

5

Fator de amplificação em função das variáveis de processo: Determinação da condição ótima de operação

Na seção 3.3, foi apresentada uma análise de sensibilidade da resposta em frequência do fator de amplificação com relação a mudanças isoladas em algumas variáveis geométricas e parâmetros de processo.

Foi constatado que o fator de amplificação é sensível à mudanças em alguns parâmetros de processo e variáveis geométricas.

A análise de sensibilidade fornece informações importantes sobre a relação dos parâmetros de processo, variáveis geométricas e o fator de amplificação, porém esta relação é determinada em um subconjunto muito restrito do espaço das variáveis.

Neste capítulo, o campo de resposta do fator de amplificação será determinado para uma faixa abrangente de valores da fresta de revestimento contra o nível de vácuo. Os limites inferior e superior considerados para as variáveis são, respectivamente, 0,060 mm a 0,225 mm (1,2 a 4,5 no valor adimensional) e 600 Pa a 2600 Pa.

A aplicação prática desta abordagem é: dada uma oscilação existente com frequência e amplitude estimada, quais são os valores das variáveis de processo que podem reduzir o fator de amplificação? As respostas a estas perguntas fazem parte do trabalho do engenheiro de processos e podem ser um desafio considerável se não houver informação disponível.

Ajustes em parâmetros de processo (fresta de revestimento, nível de vácuo, velocidade do substrato, etc.) são mais fáceis e rápidos que mudanças na geometria da barra de revestimento (ajuste *overbite/underbite*, comprimento do lábio a jusante, ângulo de convergência do lábio a jusante, etc).

Em alguns casos é viável a mudança das propriedades do líquido revestido (viscosidade e tensão superficial).

5.1

Fator de amplificação em função da fresta de revestimento e o nível de vácuo.

Baseado na eq. (132), é possível estimar a frequência onde ocorrerá o máximo fator de amplificação e, a partir daí, ter uma idéia das frequências que serão classificadas como “baixas”, “intermediárias” e “altas”, segundo a seção 3.3.8.

A classificação das frequências em “baixas”, “intermediárias” e “altas” para cada condição de processo é o ponto chave na análise, pois indicará o caminho para redução do fator de amplificação.

Como visto na seção 3.3.8 para a geometria do caso base, *slott1*, frequências entre 40 Hz e 50 Hz são críticas para uma velocidade do substrato de 6 m/min. Frequências abaixo de 20 Hz são classificadas como “baixas” e frequências acima de 200 Hz são classificadas como “altas”, o restante são frequências intermediárias.

É interessante verificar o campo do fator de amplificação para algumas frequências dentro de cada classe. Todos os campos do fator de amplificação apresentados neste capítulo foram obtidos pela interpolação de 72 pontos (dentro da faixa das variáveis de processo) obtidos por simulação numérica. O *software* utilizado para interpolação foi o Minitab.

Os parâmetros da tab. (23) foram mantidos constantes e a geometria é a da fig. (72). Em todas as simulações deste capítulo a amplitude de oscilação da fresta de revestimento foi de 0,010 mm, ou seja, 10% da fresta no regime permanente.

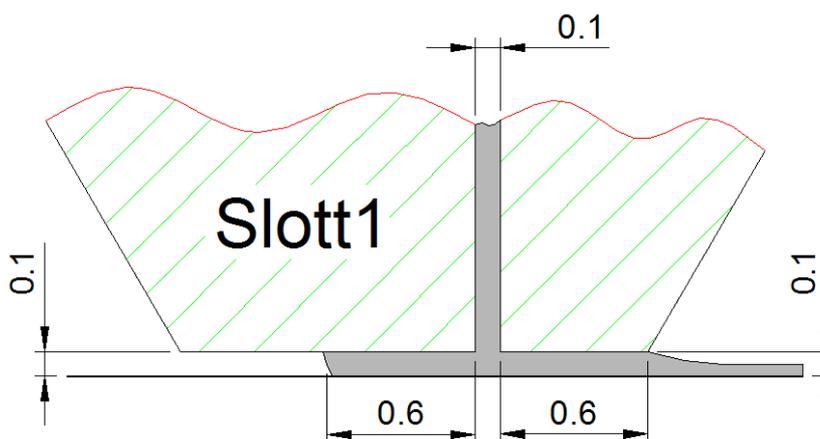


Figura 72 – Geometria base para determinação do campo do fator de amplificação

Tabela 23 – Parâmetros de processo do caso base seção 3.3.8

$Ca = \frac{\mu V}{\sigma}$	h (mm)	V_w (m/min)	μ (cps)	ρ (Kg/l)	σ (dyn/cm)
0,2	0,050	6	30	1	15

A fig. (73) representa o campo do fator de amplificação em função da fresta de revestimento adimensional e o nível de vácuo aplicado para a frequência de 3 Hz, que é classificada como “baixa” quando a velocidade do substrato é 6 m/min.

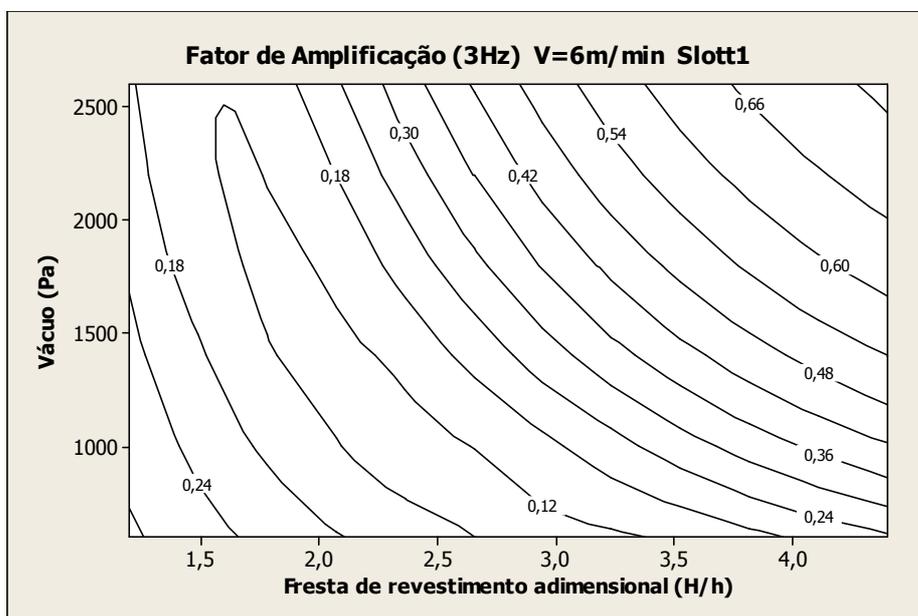


Figura 73 – Campo do fator de amplificação para a geometria da fig. (72), parâmetros de processo da tab. (23), frequência e amplitude de oscilação da fresta de revestimento de 3 Hz e 0,010 mm.

