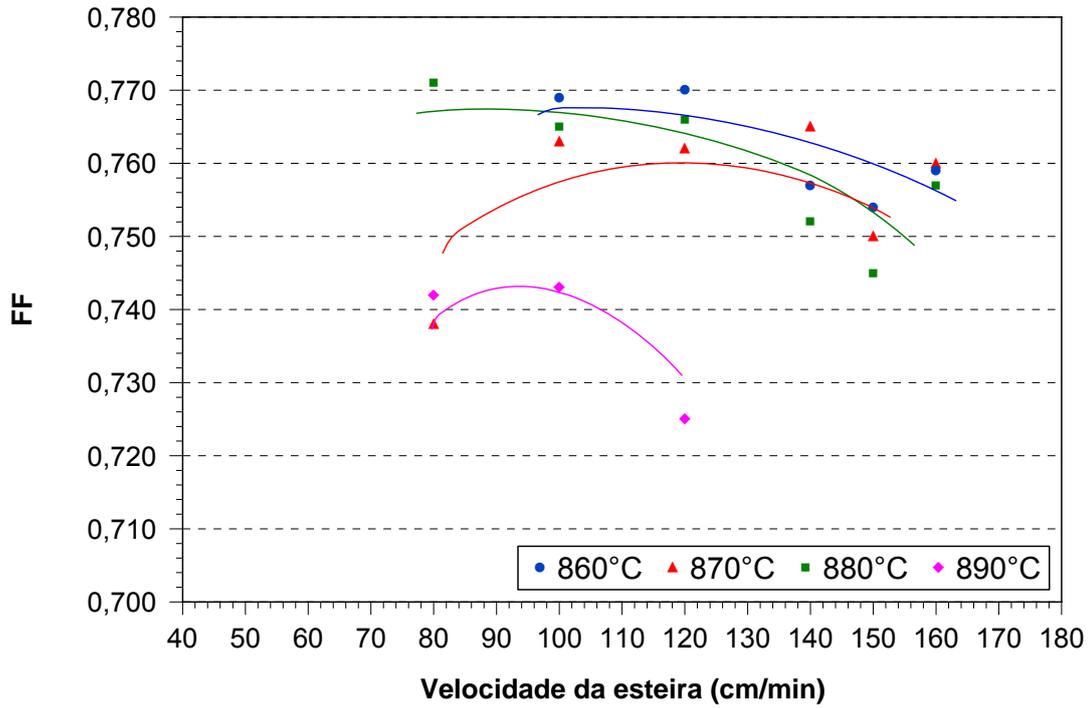


(a)

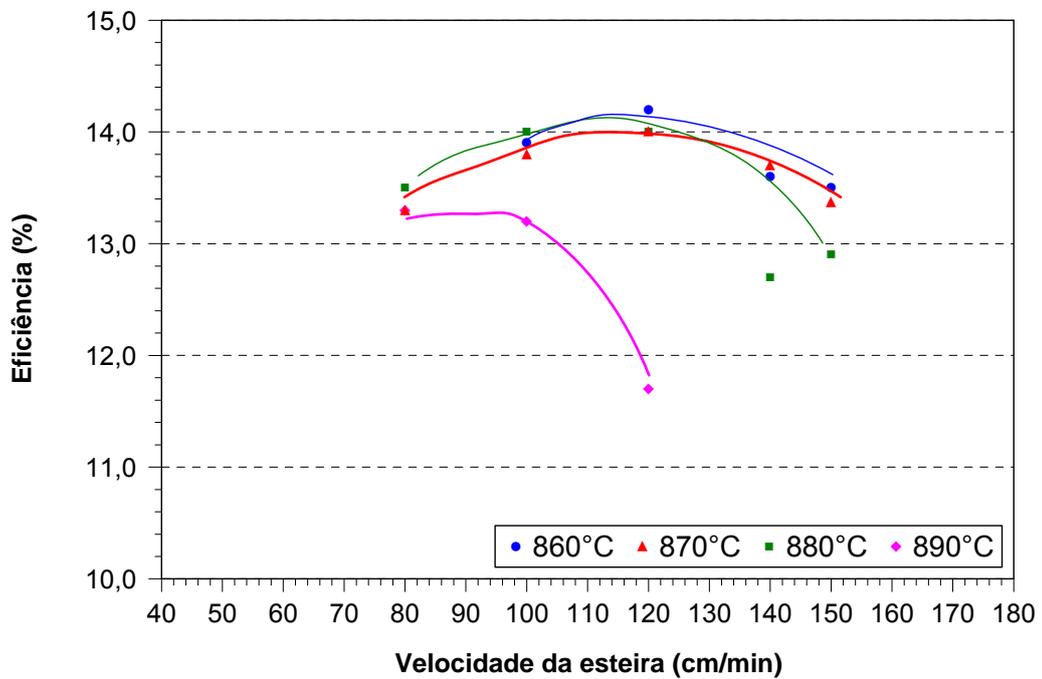


(b)

Figura 5.24. (a) Tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ) e (b) densidade de corrente elétrica de curto-circuito ( $J_{sc}$ ) em função da velocidade da esteira durante o processo de difusão de Al depositado por evaporação para diferentes valores da temperatura de queima das pastas de metalização.



(a)



(b)

Figura 5.25. (a) Fator de forma (FF) e (b) eficiência ( $\eta$ ) em função da velocidade da esteira durante o processo de difusão de Al depositado por evaporação para diferentes valores da temperatura de queima das pastas de metalização.

A eficiência média de 14,0 % foi alcançada para a  $V_{E-D} = 100$  cm/min, devido principalmente ao aumento no FF e na  $J_{sc}$ , como mostra a Tabela 5.10. O maior valor da eficiência ocorre para  $T_Q = 880$  °C.

Tabela 5.9 Tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ), densidade de corrente elétrica de curto-circuito ( $J_{sc}$ ), fator de forma (FF) e eficiência ( $\eta$ ) em função da temperatura de queima das pastas de metalização ( $T_Q$ ) para a velocidade da esteira para a difusão de Al de 80 cm/min.

$T_Q$ (°C)	Célula	$V_{oc}$ (mV)	$J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	FF	$\eta$ (%)
880	30/09-L1	558	31,0	0,771	13,5
890	30/09-L2	558	33,0	0,753	13,9
900	30/09- L3	557	33,1	0,738	13,6
	30/09- L4	554	32,8	0,742	13,5
	<b>Média</b>	<b>555± 2</b>	<b>32,95 ± 0,24</b>	<b>0,74 ± 0,03</b>	<b>13,55 ± 0,10</b>

Tabela 5.10 Tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ), densidade de corrente elétrica de curto-circuito ( $J_{sc}$ ), fator de forma (FF) e eficiência ( $\eta$ ) em função da temperatura de queima das pastas de metalização ( $T_Q$ ) para a velocidade da esteira para a difusão de Al de 100 cm/min.

$T_Q$ (°C)	Célula	$V_{oc}$ (mV)	$J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	FF	$\eta$ (%)
860	30/09- L5	553	32,6	0,769	13,89
	30/09-L6	554	32,8	0,770	14,02
	<b>Média</b>	<b>554 ± 0</b>	<b>32,75 ± 0,14</b>	<b>0,769 ± 0,001</b>	<b>13,95 ± 0,09</b>
870	30/09- L8	553	33,0	0,769	14,03
	30/09- L9	552	32,9	0,764	13,87
	<b>Média</b>	<b>552 ± 1</b>	<b>33, 7 ± 0,4</b>	<b>0,763 ± 0,005</b>	<b>13,82 ± 0,17</b>
880	30/09-L10	554	33,1	0,767	14,08
	30/09- L11	553	33,1	0,762	13,95
	<b>Média</b>	<b>553 ± 1</b>	<b>33 ± 0</b>	<b>0,765 ± 0,004</b>	<b>14,02 ± 0,09</b>

Os resultados das células solares processadas para a  $V_{E-D}$  de 120 cm/min são apresentados na Tabela 5.11. Constata-se que o aumento da velocidade da esteira, resulta em células solares com eficiência média de 14,4 %, superior ao resultado para  $V_{E-D}$  de 100 cm/min e ocorre para a temperatura de queima das pastas de metalização de 870 °C. O aumento na eficiência foi provocado pelo aumento na  $J_{sc}$ .

