

3

Simulação numérica do processo de revestimento por extrusão em regime transiente

O processo de revestimento por extrusão é um dos preferidos para aplicações que requerem alto nível de uniformidade de espessura.

Muitos estudos publicados focam na determinação da janela de operação em regime permanente do processo de revestimento por extrusão (Sartor, 1990) (Romero, 2003) (Park et al, 2004) (Liu et al., 2007). Porém, o completo entendimento deste processo de revestimento não envolve apenas uma visão bidimensional em regime permanente, mas também a sensibilidade do escoamento a pequenos distúrbios na geometria ou parâmetros de processo sempre presentes em instalações industriais.

Em regime permanente, a espessura de revestimento depende apenas da vazão do líquido e da velocidade do substrato. Porém, variações da fresta de revestimento, do nível de vácuo ou de outros parâmetros operacionais podem alterar a espessura de revestimento (Joos, 1999) (Romero & Carvalho, 2008).

Neste capítulo, são mostrados vários resultados de simulação numérica relacionados ao impacto da oscilação periódica da fresta de revestimento na amplitude de variação da espessura no processo de revestimento por extrusão.

Algumas causas de variação da fresta de revestimento são:

- a) Desvio da tolerância de batimento do rolo suporte do substrato;
- b) Vibrações mecânicas geradas em equipamentos externos que são transmitidas ao suporte da barra de revestimento;
- c) Variação de espessura do substrato.

A melhor forma de resolver problemas relacionados à variação da fresta de revestimento é eliminar a causa desta variação. Porém, o entendimento da relação entre oscilação da fresta de revestimento e amplitude de variação da espessura contribui para o diagnóstico do problema, a adoção de ações de contenção e dá informações para elaboração de projetos de barras de revestimento mais robustos. Nas simulações numéricas apresentadas neste capítulo e nos demais, a variação da espessura é representada pelo fator de amplificação, que é a relação

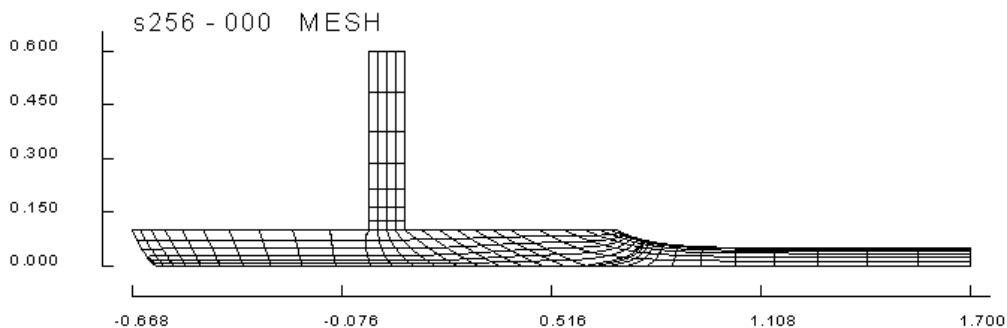
entre a amplitude de variação da espessura e a amplitude de oscilação da fresta de revestimento.

3.1 Robustez do método numérico

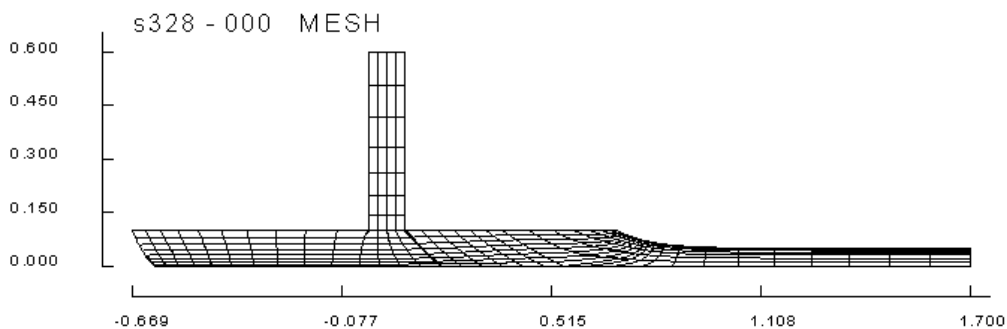
A definição de um bom modelo matemático para representação do problema físico é uma etapa necessária para garantia de uma simulação numérica de qualidade, porém não é suficiente.