A análise do campo do fator de amplificação em função da fresta de revestimento e do nível de vácuo dá informações interessantes sobre o ajuste ótimo no espaço destas variáveis quando a oscilação da fresta de revestimento é de 3 Hz (baixa frequência).

A primeira conclusão é que existe uma faixa de valores da fresta de revestimento e do nível de vácuo que reduz o fator de amplificação, no caso apresentado, a fresta de revestimento deve ser mantida entre 2,5 a 3 vezes o valor da espessura e baixo nível de vácuo.

A redução do fator de amplificação é drástica quando as variáveis são ajustadas para trabalhar na região ótima. A diferença entre o maior fator de amplificação (0,73) e o menor fator de amplificação (0,11) foi de 85%.

A fig. (74) mostra a mesma análise para a frequência de 10 Hz, também classificada como “baixa” para a velocidade de substrato de 6 m/min. O formato das linhas de contorno são bem semelhantes ao mostrado na fig. (73) para a frequência de 3 Hz.

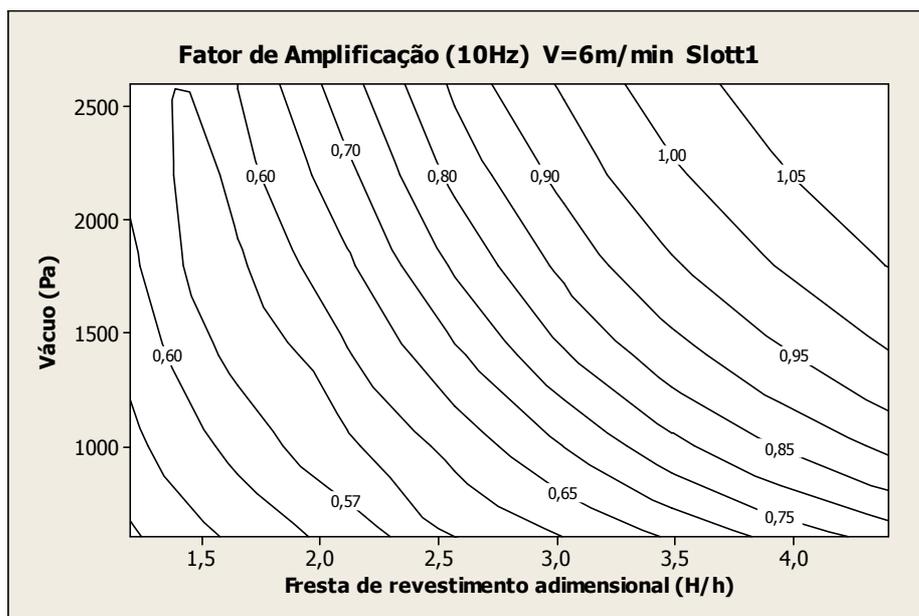


Figura 74 – Campo do fator de amplificação para a geometria da fig. (72), parâmetros de processo da tab. (23), frequência e amplitude de oscilação da fresta de revestimento de 10 Hz e 0,010 mm

O fato de frequências da mesma classe aparentemente apresentarem linhas de contorno semelhantes, permite a definição de uma estratégia para redução do fator de amplificação.

Novamente existe uma região de ajuste da fresta de revestimento e do nível de vácuo que reduz o fator de amplificação. A faixa ótima para a fresta de revestimento se deslocou em direção a valores menores e agora está entre 2,0 e 2,5 com baixos níveis de vácuo.

A fig. (75) mostra as linhas de contorno para a frequência de 30 Hz, classificada como “intermediária” para a velocidade do substrato em 6 m/min.

Agora, o formato das linhas de contorno é diferente das anteriores, apresentando uma região de ajuste da fresta de revestimento que aumenta o fator de amplificação.

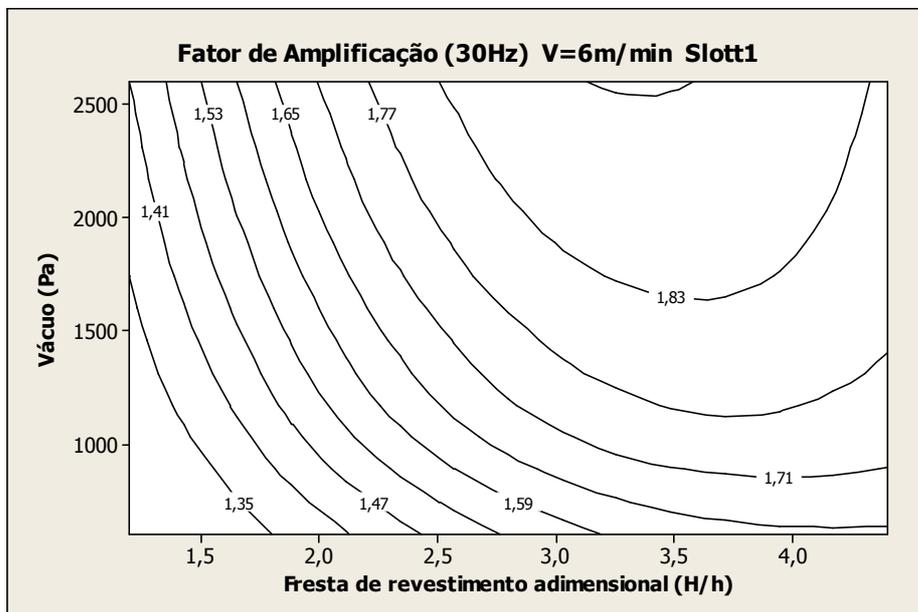


Figura 75 – Campo do fator de amplificação para a geometria da fig. (72), parâmetros de processo da tab. (23), frequência e amplitude de oscilação da fresta de revestimento de 30 Hz e 0,010 mm

A melhor estratégia neste caso é trabalhar com baixos valores da fresta de revestimento e nível de vácuo.

A fig. (76) mostra as linhas de contorno do fator de amplificação para a frequência de pico (50 Hz), também classificada como intermediária para a velocidade do substrato de 6 m/min.

O formato das linhas de contorno se assemelha ao gráfico da fig. (75), que representa a outra frequência classificada como “intermediária” para a velocidade de 6 m/min.