Tabela 5.11 Tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ), densidade de corrente elétrica de curto-circuito ( $J_{sc}$ ),

fator de forma (FF) e eficiência ( $\eta$ ) em função da temperatura de queima das pastas de metalização ( $T_Q$ ) para a velocidade da esteira para a difusão de Al de 120 cm/min.

$T_Q$ (°C)	Célula	Voc (mV)	Jsc (mA/cm <sup>2</sup> )	FF	$\eta$ (%)
860	30/09-L11	554	33,0	0,768	14,0
	30/09-L12	553	33,3	0,768	14,2
	<b>Média</b>	<b>554 ± 1</b>	<b>33,20 ± 0,20</b>	<b>0,77 ± 0</b>	<b>14,13 ± 0,11</b>
870	30/09-L13	555	33,4	0,770	14,3
	30/09-L14	555	33,9	0,767	14,4
	<b>Média</b>	<b>555 ± 0</b>	<b>33,7 ± 0,4</b>	<b>0,768 ± 0,002</b>	<b>14,36 ± 0,11</b>
880	30/09-L15	554	33,1	0,770	14,1
	30/09-L16	552	33,0	0,761	13,9
	<b>Média</b>	<b>553 ± 1</b>	<b>33,05 ± 0,07</b>	<b>0,766 ± 0,006</b>	<b>14,00 ± 0,17</b>

Quando a velocidade da esteira foi aumentada para 150 cm/min alcançou-se a eficiência média de 15,1 % para a  $T_Q = 880$  °C, conforme mostra a Tabela 5.12. Também nota-se que para a temperatura de queima superior a este valor, a eficiência começa a diminuir. Observa-se que todos os parâmetros elétricos das células solares melhoraram, principalmente a tensão de circuito aberto.

Tabela 5.12 Tensão de circuito aberto (Voc), densidade de corrente elétrica de curto-circuito (Jsc), fator de forma (FF) e eficiência ( $\eta$ ) em função da temperatura de queima das pastas de metalização ( $T_Q$ ) para a velocidade da esteira para a difusão de Al de 150 cm/min.

$T_Q$ (°C)	Célula	Voc (mV)	Jsc (mA/cm <sup>2</sup> )	FF	$\eta$ (%)
870	08/10- L2	577	34,1	0,771	15,2
880	08/10- L3	578	34,	0,772	15,2
	08/10- L4	577	33,1	0,771	15,1
	<b>Média</b>	<b>578 ± 1</b>	<b>33,9 ± 0,1</b>	<b>0,771 ± 0,001</b>	<b>15,1 ± 0,1</b>
890	08/10- L5	578,5	34,1	0,763	15,05
	08/10- L6	577,8	33,9	0,758	14,37
	<b>Média</b>	<b>578 ± 1</b>	<b>34,03 ± 12</b>	<b>0760 ± 0,003</b>	<b>14,96 ± 0,13</b>
900	08/10- L7	577,9	33,7	0,749	14,61
	08/10- L8	577,2	33,6	0,741	14,37
	<b>Média</b>	<b>578 ± 1</b>	<b>33,67 ± 0,10</b>	<b>0,745 ± 0,006</b>	<b>14,49 ± 0,17</b>

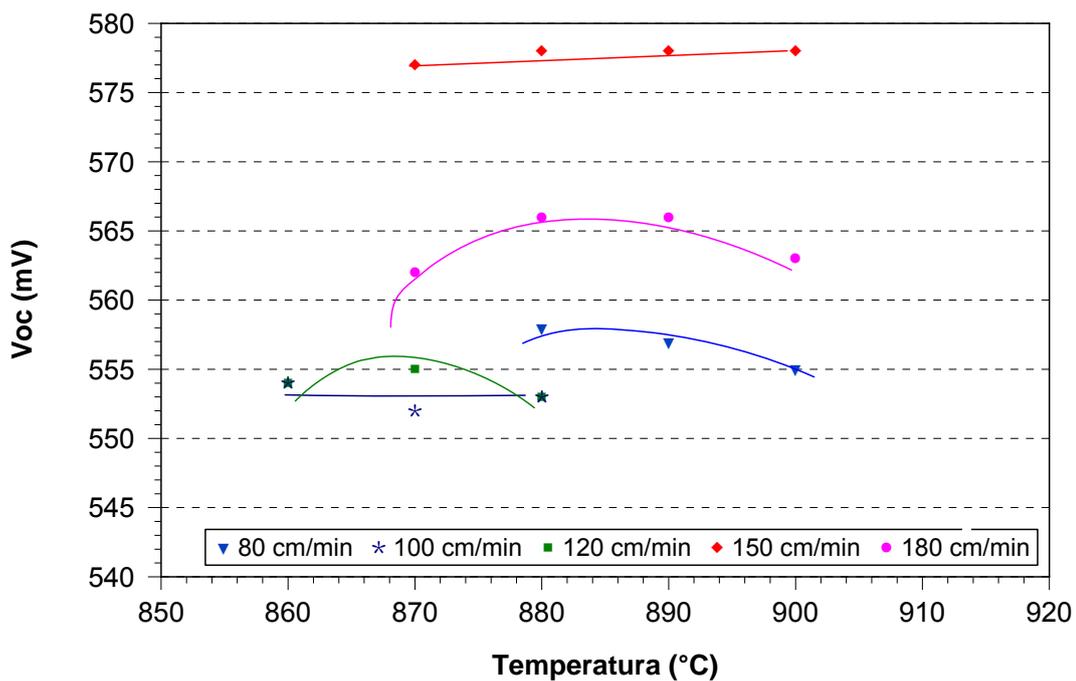
Quando a velocidade da esteira foi aumentada para 180 cm/min observa-se que a eficiência média é de 14,5 % para a temperatura de queima inferiores a 900 °C, como se pode ver na Tabela 5.13.

Tabela 5.13. Tensão de circuito aberto (Voc), densidade de corrente elétrica de curto-circuito (Jsc), fator de forma (FF) e eficiência ( $\eta$ ) em função da temperatura de queima das pastas de metalização ( $T_Q$ ) para a velocidade da esteira para a difusão de Al de 180 cm/min.