Malhas subdimensionadas, passos de tempo superdimensionados, erros de arredondamento ou truncamento inerentes ao método numérico ou ao código computacional podem afastar o resultado da simulação da realidade do fenômeno físico.

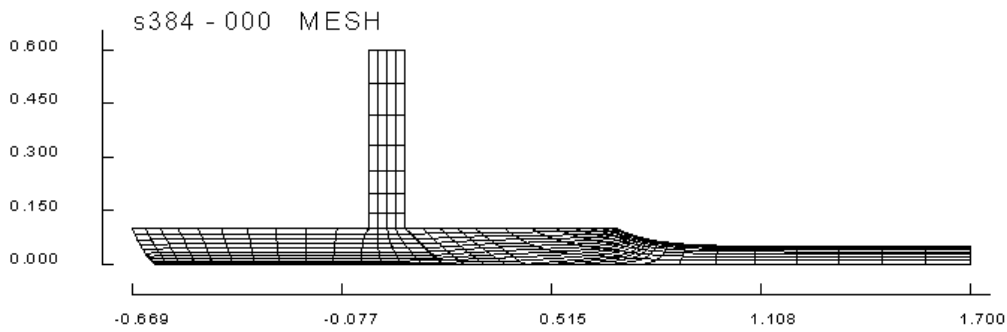
A fig. (22) mostra três malhas com diferentes números de elementos utilizadas para estimar a sensibilidade do fator de amplificação (seção 3.3) em relação à malha escolhida. O passo de tempo foi ajustado para se obter 40 soluções para cada ciclo de oscilação da fresta de revestimento.



a) Malha com 256 elementos



b) Malha com 328 elementos



c) Malha com 384 elementos

Figura 22 – Malhas com 256, 328 e 384 elementos

A geometria externa da barra de revestimento e os parâmetros de processo utilizados para validação da malha estão mostrados na fig. (23) e na tab. (1).

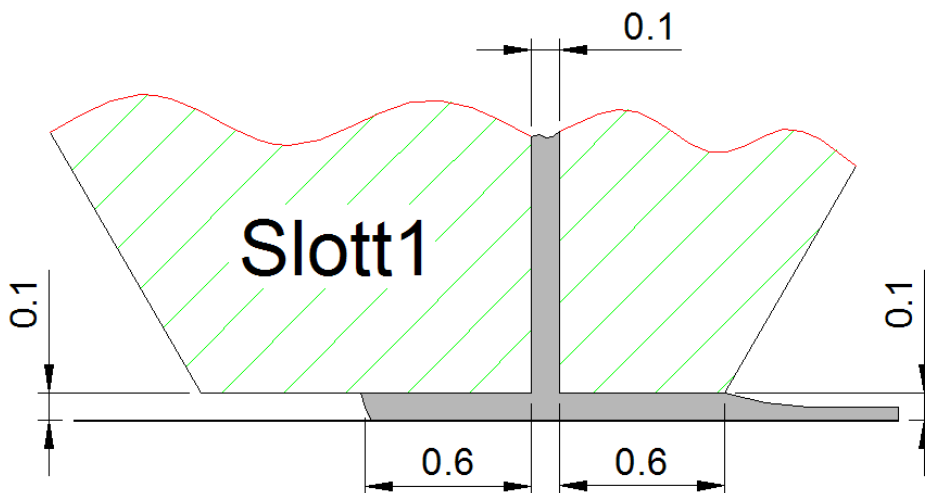


Figura 23 – Geometria para validação do número de elementos da malha e do passo de tempo utilizado

Tabela 1 – Parâmetros de processo para validação do número de elementos da malha e do passo de tempo utilizado

$Ca = \frac{\mu V}{\sigma}$	$Re = \frac{\rho V H_d}{\mu}$	P_{vac} (Pa)	V_w (m/min)	μ (cps)	ρ (Kg/l)	σ (dyn/cm)
0,2	0,33	-1300	6	30	1	15

O fator de amplificação foi calculado em várias frequências de oscilação da fresta de revestimento para cada malha, conforme tab. (2).