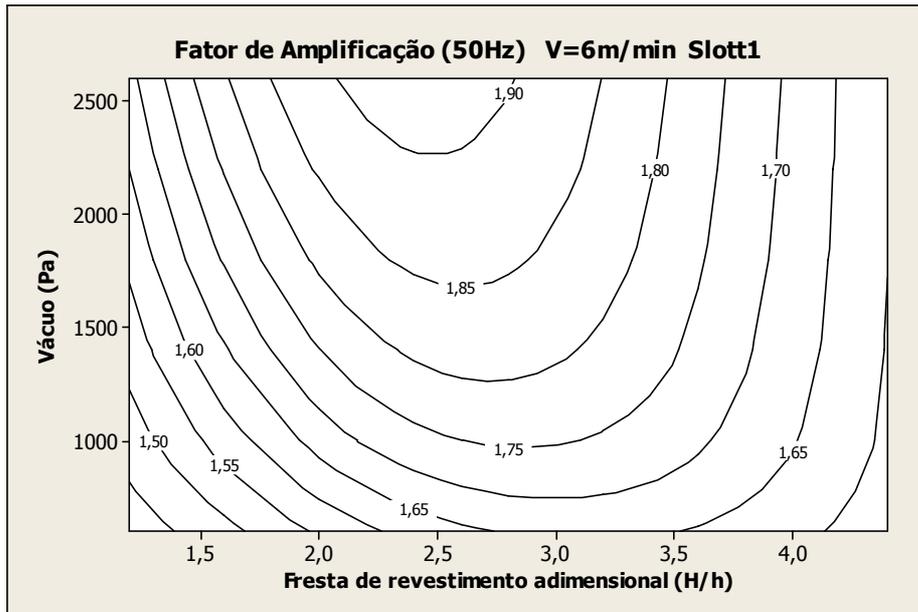


Figura 76 – Campo do fator de amplificação para a geometria da fig. (72), parâmetros de processo da tab. (23), frequência e amplitude de oscilação da fresta de revestimento de 50 Hz e 0,010 mm

A região que aumenta o fator de amplificação também está presente, porém se deslocou para menores níveis da fresta de revestimento.

A estratégia para redução do fator de amplificação é a mesma utilizada para a frequência de 30 Hz, ou seja, reduzir a fresta de revestimento e o nível de vácuo. Há também a opção de manter baixo o nível de vácuo, mas trabalhar com maiores frestas de revestimento.

Em seguida a fig. (77) mostra as linhas de contorno do fator de amplificação para a frequência de 500 Hz, classificada como “alta” para a velocidade do substrato de 6 m/min.

A forma das linhas de contorno lembra as frequências intermediárias, mas a grande diferença é que o fator de amplificação é praticamente constante para qualquer combinação da fresta de revestimento e do nível de vácuo.

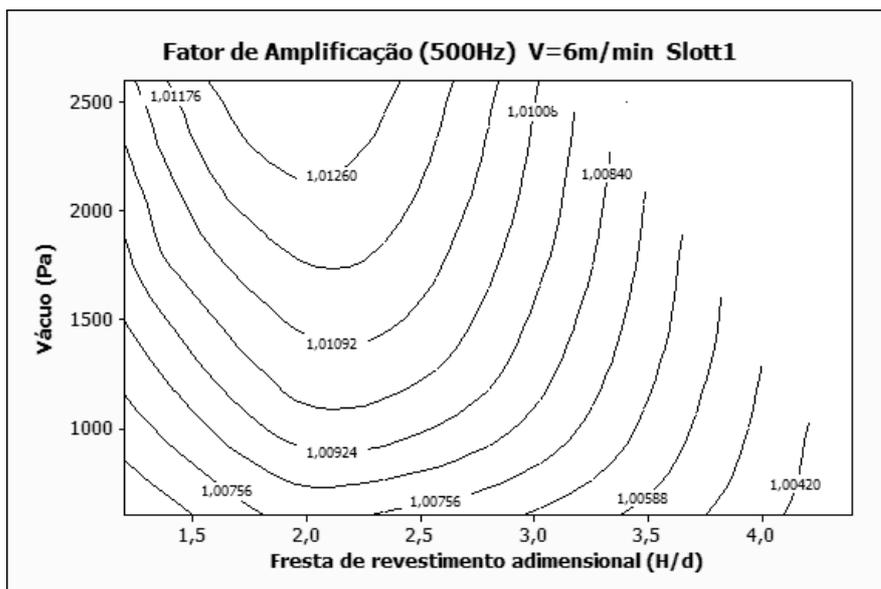


Figura 77 – Campo do fator de amplificação para a geometria da fig. (72), parâmetros de processo da tab. (23) e frequência de oscilação da fresta de revestimento de 500 Hz

O fato do fator de amplificação ser praticamente 1 para qualquer ajuste é uma característica das altas frequências.

A amplitude de variação da espessura “copia” a amplitude de variação da fresta de revestimento e sempre na mesma frequência de oscilação.

Na região vazia do gráfico não houve convergência do método numérico.

A tab. (24) mostra um resumo da análise dos casos acima.

Tabela 24 – Sugestão de ajustes da fresta de revestimento e nível de vácuo para redução do fator de amplificação dentro do domínio considerado

Classe da frequência de oscilação	Frequência oscilação (Hz)	Fresta de revestimento adimensional	Nível de vácuo (Pa)	% de redução máxima possível
Baixa	3	2,5 a 3,0	Baixo	85
Baixa	10	2,0 a 2,5	Baixo	50
Intermediária	30	Menor possível	Menor possível	31
Intermediária	50	Menor ou Maior possível	Menor possível	26
Alta	500	-	-	<1

Importante notar que conforme a frequência de oscilação da fresta de revestimento aumenta, a redução possível no fator de amplificação cai, isto é, a possibilidade de redução do fator de amplificação por ajustes dos parâmetros de processo fica menor.

Na maioria das situações o uso de níveis baixos de vácuo foi vantajoso.

A pergunta agora é: será que a classificação das frequências conforme definido na tab. (13) funciona para qualquer velocidade do substrato?

5.2

Fator de amplificação em função da fresta de revestimento e o nível de vácuo para velocidade do substrato em 12 m/min

Para responder a pergunta do parágrafo anterior, considerou-se os parâmetros de processo da tab. (25) e variáveis geométricas da fig. (72).

Tabela 25 – Parâmetros de processo para as simulações da seção 5.2

$Ca = \frac{\mu V}{\sigma}$	h (mm)	V_w (m/min)	μ (cps)	ρ (Kg/l)	σ (dyn/cm)
0,4	0,050	12	30	1	15

Agora, a velocidade do substrato é de 12m/min e de acordo com a classificação sugerida na tab. (13) temos:

Tabela 26 – Classificação das faixas de frequência, conforme seção 3.3.8

Velocidade (m/min)	Faixa da Frequência do pico (Hz)	Baixas frequências (Hz)	Altas frequências (Hz)
12	80 - 100	0 - 40	> 400

A frequência de oscilação de 30 Hz, anteriormente classificada como intermediária, agora é classificada como baixa.