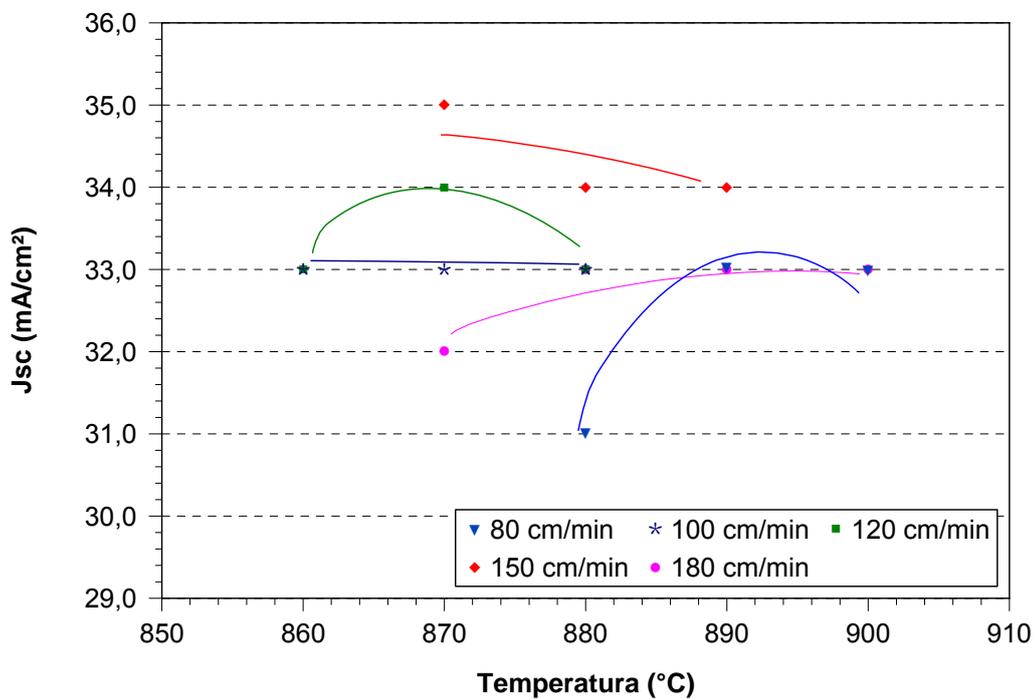
$T_Q$ (°C)	Célula	Voc (mV)	Jsc (mA/cm <sup>2</sup> )	FF	$\eta$ (%)
870	08/10- L9	562	32,2	0,777	14,1
	08/10- L10	561	33,0	0,766	14,2
	<b>Média</b>	<b>562 ± 0</b>	<b>32,6 ± 0,6</b>	<b>0,772 ± 0,008</b>	<b>14,13 ± 0,10</b>
880	08/10- L11	565	33,3	0,768	14,4
	08/10- L12	567	33,5	0,762	14,4
	<b>Média</b>	<b>566 ± 1</b>	<b>33,40 ± 0,17</b>	<b>0,765 ± 0,005</b>	<b>14,46 ± 0,02</b>
890	08/10- L13	567	33,4	0,755	14,3
	08/10- L13	565	33,3	0,757	14,5
	<b>Média</b>	<b>556 ± 2</b>	<b>33,34 ± 0,06</b>	<b>0,756 ± 0,002</b>	<b>14,28 ± 0,04</b>
900	08/10- L15	561	32,4	0,725	13,2
	08/10- L16	565	33,4	0,727	13,7
	<b>Média</b>	<b>563 ± 3</b>	<b>32,9 ± 0,7</b>	<b>0,726 ± 0,001</b>	<b>13,46 ± 0,39</b>

Nas Figuras 5.26 e 5.27 compara-se a tensão de circuito aberto, a densidade de corrente de curto-circuito, o fator de forma e a eficiência em função da temperatura de queima das pastas de metalização para a velocidade da esteira durante o processo de difusão de 80 cm/min até 180 cm/min. Observa-se que a maior Voc e Jsc ocorre para a  $V_{E-D}$  de 150 cm/min e que para valores da velocidade da esteira intermediários há uma temperatura de queima ótima, que depende da  $V_{E-D}$ .

Da Figura 5.27-a pode-se notar que o fator de forma diminui com o aumento da temperatura de queima das pastas de metalização para todas as velocidades da esteira. Os melhores resultados foram encontrados para a  $T_Q$  de 860 °C e 870 °C, com redução significativa a partir da temperatura de 880 °C. A análise da eficiência possibilita concluir que existe uma temperatura de queima ótima para cada velocidade da esteira durante o processo de difusão de Al.

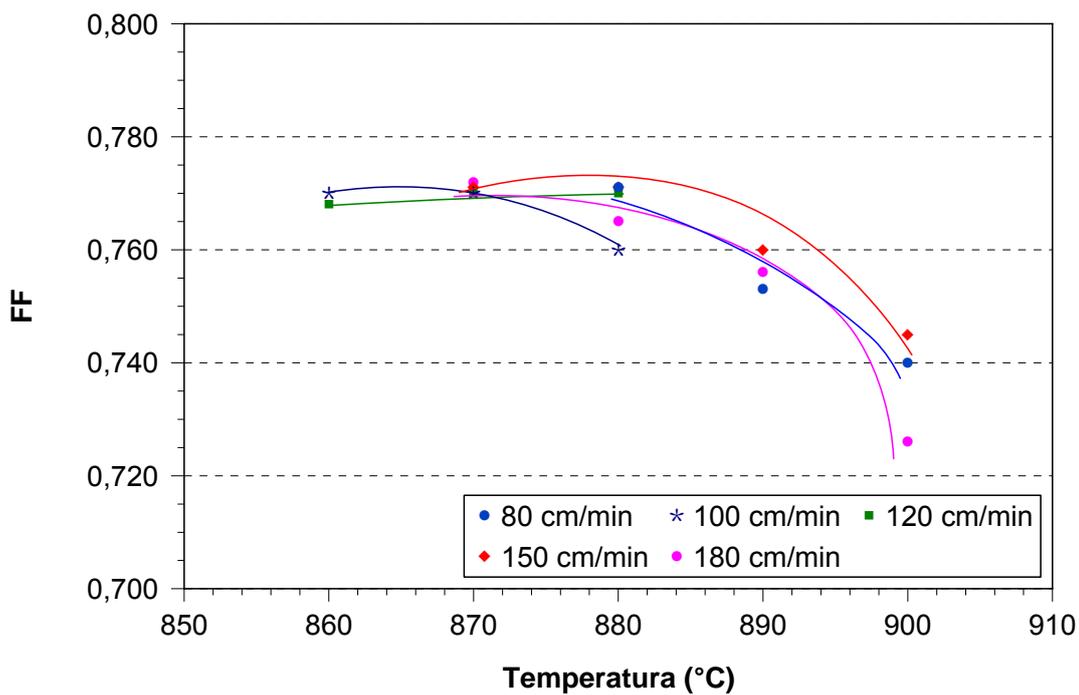


(a)

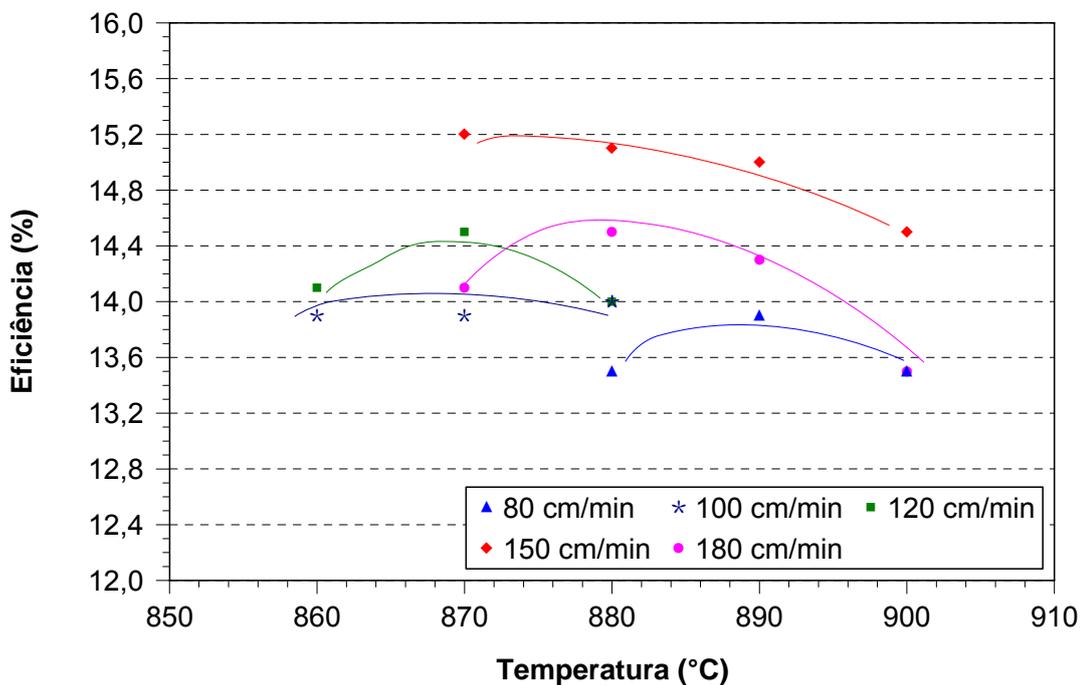


(b)

Figura 5.26. (a) Tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ) e (b) densidade de corrente elétrica de curto-circuito ( $J_{sc}$ ) em função da temperatura de queima das pastas de metalização para diferentes valores da velocidade da esteira durante o processo de difusão de Al depositado por evaporação.