Tabela 2 – Fator de amplificação para cada frequência e malha. Diferença % entre 2 malhas para a mesma frequência

Frequência (Hz)	NÚMERO DE ELEMENTOS DA MALHA				
	256	% erro	328	% erro	384
1	0,02250	3,6%	0,02335	1,5%	0,02300
3	0,10730	2,3%	0,10985	0,5%	0,10925
6	0,29635	2,0%	0,30235	0,5%	0,30085
10	0,56315	1,7%	0,57305	0,5%	0,57015
30	1,52520	1,1%	1,54175	0,4%	1,53620
40	1,72350	0,4%	1,73100	0,2%	1,72835
50	1,73610	0,2%	1,73245	0,0%	1,73290
60	1,61400	1,1%	1,59620	0,3%	1,60160
70	1,39730	2,3%	1,36655	0,7%	1,37650
100	0,80115	1,5%	0,78945	0,4%	0,79235
160	1,02865	0,4%	1,03315	0,1%	1,03220
320	1,00800	0,3%	1,01080	0,1%	1,01000
500	1,01530	0,2%	1,01700	0,0%	1,01720

A tab. (3) mostra dados de tempo de execução da simulação numérica para quatro ciclos completos de oscilação da fresta de revestimento. O equipamento utilizado para as simulações numéricas é um PC com processador de 1 GHz e 2 Gbytes de memória RAM.

Tabela 3 – Tempo de execução da simulação numérica para quatro ciclos completos de oscilação da fresta de revestimento

Elementos na malha	Número de graus de liberdade	Tempo de execução (min)
256	5276	5,25
328	6668	8,75
386	7740	12,25

A sensibilidade do fator de amplificação em relação ao passo de tempo está mostrada na tab. (4) para a malha de 328 elementos. A coluna 1/30 mostra fatores de amplificação para um passo de tempo correspondente a 30 leituras por ciclo. Analogamente para as colunas 1/40 e 1/50.

Tabela 4 – Fator de amplificação para cada frequência e malha. Diferença % entre 2 malhas para a mesma frequência.

Frequência (Hz)	PASSO DE TEMPO				
	1/30 (1/f)	% erro	1/40 (1/f)	% erro	1/50 (1/f)
1	0,02345	0,4%	0,02335	0,2%	0,02330
3	0,10865	1,1%	0,10985	0,7%	0,11065
6	0,29790	1,5%	0,30235	0,9%	0,30510
10	0,56365	1,6%	0,57305	1,0%	0,57895
30	1,50145	2,6%	1,54175	1,6%	1,56620
40	1,64600	4,9%	1,73100	1,8%	1,76295
50	1,67680	3,2%	1,73245	0,2%	1,72855
60	1,54565	3,2%	1,59620	1,9%	1,62775
70	1,31005	4,1%	1,36655	1,1%	1,38220
100	0,82170	4,1%	0,78945	3,1%	0,76590
160	1,09090	5,6%	1,03315	0,4%	1,03760
320	1,01000	0,1%	1,01080	0,1%	1,00970
500	1,01685	0,0%	1,01700	0,0%	1,01690

O tempo de execução da simulação numérica para um ciclo completo da fresta de revestimento está ilustrado na tab. (5).

Tabela 5 – Tempo de execução da simulação numérica para um ciclo completo de oscilação da fresta de revestimento e diferentes passos de tempo

Passo de tempo (s)	Tempo de execução (min)
1/30 (1/f)	6,5
1/40 (1/f)	8,75
1/50 (1/f)	11,25

A malha de 328 elementos e o passo de tempo de 40 leituras por ciclo de variação da fresta de revestimento foram escolhidos por apresentarem um bom balanço entre a porcentagem de erro e o tempo de execução.

3.2

Características da variação de espessura em decorrência da oscilação da fresta de revestimento

Conforme apresentado por Romero & Carvalho (2008), nos casos estudados a espessura de revestimento sempre oscila na mesma frequência da fresta de revestimento, independentemente de qualquer parâmetro de processo ou variável geométrica. Por outro lado, a amplitude de variação da espessura e a defasagem da

oscilação dependem da frequência de oscilação da fresta de revestimento, como mostrado nesta seção.