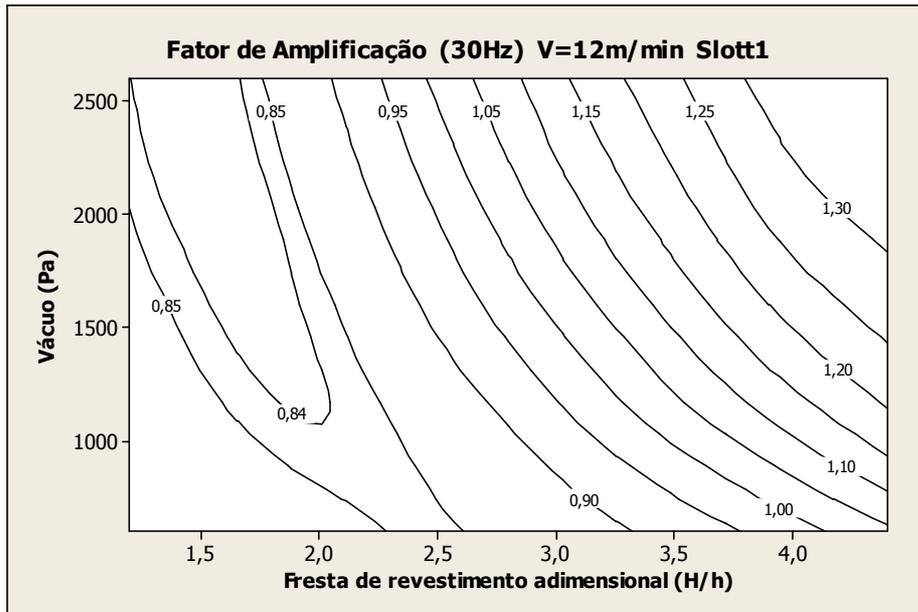


Figura 78 – Campo do fator de amplificação para a geometria da fig. (72), parâmetros de processo da tab. (25), frequência e amplitude de oscilação da fresta de revestimento de 30 Hz e 0,010 mm

As linhas de contorno do fator de amplificação da fig. (78) são parecidas com as linhas de contorno para baixas frequências quando a velocidade do substrato é 6 m/min, portanto a estratégia para ajuste dos parâmetros de processo é a mesma.

Isto reforça a utilidade da classificação das frequências de oscilação da fresta de revestimento atuantes no processo.

A fig. (79) mostra as linhas de contorno do fator de amplificação para as frequências de oscilação de 50 Hz e 100Hz, classificadas como intermediárias para a velocidade do substrato de 12 m/min.

Novamente as linhas de contorno obtidas são características das frequências intermediárias, portanto seguindo a mesma estratégia de ajuste anteriormente vista.

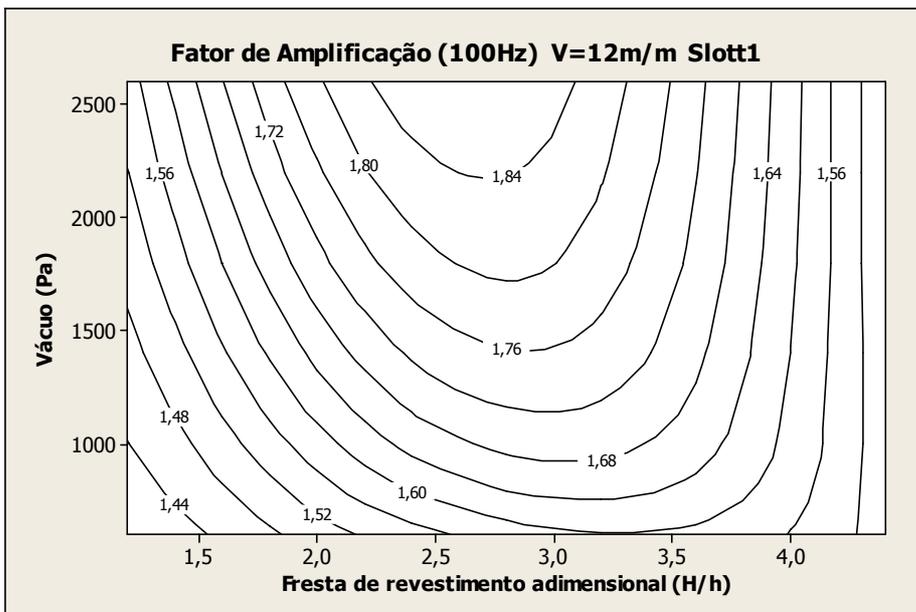
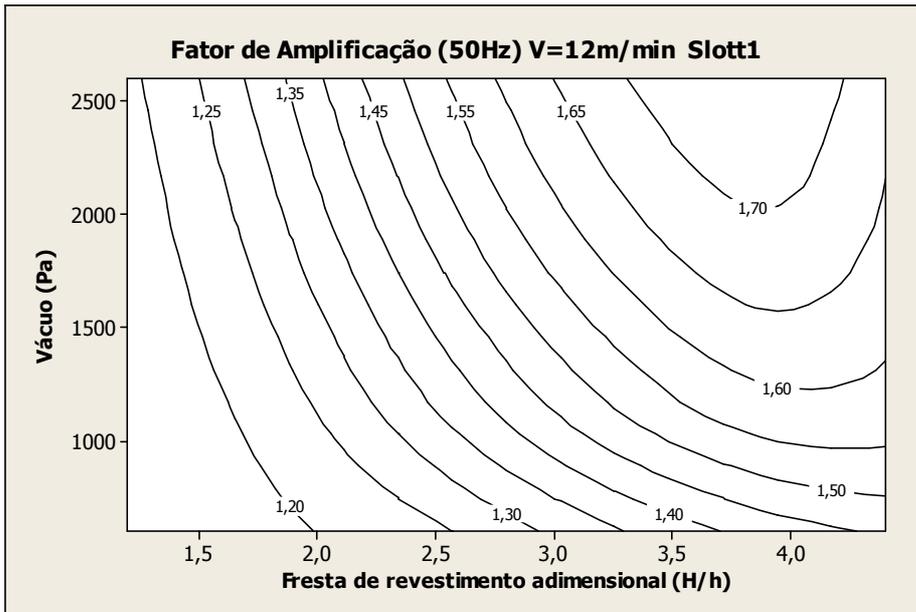


Figura 79 – Campo do fator de amplificação para a geometria da fig. (72), parâmetros de processo da tab. (25), frequências e amplitude de oscilação da fresta de revestimento de 50 Hz, 100 Hz e 0,010 mm

A fig. (80) a seguir mostra as linhas de contorno para a frequência de 500 Hz, uma frequência alta para a velocidade de 12 m/min.

As linhas de contorno obtidas são características das frequências altas, portanto seguindo a mesma estratégia de ajuste anteriormente vista.