(a)



(b)

Figura 5.27. (a) Fator de forma (FF) e (b) eficiência ( $\eta$ ) em função da temperatura de queima das pastas de metalização para diferentes valores da velocidade da esteira durante o processo de difusão de Al depositado por evaporação.

Os melhores resultados ocorrem para velocidades da esteira maiores que 120 cm/min e temperatura de queima das pastas de metalização inferiores a 880 °C. Nesta análise, para a velocidade da esteira de 120 cm/min a melhor  $T_Q$  é de 870 °C. Novamente fica evidente que a maior eficiência é alcançada com a velocidade da esteira de 150 cm/min e temperatura de queima de 870 °C.

Na Tabela 5.14 comparam-se as melhores células solares fabricadas com o processo de difusão de Al em forno de esteira com a melhor célula solar com difusão de Al em forno convencional. A máxima eficiência de 15,2 % está próxima a eficiência da melhor célula solar processada com difusão de Al em forno convencional, com diferença de 0,6 % absoluto. A principal diferença entre os dois dispositivos está na  $J_{sc}$  e  $V_{oc}$ . Em relação às três melhores células com difusão em forno de esteira, a eficiência média é superior a 14,3 %, valor similar à média mundial de células industriais. Cabe comentar que o processo de difusão no forno de esteira pode proporcionar uma redução no custo de fabricação.

Tabela 5.14. Características elétricas das melhores células solares fabricadas com o processo de difusão de Al em forno de esteira e em forno convencional.

Célula	$V_{oc}$ (mV)	$J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	FF	$\eta$ (%)
30/09-L14	555	33,9	0,767	14,4
08/10-L3	578	34,0	0,771	15,2
08/10-L13	567	33,4	0,755	14,3
Forno Conv.	586	35,4	0,760	15,8

### 5.2.5. Análise Bidimensional do Processo

Para avaliar parâmetros bidimensionais das células solares desenvolvidas com difusão de fósforo a 875°C e de alumínio com velocidade da esteira de 130 cm/min temperatura de queima de 870 °C, foi utilizado o equipamento WT-2000PV da *Semilab*, ilustrado na Figura 5.28. Este equipamento permitiu a caracterização de amostras de silício, por meio da medição bi-dimensional da resistividade do material, da refletância e corrente elétrica de curto circuito para radiação incidente com  $\lambda$  de 973 nm, 953 nm, 845 nm e 648 nm e do tempo de vida dos portadores minoritários

por meio da reflexão de microondas. É uma ferramenta útil para a inspeção da lâmina, o controle da qualidade e a monitoração de processo na fabricação de célula solar.



Figura 5.28. Equipamento WT-2000PV da *Semilab*.

A primeira lâmina foi retirada após o texturização e foi medida a resistividade, a refletância e o tempo de vida. Na Figura 5.29 apresenta-se o resultado da resistividade de base da lâmina após o texturado onde o valor médio é de  $19 \Omega \cdot \text{cm}$ . A variação é de  $15,8 \Omega \cdot \text{cm}$  a  $20,7 \Omega \cdot \text{cm}$  mostrando a uniformidade na resistividade de base do substrato de Si-Cz tipo p. Nota-se que a resistividade de base é menor nas bordas da lâmina em relação à região central.

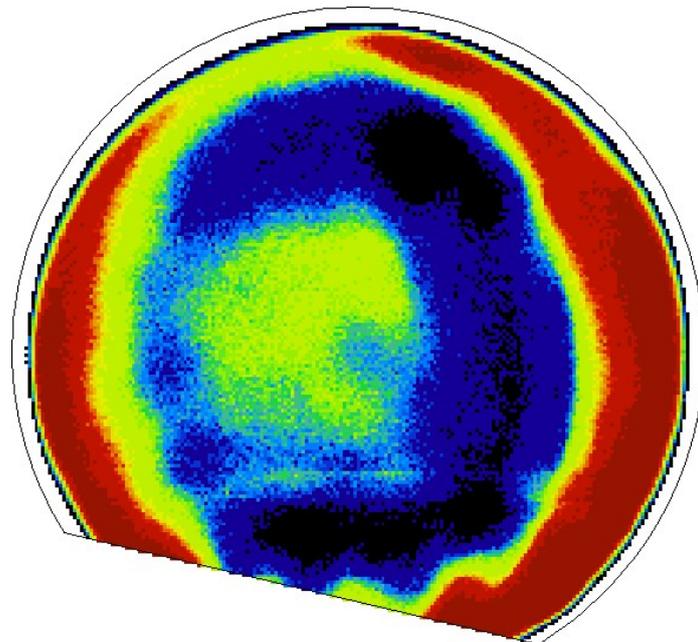


Figura 5.29. Resistividade de base bi-dimensional da lâmina de Si-Cz.

A refletância foi medida para quatro comprimentos de onda. Na Figura 5.30- (a) apresenta-se o resultado para o comprimento de ( $\lambda$ ) onda de 973 nm cujo resultado médio da refletância é de 8,0 %. A variação é de 7,8 % a 8,3 % demonstrando a uniformidade na refletância, após a texturação.