A fig. (24) mostra a geometria inicialmente escolhida para ilustrar as características da variação de espessura em decorrência de uma oscilação da fresta de revestimento. A fresta de revestimento (H_d) em regime permanente é 0,100 mm e sua amplitude de oscilação é 0,010 mm. A espessura do revestimento em regime permanente é 0,050 mm, isto é metade da fresta de revestimento. Os parâmetros de processo estão representados na tab. (6).

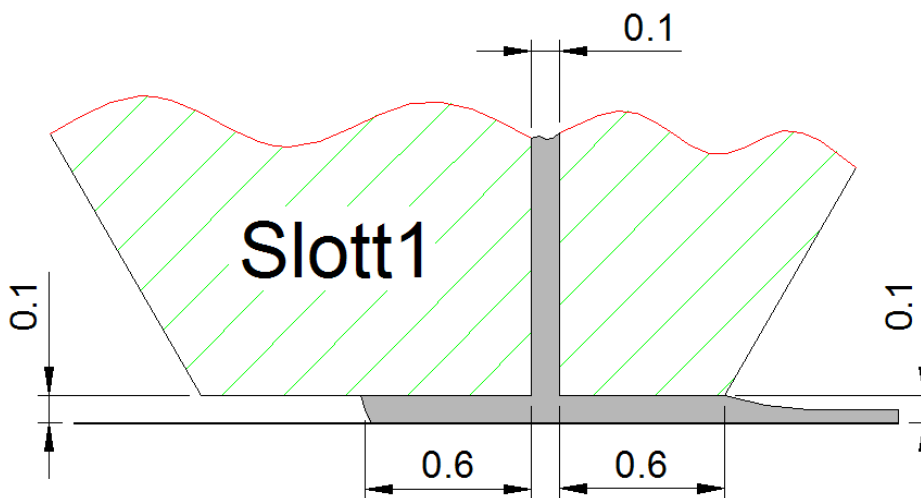


Figura 24 – Geometria utilizada na simulação numérica para comparação entre a oscilação da fresta de revestimento e a variação da espessura

Tabela 6 – Parâmetros de processo utilizados na simulação numérica para comparação entre a oscilação da fresta de revestimento e a variação da espessura

$Ca = \frac{\mu V}{\sigma}$	$Re = \frac{\rho V H_d}{\mu}$	P_{vac} (Pa)	V_w (m/min)	μ (cps)	ρ (Kg/l)	σ (dyn/cm)
0,2	0,33	-1300	6	30	1	15

A fig. (25) mostra o campo de pressão e as linhas de corrente do escoamento na fresta de revestimento em alguns instantes durante um ciclo de oscilação. Os números ilustrados na fresta de revestimento são valores de pressão.