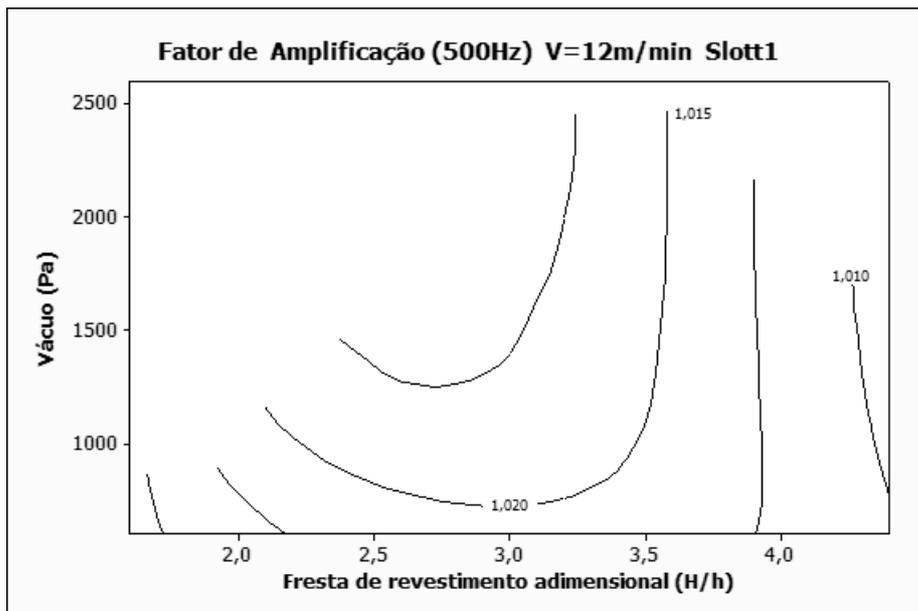


Figura 80 – Campo do fator de amplificação para a geometria da fig. (72) e parâmetros de processo da tab. (25), frequência e amplitude de oscilação da fresta de revestimento de 500 Hz e 0,010 mm

O resumo das simulações na velocidade de 12m/min e os ajustes considerados bons estão indicados na tab. (27).

Note que apesar da velocidade de revestimento haver dobrado, os ajustes necessários para redução do fator de amplificação são bem semelhantes ao caso da seção 5.1.

Tabela 27 – Sugestão de ajustes da fresta de revestimento e nível de vácuo para redução do fator de amplificação dentro do domínio considerado

Classe da frequência de oscilação	Frequência de oscilação (Hz)	Fresta de revestimento adimensional	Nível de vácuo (Pa)	% de redução máxima possível
Baixa	30	2,0 a 2,5	Baixo	38
Intermediária	50	Menor possível	Menor possível	33
Intermediária	100	Menor ou maior possível	Menor possível	25
Alta	500	-	-	2

5.3

Fator de amplificação em função da fresta de revestimento e o nível de vácuo para outras geometrias

Será que o mesmo critério para ajuste da fresta de revestimento e nível de vácuo também funciona para outras geometrias?

Para testar esta hipótese, as linhas de contorno do fator de amplificação para outras geometrias foram determinadas.

A fig. (81) mostra a primeira geometria testada, os parâmetros de processo considerados estão na tab. (28).

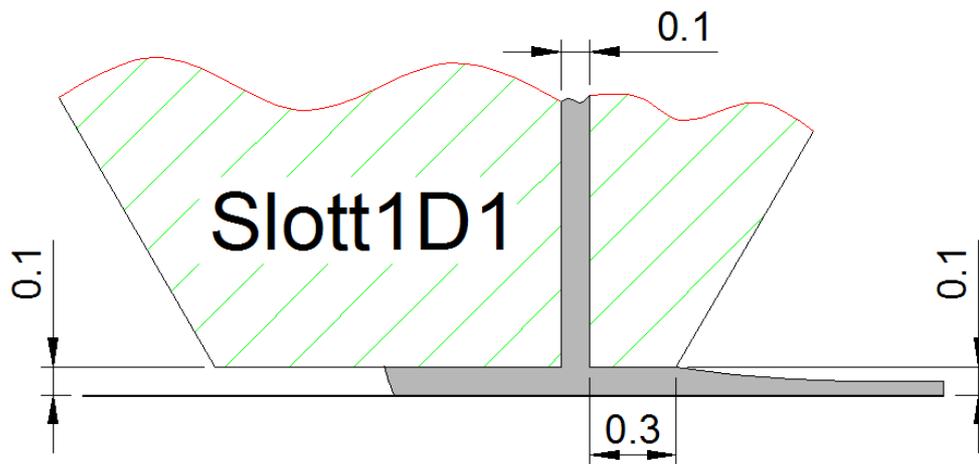


Figura 81 – Geometria para determinação do campo do fator de amplificação

Tabela 28 – Parâmetros de processo para determinação do campo do fator de amplificação

$Ca = \frac{\mu V}{\sigma}$	h (mm)	V_w (m/min)	μ (cps)	ρ (Kg/l)	σ (dyn/cm)
0,2	0,050	6	30	1	15

A fig. (82) mostra as linhas de contorno para as frequências 3 Hz e 10 Hz (frequências baixas).

Apesar da alteração na geometria, as linhas de contorno do fator de amplificação ainda são muito semelhantes a aquelas vistas para a geometria da fig. (72) a baixas frequências.

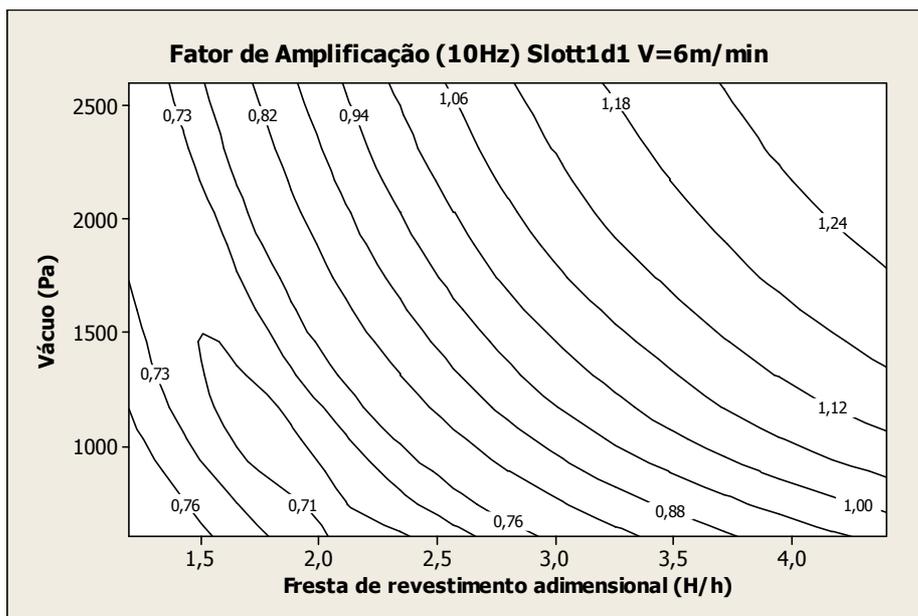
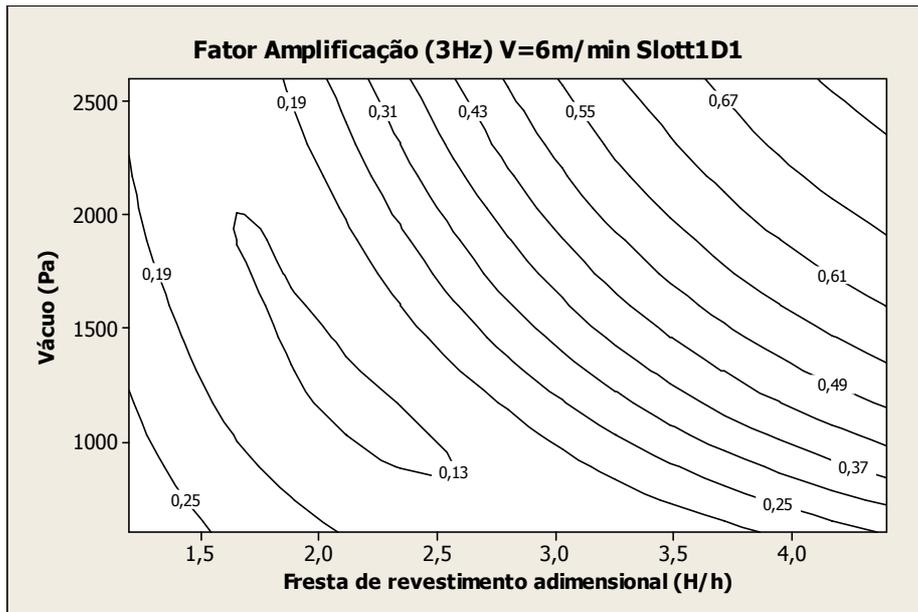