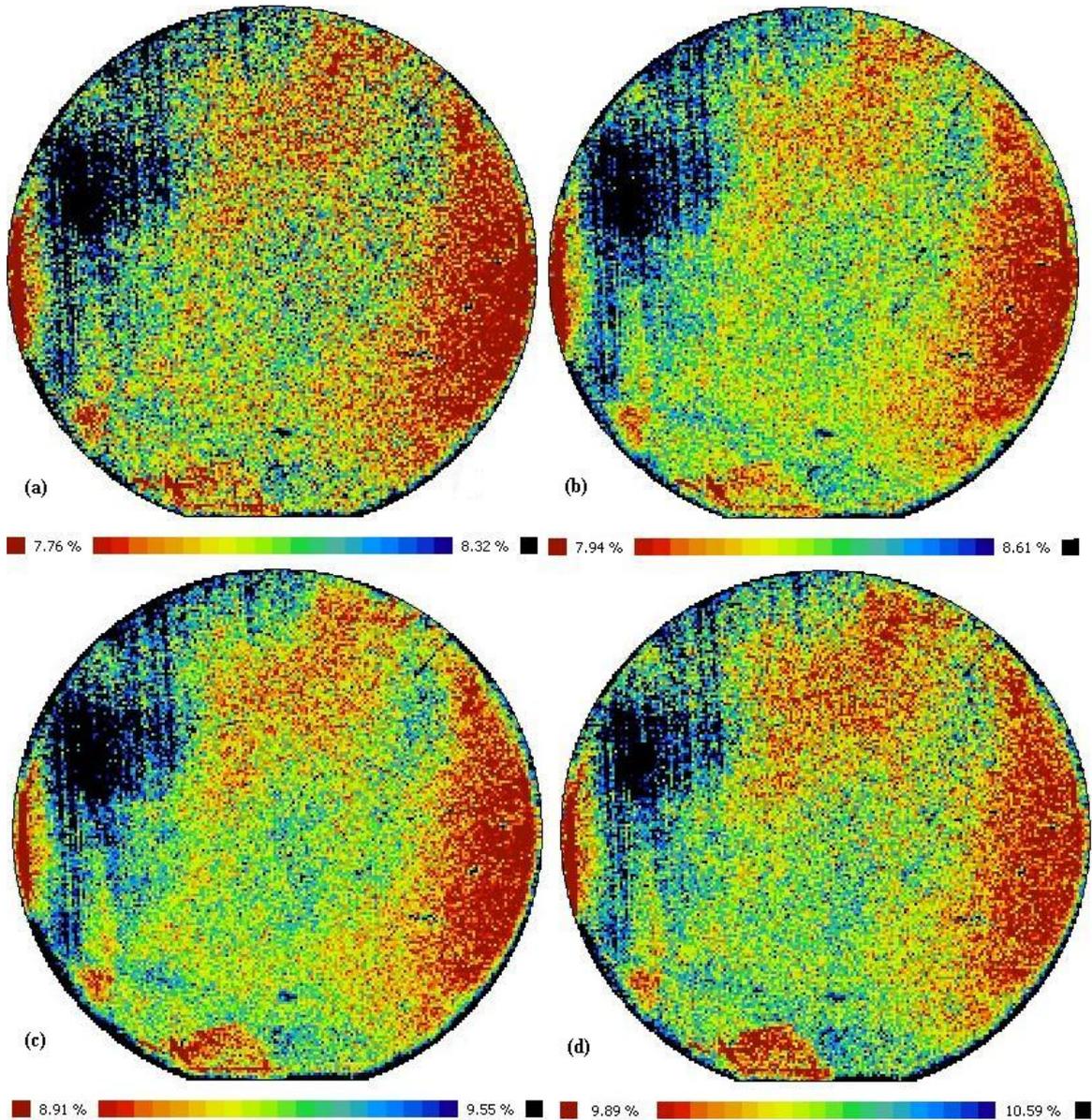


Figura 5.30. Refletância no comprimento de onda (a) 973nm, (b) 953 nm, (c) 845 nm, (d) 648 nm após o processo de texturação da lâmina de Si-Cz.

Na Figura 5.30 (b) mostra-se o mesmo resultado para comprimento de onda de 953 nm. Neste caso, o valor médio de refletância é de 8,3 %. A variação de 5,2 % a 8,6 % é maior do que o resultado para o  $\lambda = 973$  nm.

A refletância média para  $\lambda$  é de 845 nm é de 9,2 % com a variação entre 8,9 % a 9,6 % como ilustra a Figura 5.30 (c).

O resultado encontrado para o comprimento de onda 648 nm mostrado na Figura 5.30 (d) é similar com o valor médio de 10,2 % e a variação entre 9,9 % a 10,6 %.

Constata-se que na borda a amostra possui uma maior refletância para os quatro comprimentos de onda e que refletância média aumenta com a diminuição do comprimento de onda.

A refletância para quatro comprimentos de onda também foi também medida após a deposição do filme AR. Na Figura 5.31 comparam-se os resultados da medição para os quatro  $\lambda$ .

Comparando os quatro mapas de refletância, constata-se que a refletância média diminui com a redução o comprimento de onda, ao contrário do que ocorre após a texturação. Este fato deve-se às características ópticas do filme AR. O valor médio para os comprimentos de onda de 973 nm, 953 nm, 845 nm e 648 nm é 2,7 %, 2,7 %, 2,5 % e 0,67 %, respectivamente. Também verifica-se a não uniformidade do filme AR, com maior refletância em uma determinada região.

A distribuição bi-dimemensional do tempo de vida dos portadores minoritários foi medida após o processo de texturação, oxidação e difusão com  $\text{POCl}_3$ . As amostras foram passivadas em solução de iodo e álcool etílico.

Na Figura 5.32 (a) mostra-se a distribuição do tempo de vida dos portadores minoritários após a texturação, obtendo-se valor médio de 301  $\mu\text{s}$  relativamente elevado para amostra de Si-Cz. Verificaram-se regiões com maior tempo de vida, com variação entre 110  $\mu\text{s}$  a 460  $\mu\text{s}$ , apresentando uma não uniformidade. Analisando o parâmetro nas bordas pode-se perceber um baixo tempo de vida nesta região porque nas bordas existem mais defeitos.

A Figura 5.32 (b) mostra o resultado da lâmina após a oxidação. O valor médio do tempo de vida é  $91 \mu\text{s}$ , portanto, pode-se concluir durante a oxidação para proteger uma face da lâmina da difusão de fósforo, ocorreu contaminação. A variação entre  $10 \mu\text{s}$  a  $210 \mu\text{s}$  é percentualmente maior do que o resultado apresentado na Figura 5.32 (a) e evidencia-se que a região central apresenta os maiores valores.

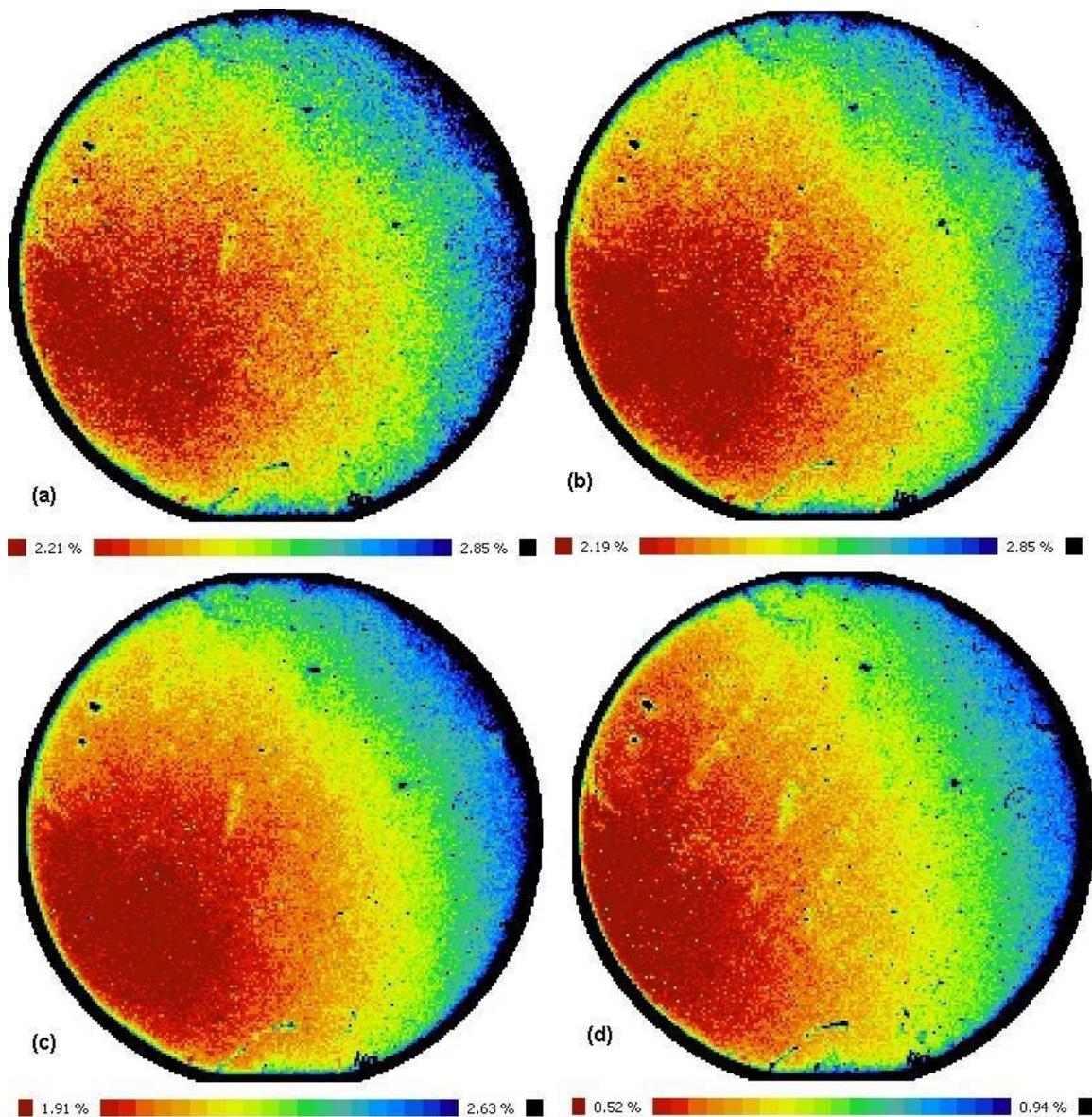


Figura 5.31 Refletância após a deposição do filme AR para  $\lambda$  de (a) 973 nm, (b) 953 nm, (c) 845 nm, (d) 648 nm.