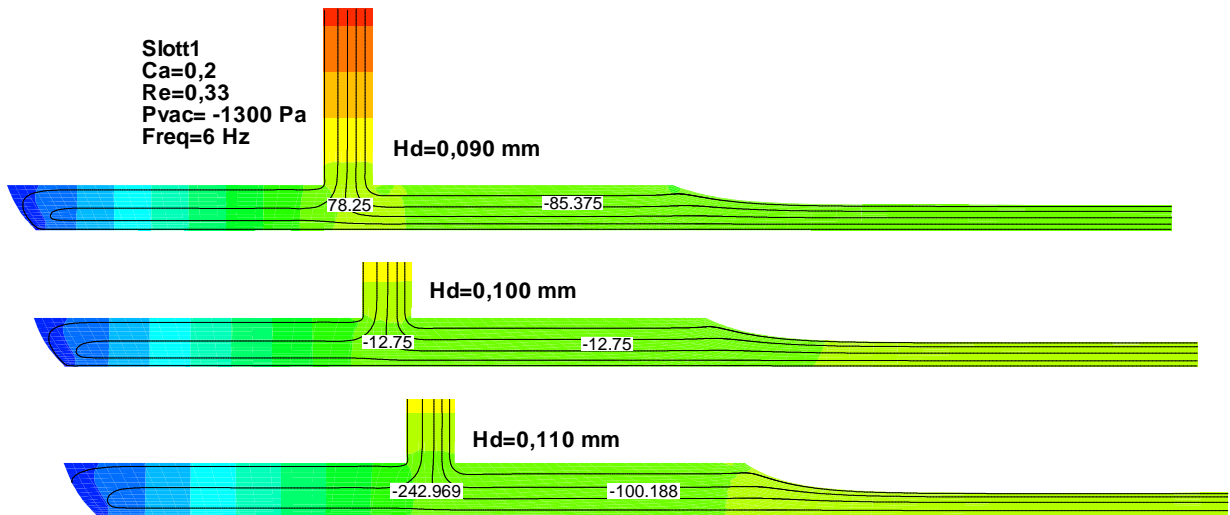


Figura 25 – Campo de pressão e linhas de corrente na fresta de revestimento em alguns instantes durante um ciclo de oscilação

As fig. (26) a (31) mostram a oscilação da fresta de revestimento em várias frequências e a variação de espessura que ela provoca.

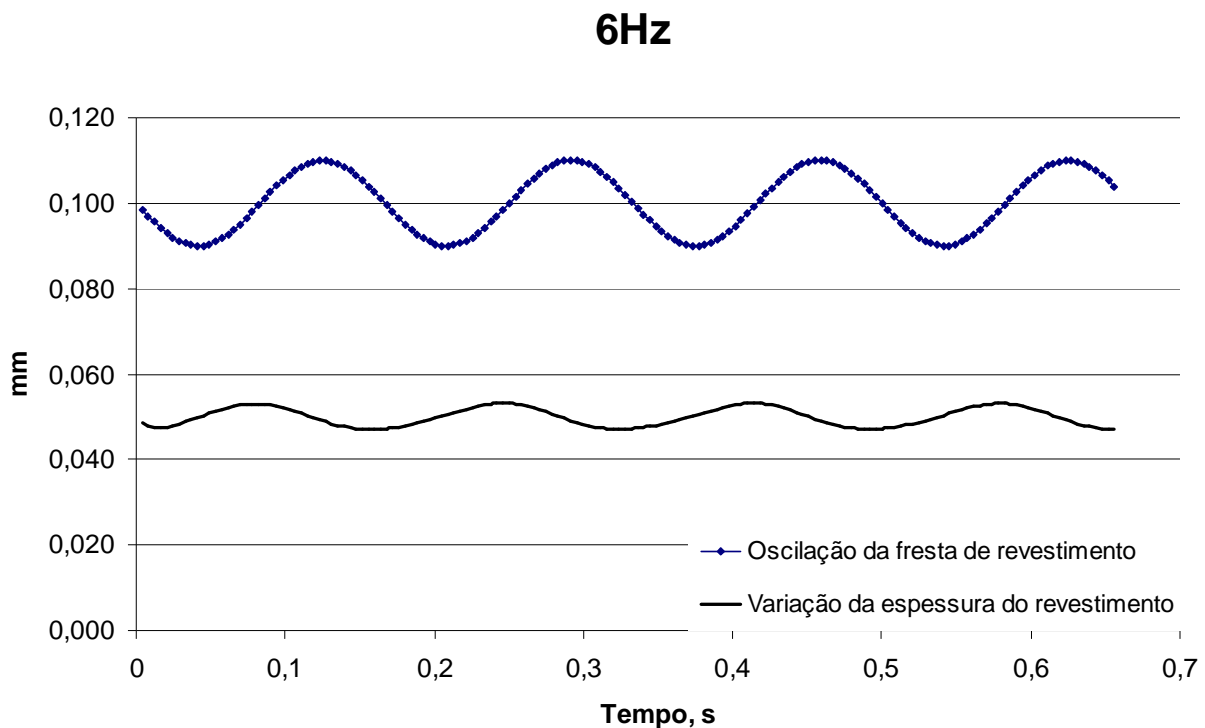


Figura 26 – Oscilação da fresta de revestimento na frequência de 6 Hz e variação da espessura de revestimento correspondente