Figura 82 – Campo do fator de amplificação para a geometria da fig. (81), parâmetros de processo da tab. (28), frequências e amplitude de oscilação da fresta de revestimento de 3 Hz, 10 Hz e 0,010 mm

A fig. (83) mostra o campo do fator de amplificação em função da fresta de revestimento adimensional e o nível de vácuo aplicado para a frequência de 30 Hz e 50 Hz, frequências intermediárias.

O formato das linhas de contorno continua muito semelhantes ao formato encontrado para a geometria da fig. (72) em frequências intermediárias.

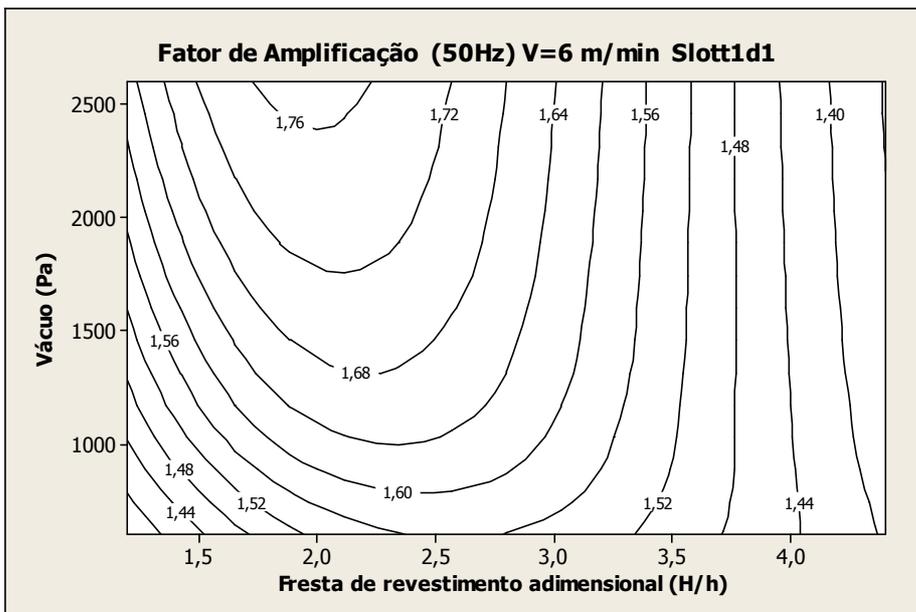
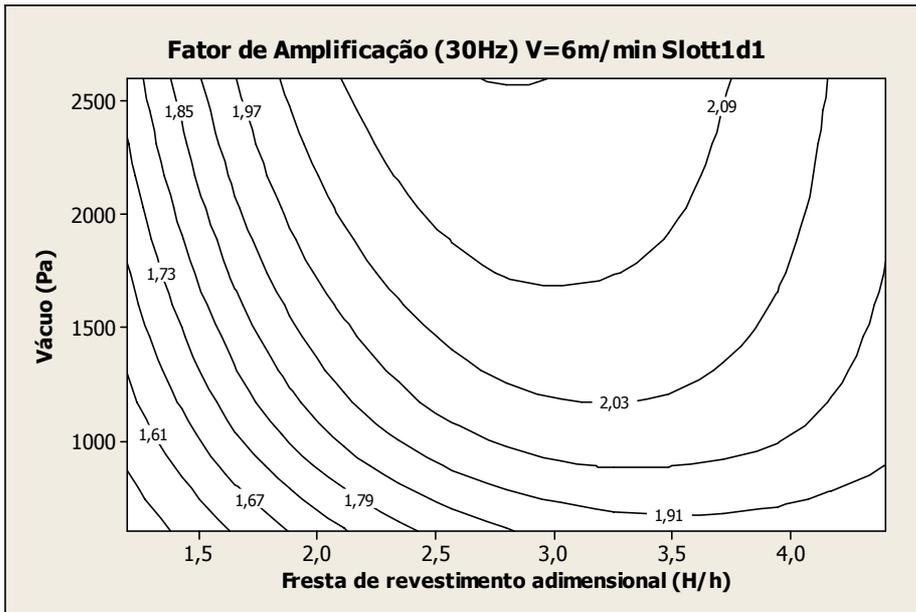


Figura 83 – Campo do fator de amplificação para a geometria da fig. (81) e parâmetros de processo da tab. (28), frequências e amplitude de oscilação da fresta de revestimento de 30 Hz, 50 Hz e 0,010 mm

A fig. (84) mostra o campo do fator de amplificação em função da fresta de revestimento adimensional e o nível de vácuo aplicado para a frequência de 500 Hz, uma frequência alta. Novamente obteve-se um fator de amplificação aproximadamente constante e igual a um.

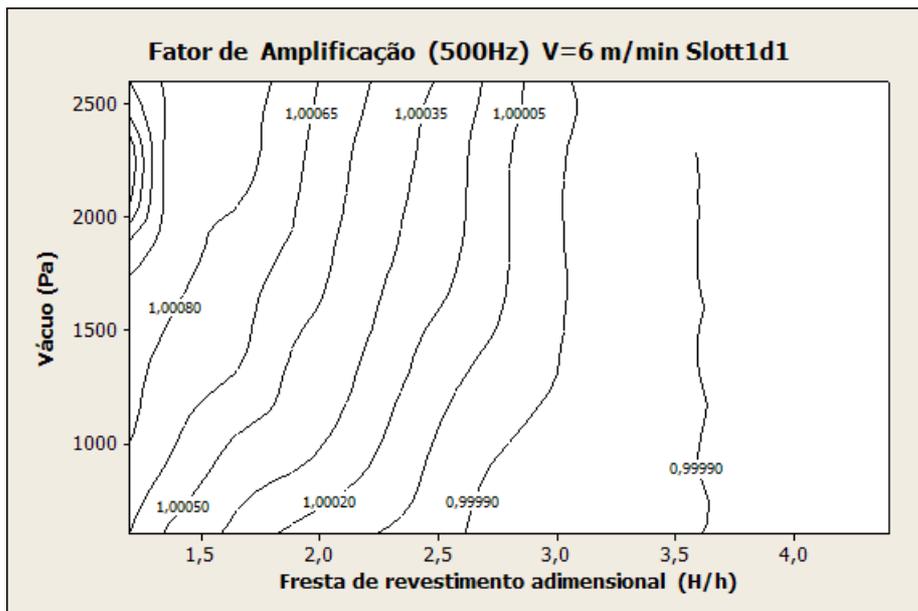


Figura 84 – Campo do fator de amplificação para a geometria da fig. (81), parâmetros de processo da tab. (28), frequência e amplitude de oscilação da fresta de revestimento de 500 Hz e 0,010 mm

O resumo das simulações para a geometria da fig. (81) está representada na tab. (29).