Após a difusão de fósforo para avaliar o efeito da recombinação na região da junção pn, foi medido o tempo de vida da amostra passivada em solução de iodo e

álcool etílico. Na Figura 5.32 (c) apresenta-se o resultado. O valor médio do tempo de vida é de  $74 \mu\text{s}$  variando de  $57 \mu\text{s}$  a  $85 \mu\text{s}$ . Pode-se perceber que a região central da lâmina apresenta um maior tempo de vida.

Comparando a Figura 5.32 (c) com a Figura 5.32 (d), observa-se que após a retirada da junção pn com ataque químico CP4, o tempo de vida médio dos minoritários é de  $157 \mu\text{s}$  e os maiores valores deste parâmetro não se encontram na região central. Portanto pode-se concluir que a recombinação na região  $n^+$  provoca uma diminuição no tempo vida dos minoritários de  $83 \mu\text{s}$ .

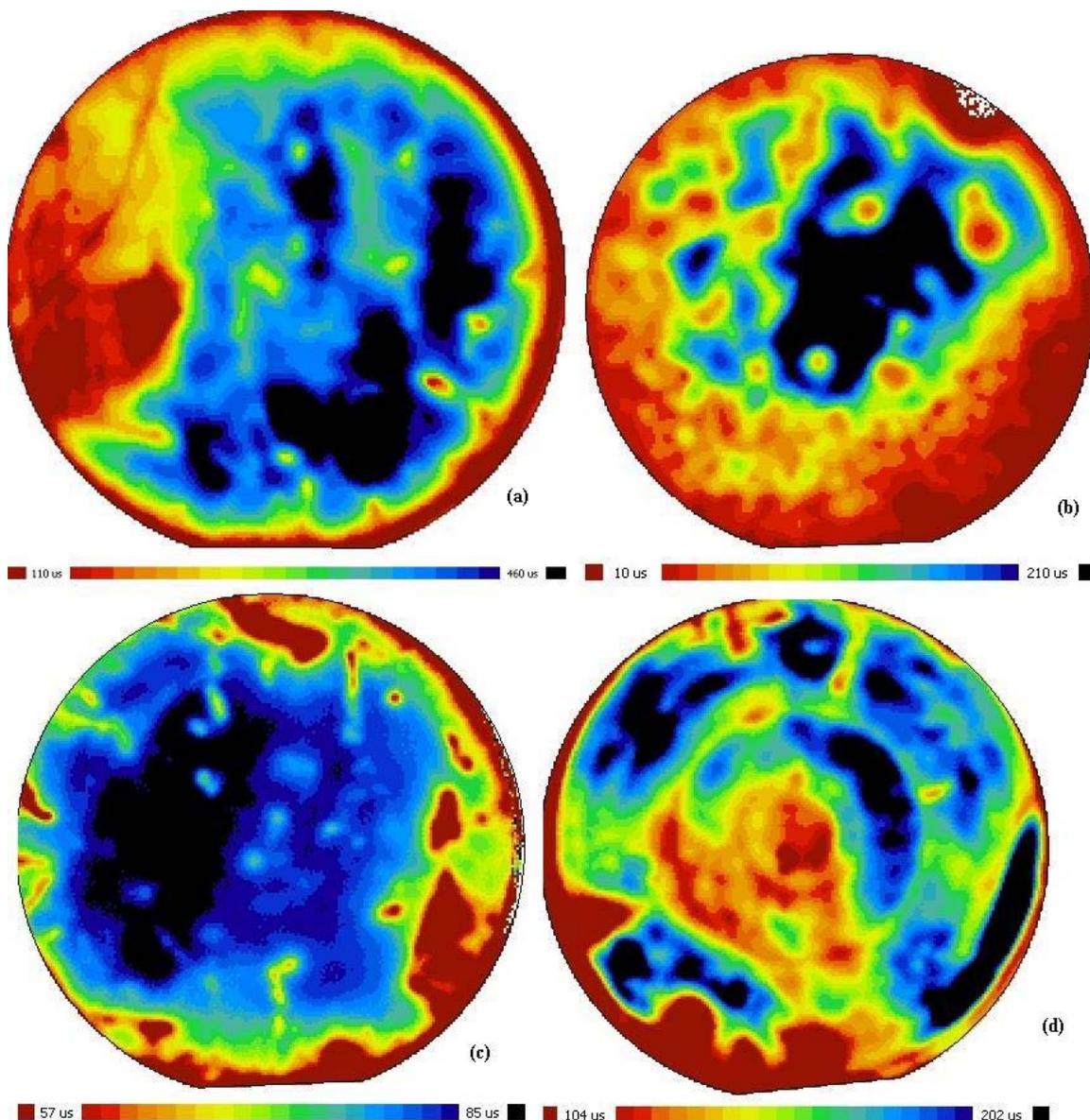


Figura 5.32. Distribuição bidimensional do tempo de vida dos portadores minoritários após o processo de (a) texturação, (b) oxidação, (c) difusão (com junção pn) e (d) difusão (sem junção).

Por fim, foi analisada a distribuição bi-dimensional da corrente de curto-circuito gerada pela célula solar, para radiação incidente nos quatro comprimentos de onda. Os resultados são apresentados na Figura 5.33.

A Figura 5.33 mostra os mapas da corrente elétrica de curto-circuito para quatro comprimentos de onda do feixe incidente. Para as regiões não metalizadas obtém-se uma ótima uniformidade.