10Hz

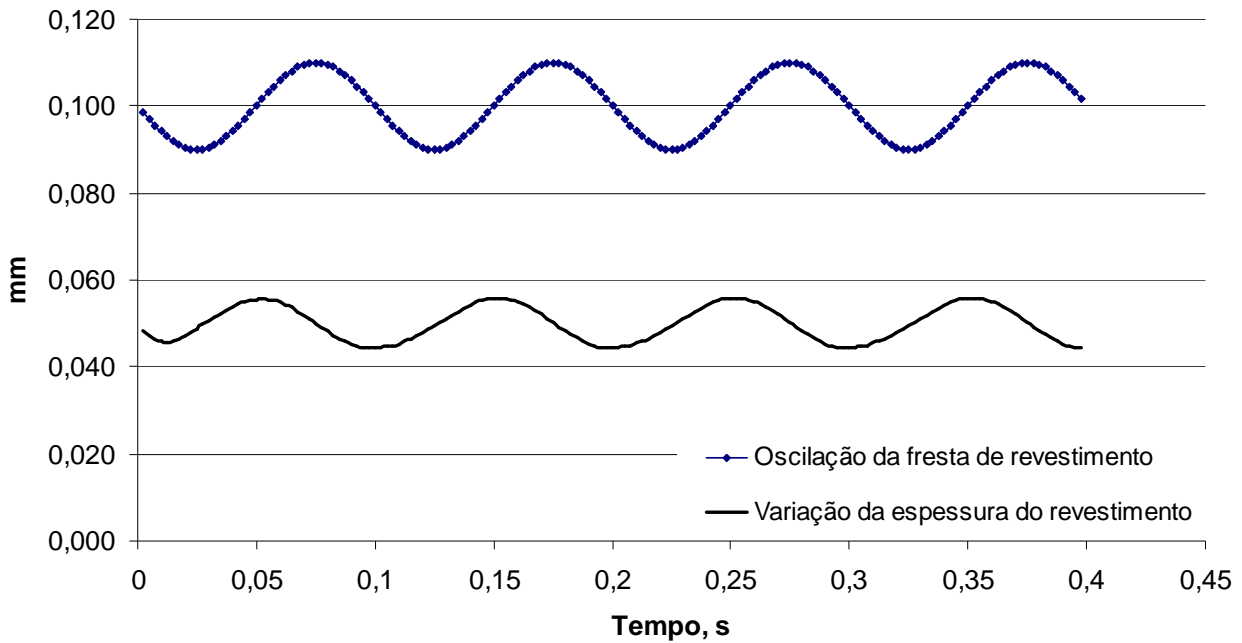


Figura 27 – Oscilação da fresta de revestimento na frequência de 10 Hz e variação da espessura de revestimento correspondente