Tabela 29 – Sugestão de ajustes da fresta de revestimento e nível de vácuo para redução do fator de amplificação dentro do domínio considerado

Classe da frequência de oscilação	Frequência de oscilação (Hz)	Fresta de revestimento adimensional	Nível de vácuo (Pa)	% de redução máxima possível
Baixa	3	2,5 a 3,0	Baixo	83
Baixa	10	2,0 a 2,5	Baixo	46
Intermediária	30	Menor possível	Menor possível	30
Intermediária	50	Menor ou Maior possível	Menor possível	23
Alta	500	-	-	<1

A fig. (85) mostra a segunda geometria testada, os parâmetros de processo considerados estão representados na tab. (30).

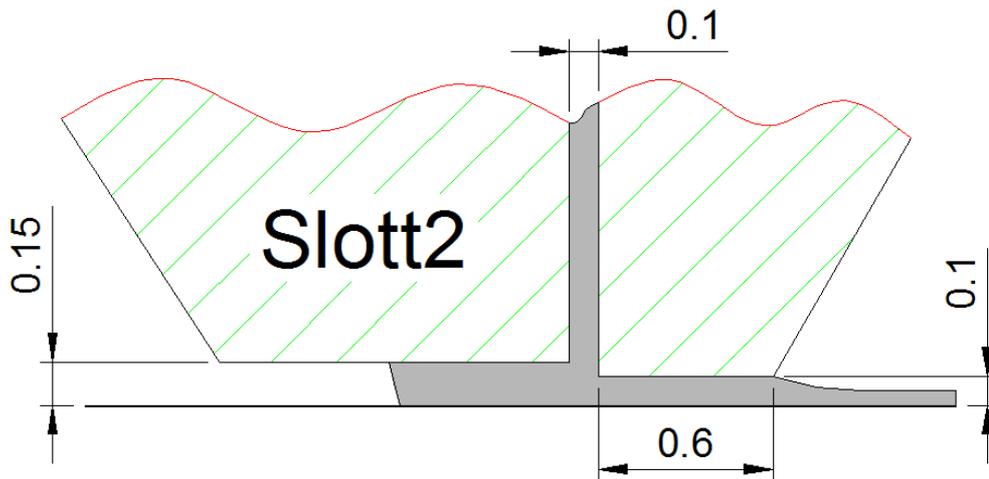


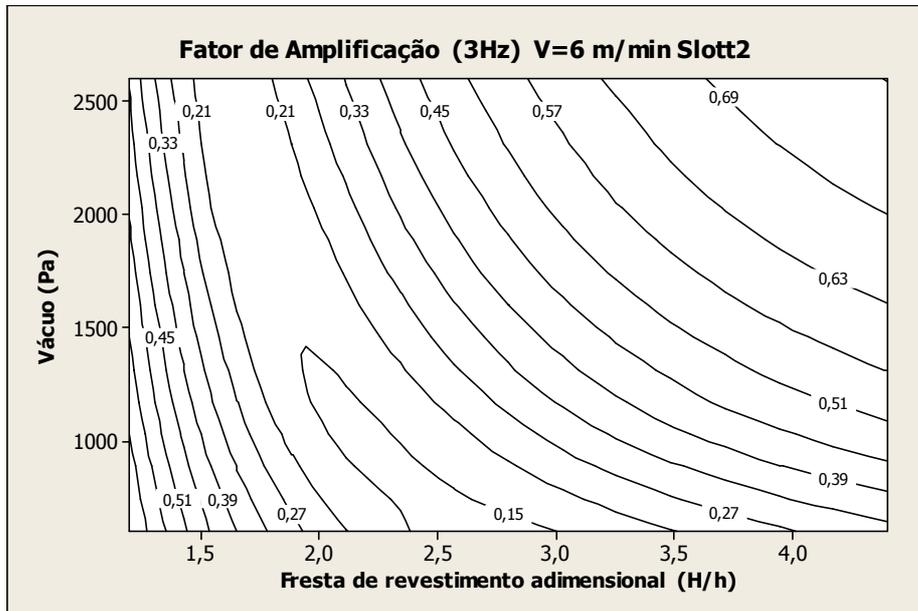
Figura 85 – Geometria para determinação do campo do fator de amplificação

Tabela 30 – Parâmetros de processo para determinação do campo do fator de amplificação

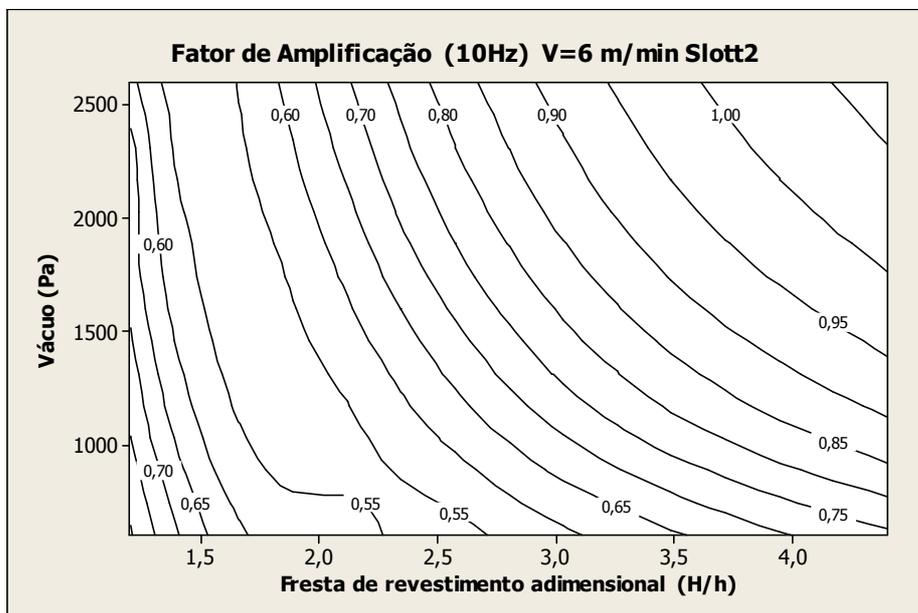
$Ca = \frac{\mu V}{\sigma}$	h (mm)	V_w (m/min)	μ (cps)	ρ (Kg/l)	σ (dyn/cm)
0,2	0,050	6	30	1	15

As linhas de contorno para as frequências 3 Hz e 10Hz (baixas), 30 Hz e 50 Hz (intermediárias) e 500 Hz (alta) estão mostradas na fig. (86).