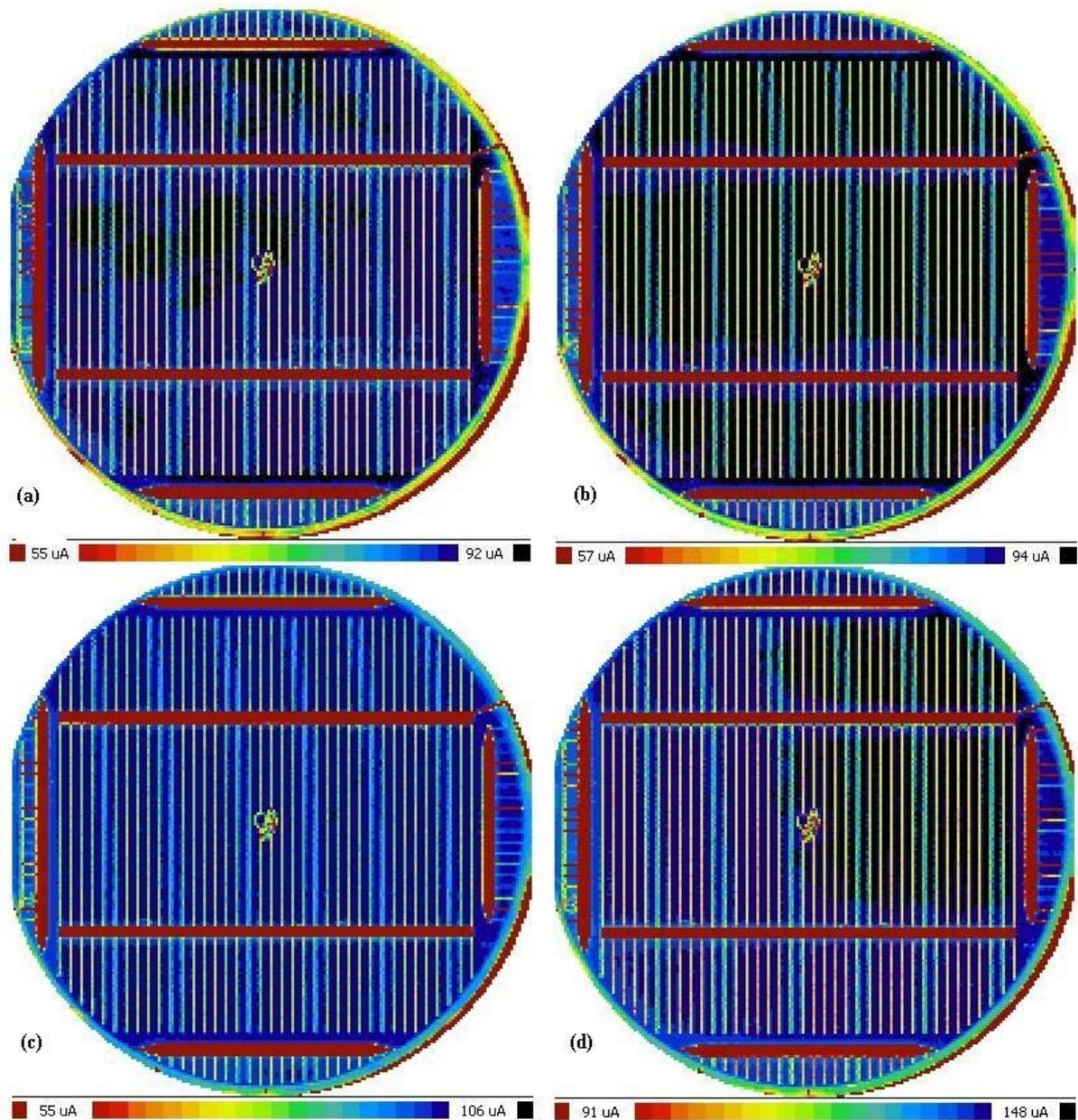


Figura 5.33. Corrente elétrica de curto-circuito da célula solar gerada para radiação laser com (a) 973 nm, (b) 953 nm, (c) 845 nm e (d) 648 nm.

## 6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Nesta dissertação foram desenvolvidas células solares com campo retrodifusor formado por alumínio evaporado e difundido em forno de esteira. Com o objetivo de avaliar a eficácia do campo retrodifusor foram desenvolvidos dois processos de fabricação de células solares em substrato, de silício monocristalino Cz, tipo p, com emissor n<sup>+</sup> formado por difusão de fósforo baseada em POCl<sub>3</sub>.

Primeiramente foi desenvolvido um processo de fabricação de células solares com campo retrodifusor com difusão de alumínio e queima de pasta metálica simultaneamente no forno de esteira. Foram implementados processos com difusão de fósforo a temperatura de 875 °C e a 900 °C. O objetivo da queima de pasta e difusão de Al simultaneamente no forno de esteira é reduzir passos do processo de fabricação de células solares e, conseqüentemente, reduzir o custo dos dispositivos.

Na difusão de fósforo a 900 °C, a resistência de folha ( $R_{\square}$ ) média obtida foi de 30  $\Omega/\square$ . Os melhores resultados ocorreram para as temperaturas de queima e difusão de Al simultâneas a 930 °C e a 960 °C, com eficiência média das células solares de 12,8 %. Para a  $T_{Q-D}$  de 960 °C o FF e a  $J_{sc}$  são ligeiramente maiores que a 930 °C. A máxima eficiência de 13,3 % foi alcançada para  $T_{Q-D} = 930$  °C.

Utilizando a temperatura de difusão do fósforo de 875 °C a resistência de folha média foi de 35  $\Omega/\square$  e os melhores resultados das células solares ocorreram para a temperatura de queima/difusão de Al de 920 °C e 960 °C. Para maior  $T_Q$  a  $V_{oc}$  foi de 556 mV a  $J_{sc}$  foi de 32,13 mA/cm<sup>2</sup> no curto-circuito, o fator de forma foi de 0,754 resultando na eficiência média de 13,5 %. Para a  $T_{Q-D} = 920$  °C, somente a  $J_{sc}$  é menor que o resultado para  $T_{Q-D} = 960$  °C. A eficiência máxima foi de 13,5 %, com  $J_{sc}$  de 31,9 mA/cm<sup>2</sup> de 556 mV. Portanto, para a difusão de Al e queima das

pastas de metalização simultâneas, os melhores resultados foram encontrados para difusão de e fósforo a 875 °C e  $T_{Q-D}$  de 920 °C

Comparando com os resultados de células processadas em lâminas do mesmo lote, com estrutura  $n^+pn^+$ , isto é, sem BSF, a eficiência alcançada foi de 12,6 %, com a  $J_{sc}$  de 30,5 mA/cm<sup>2</sup> e  $V_{oc}$  550 mV, o que comprova a utilidade do BSF para aumentar eficiência das células solares.

Com a finalidade de analisar a influência da velocidade da esteira do forno durante o processo térmico simultâneo de difusão de alumínio e queima das pastas metálicas  $V_{E-D}$  foram fabricadas células solares variando este parâmetro. A difusão de fósforo foi implementada na temperatura de 900 °C e a  $T_{Q-D}$  foi de 940 °C. Observou-se um aumento em todos os parâmetros elétricos com o aumento da velocidade da esteira. A  $J_{sc}$  e a  $V_{oc}$  praticamente ficaram estabilizadas após a  $V_{E-D}$  = 150 cm/min. Somente o fator de forma continuou aumentando até a velocidade da esteira de 180 cm/min, provocando o mesmo comportamento na eficiência. Pode-se concluir que para este processo de difusão de Al depositado por evaporação e queima das pastas de metalização simultânea a velocidade da esteira deve ser de 180 cm/min.

No segundo processo de fabricação de células solares foi otimizado experimentalmente o campo retrodifusor com alumínio evaporado e difundido em forno de esteira e difusão de fósforo a 875 °C. A velocidade da esteira ( $V_{E-D}$ ) do forno durante a difusão de Al foi variada bem como a temperatura da queima das pastas de metalização ( $T_Q$ ). Observou-se que a velocidade da esteira de 120 cm/min resultou na maior eficiência para todas as temperaturas de queima, com exceção de  $T_Q$  = 890 °C. A maior eficiência média foi de 14,1 %, a  $J_{sc}$  de 32,2 mA/cm<sup>2</sup> e  $V_{oc}$  de 554 mV . Portanto, conclui-se que a velocidade da esteira durante o processo de difusão de Al deve ser próxima a 120 cm/min e a temperatura de queima das pastas de 860 °C.

Da análise dos melhores resultados das células solares fabricadas com o processo de difusão de alumínio em forno de esteira, observou-se que a máxima eficiência foi de 15,2 %, com  $J_{sc}$  de 34,1 mA/cm<sup>2</sup> e  $V_{oc}$  de 577 mV. Esta máxima

eficiência está próxima daquela da melhor célula solar processada no NT-Solar com difusão de Al em forno convencional que atingiu 15,8 %, com Jsc de 35,4 mA/cm<sup>2</sup> e Voc de 587 mV. A principal diferença entre os dois dispositivos está na Jsc e Voc. Em relação às três melhores células com difusão em forno de esteira, a eficiência é superior a 14,3 %, valor similar à média mundial de células industriais. Cabe comentar que o processo de difusão no forno de esteira pode proporcionar uma redução no custo do processo de fabricação de células solares.