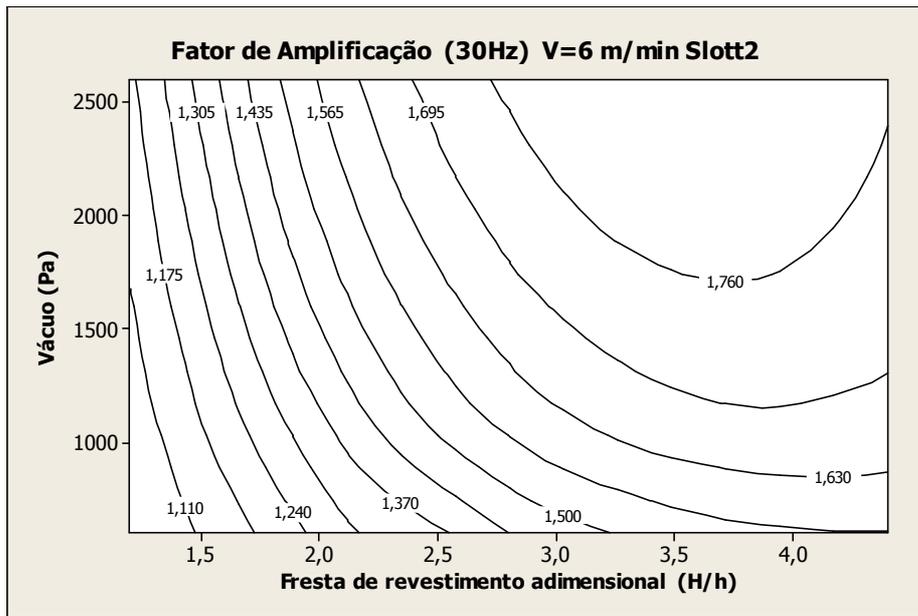
Os resultados apresentados mostram que o comportamento do fator de amplificação e, conseqüentemente, a estratégia para minimizá-lo permanece a mesma para diferentes valores da velocidade do substrato e geometrias.



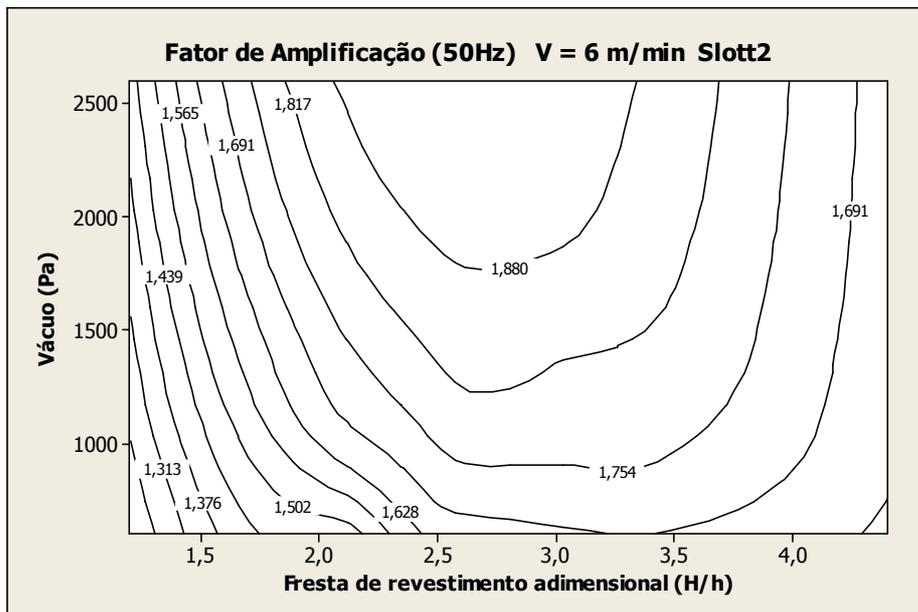
a) 3 Hz



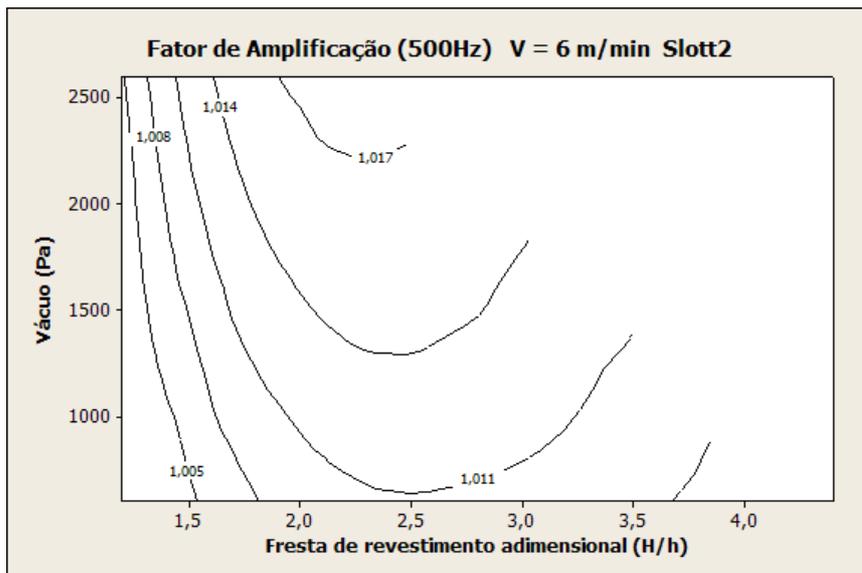
b) 10 Hz



c) 30 Hz



d) 50 Hz



e) 500 Hz

Figura 86 – Campo do fator de amplificação para a geometria da fig. (85), parâmetros de processo da tab. (30), frequências e amplitude de oscilação da fresta de revestimento de 3 Hz, 10 Hz, 30 Hz, 50 Hz, 500 Hz e 0,010 mm

O resumo das simulações para a geometria da fig. (85) está mostrado na tab. (31).

Tabela 31 – Sugestão de ajustes de fresta de revestimento e nível de vácuo para redução do fator de amplificação dentro do domínio considerado

Classe da frequência de oscilação	Frequência de oscilação (Hz)	Fresta de revestimento adimensional	Nível de vácuo (Pa)	% de redução máxima possível
Baixa	3	2,5 a 3,0	Baixo	82
Baixa	10	2,0 a 2,5	Baixo	50
Intermediária	30	Menor possível	Menor possível	42
Intermediária	50	Menor possível	Menor possível	38
Alta	500	-	-	1,5

A determinação das condições de operação que minimizam o fator de amplificação através da análise de toda a faixa de variação de cada parâmetro é extremamente cara em termos computacionais. Portanto, é útil o uso de um algoritmo computacional de otimização para este trabalho.