A continuidade deste trabalho pode ser dada com o desenvolvimento e análise do processo de fabricação de células solares com difusão de fósforo em forno de esteira, sendo depositado previamente por *spin-on* um líquido dopante que contém fósforo. O emissor n<sup>+</sup> será otimizado experimentalmente variando os parâmetros de temperatura e velocidade da esteira. Neste processo, o alumínio também será depositado para formar o campo retrodifusor e será otimizado o processo de fabricação variando-se a temperatura do forno nas três zonas, o fluxo de ar comprimido e a espessura do alumínio evaporado.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] MOEHLECKE, A. Células solares eficientes e de baixo custo e produção. Brasília: **Prêmio Jovem Cientista e Prêmio Jovem Cientista do Futuro**, p. 15-76, 2002.
- [2] LY, M. **Desenvolvimento e análise de filme anti-reflexo de Sulfeto de Zinco para células solares**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia dos Materiais)-PGETEMA, PUCRS, 2007.
- [3] MOEHLECKE, A.; ZANESCO, I. Mercado, Física e Processamento de Células Solares. M & M - **Metalurgia e Materiais**, São Paulo, v. 61, p. 394-397, 2005.
- [4] CECCHINI, T. **Otimização das regiões altamente dopadas de células solares fabricadas por processos térmicos rápidos**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia dos Materiais)-PGETEMA, PUCRS, 2003.
- [5] WEHR, G. **Otimização das regiões dopadas e desenvolvimento de células solares industriais em substratos de silício multicristalino**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia de Materiais)- PGETEMA PUCRS, 2006.
- [6] MALLMANN, A. P. **Metalização serigráfica de células solares bifaciais fabricadas por processo térmico rápido**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia dos Materiais)-PGETEMA, PUCRS, 2006.
- [7] LEE, E. J.; KIM, D. S.; LEE, S. H. Ni/Cu metallization for low-cost high-efficiency PERC cells. **Solar Energy Materials & Solar Cells**, v. 74, p. 65-70, 2002.

- [8] HILALI, M. M. **Understanding and development of manufacturable screenprinted contacts on high sheet-resistance emitters for low-cost silicon solar cells**. Atlanta. 2005. 286 p. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica e Computacional), Georgia Institute of Technology, EUA.
- [9] SZLUFCHIK, J.; et. al. Simple integral screenprinting process for selective emitter polycrystalline silicon solar cells. **Applied Physics Letters**, v. 59, n. 13, p. 1583 – 1584, 1991.
- [10] GHANDHI, S .K. **VLSI Fabrication Principles: Silicon and Gallium Arsenide**. New York: J. Wiley, 1994. 834 p.
- [11] MOEHLECKE, A.; ZANESCO, I. Planta Piloto de Produção de Módulos Fotovoltaicos com Tecnologia Nacional. In: XI Congresso Brasileiro de Energia, 2006, Rio de Janeiro. **XI Congresso Brasileiro de Energia e I Seminário Brasileiro de Inovação Tecnológica no Setor Energético**, 2006. v. II. p. 935-943.
- [12] SWART, J. W. **Materiais Elétricos: Fundamentos e Semicondutores**. CAMPINAS: UNICAMP, 2004. 400 p.
- [13] **Process guidelines for using phosphorus oxychloride as an n-type silicon dopant**. SCHUMACHER Co.
- [14] FILOMENA. G.; MOEHLECKE, A.; ZANESCO, I.; MARCOLINO, J.; Avaliação dos efeitos de gettering por fósforo. In: Congresso Brasileiro de Energia Solar, 2., 2008, **Resumos do II Congresso Brasileiro de Energia Solar**, Florianópolis: UFSC, 2008.
- [15] MOEHLECKE, A. **Conceptos avanzados de tecnologia para células solares con emisores p<sup>+</sup> dopados com boro**. 1996. 218 p. Tese (Doutorado em Engenharia)-UPM, Madri, Espanha, set. 1996.

- [16] CAÑIZO, C. **Procesos de extracción de impurezas contaminantes y aplicación a estructuras de células solares.** 2000. 200 p. Tese (Doutorado em Engenharia)-UPM, Madri, Espanha, fev. 2000.
- [17] McHUGO, S. A.; HIESLMAIR, H.; WEBER, E. R. Gettering of metallic impurities in photovoltaic silicon. **Journal of Applied Physics**, v. 64, p. 127-137, 1997.
- [18] GREEN, A. M. **Solar Cells: Operating Principles, Technology e System Applications.** Sydney: UNSW, 1992. 274 p.
- [19] CANAN, R. **Otimização do emissor  $n^+$  e da metalização por deposição química para células solares industriais.** 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia dos Materiais)-PGETEMA, PUCRS, 2006.
- [20] ROHATGI, A.; NARASIMHA, S. Understanding and implementation of rapid thermal technologies for high-efficiency silicon solar cells. **IEEE Transactions on Electron Devices**, v. 46, 1970-1977, 1999.
- [21] DOSHI, P.; et. al. Rapid thermal processing of high-efficiency silicon solar cells with controlled in-situ annealing. **Solar Energy Materials & Solar Cells**, v. 41/42, p. 31-39, 1996.
- [22] GORIS, M. J. A. A.; et. al. In World Conference on Photovoltaic Energy, 2., 1998, **Proceedings of the Second World Conference on Photovoltaic Energy Conversion**, Austria: Vienna, 1998., p. 1523-1526, Emitter diffusion using an IR belt furnace
- [23] GORIS, M. J. A. A., et al. Comparison of emitters diffused using an IR belt furnace and a  $POCl_3$  system. In Conference on Photovoltaic Energy, 2001. **Proceedings of the seventeen European Photovoltaic Solar Energy Conference**, Munique, 2001, p. 1535-1538.

- [24] EBONG, A.; CHO, Y. H.; HILALI, M.; ROHATGI, A.; RUBY, D. Rapid thermal technologies for high-efficiency silicon solar cells; **Solar Energy Materials & Solar Cells**, v. 74: p. 51-55, 2002.
- [25] URDANIVIA, E. J. **Células solares de silício cristalino com emissores profundos**. 1995. 69 p. Dissertação (Mestrado em Física)-UNICAMP, Campinas, São Paulo, 1995.
- [26] PINTO, J. L. **Análise de *gettering* e do campo retrodifusor de células solares dopadas com boro**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia de Materiais)-PGETEMA, PUCRS, 2008.
- [27] ROHATGI, A.; SANA, P.; RAMANACHALAM, M. S.; SALAMI, J.; CARTER, W. R. Investigation of the effects of aluminum treatment on silicon solar cells. In: Photovoltaic Specialists Conference, 23., 1993. **Proceedings of the Twenty Third IEEE Photovoltaic Specialists Conference**, 2002. p. 52-57.
- [28] NARASIMHA, S., ROHATGI, A. Optimized aluminum back surface field techniques for silicon solar cells. In: Photovoltaic Specialists Conference, 26., 1997. **Proceedings of the Twenty-Sixth IEEE Photovoltaic Specialists Conference**, 1997. p.63-66.
- [29] MEEMONGKOLKIAT, V.; NAKAYASHIKI, K.; SEOP K. D.; KOPECEK. R.; ROHATGIA, A. Factors limiting the formation of uniform and thick aluminum-back-surface field and its potential. **Journal of the Electrochemical Society**, v. 153. 2006.
- [30] NARASIMHA, S., ROHATGI, A.; WEEBER, A. W. An optimized rapid aluminum back surface field technique for silicon solar cells. **IEEE Transactions on Electron Devices**, v. 46, n. 7, p 1363-1370, 1999.
- [31] MAISSEL, L. I.; GLANG, R. **Handbook of Thin Film Technology**: Mc Graw-Hill, 1970, 800 p.

[32] WOLF, S.; TAUBER, R. N. **Silicon Processing for the VLSI ERA**, California, 1986, v1, 960 p.

[33] Leybold UC533, **Information on Electron-Beam Evaporation**. 1989.