30Hz

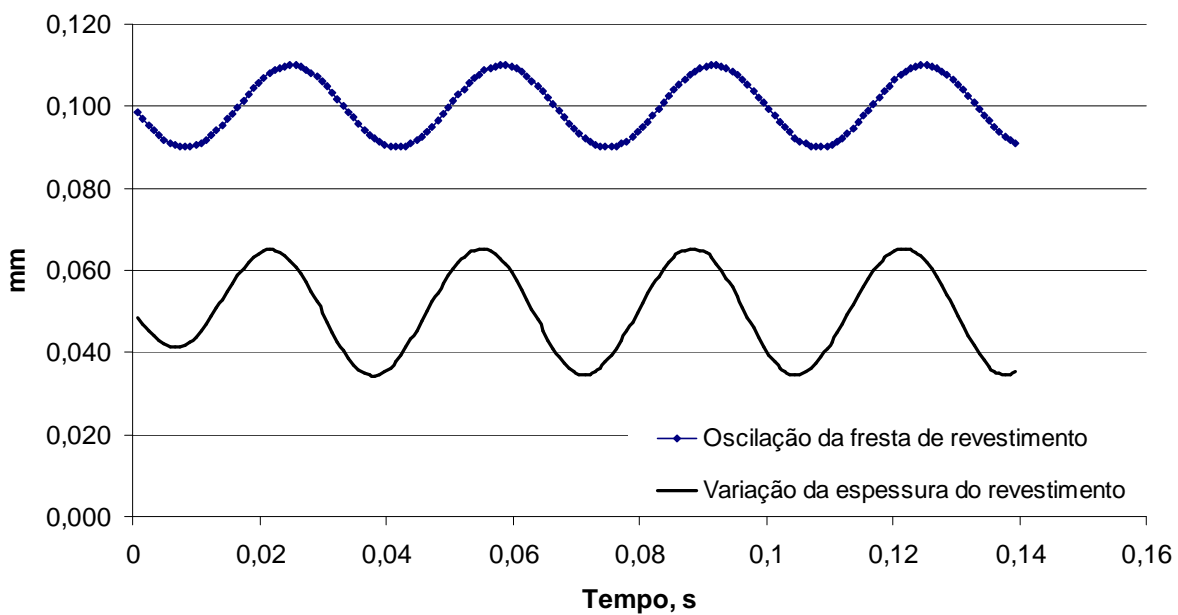


Figura 28 – Oscilação da fresta de revestimento na frequência de 30 Hz e variação da espessura de revestimento correspondente

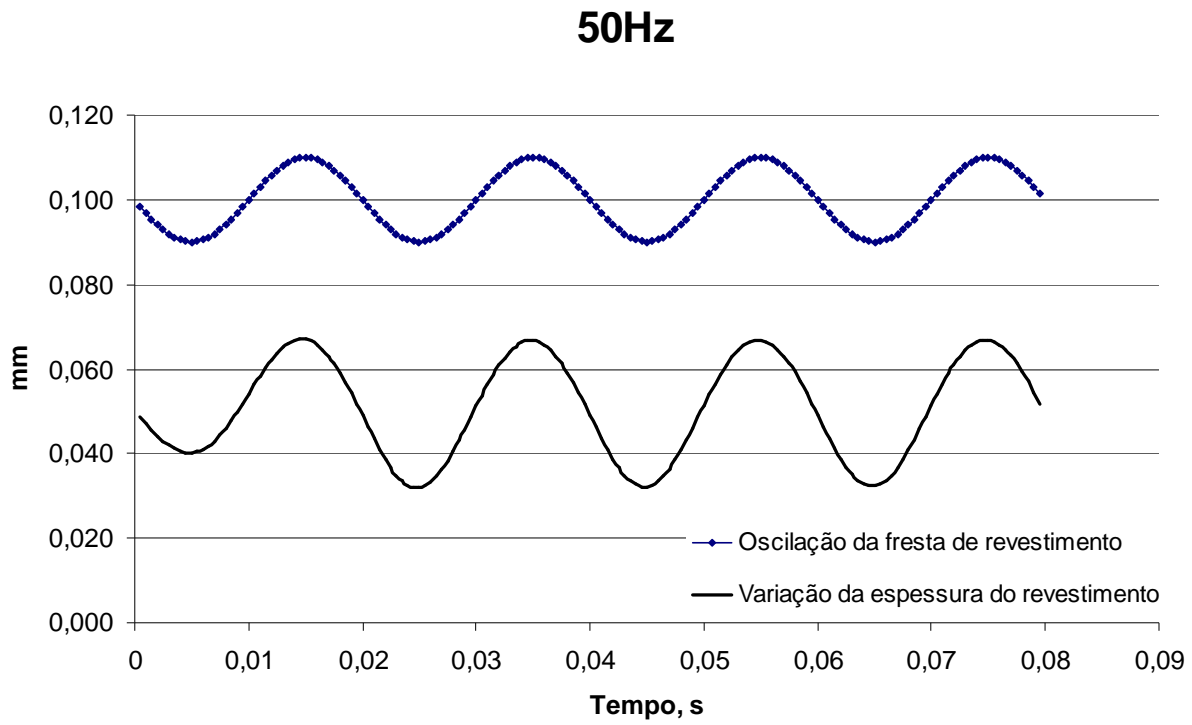


Figura 29 – Oscilação da fresta de revestimento na frequência de 50 Hz e variação da espessura de revestimento correspondente

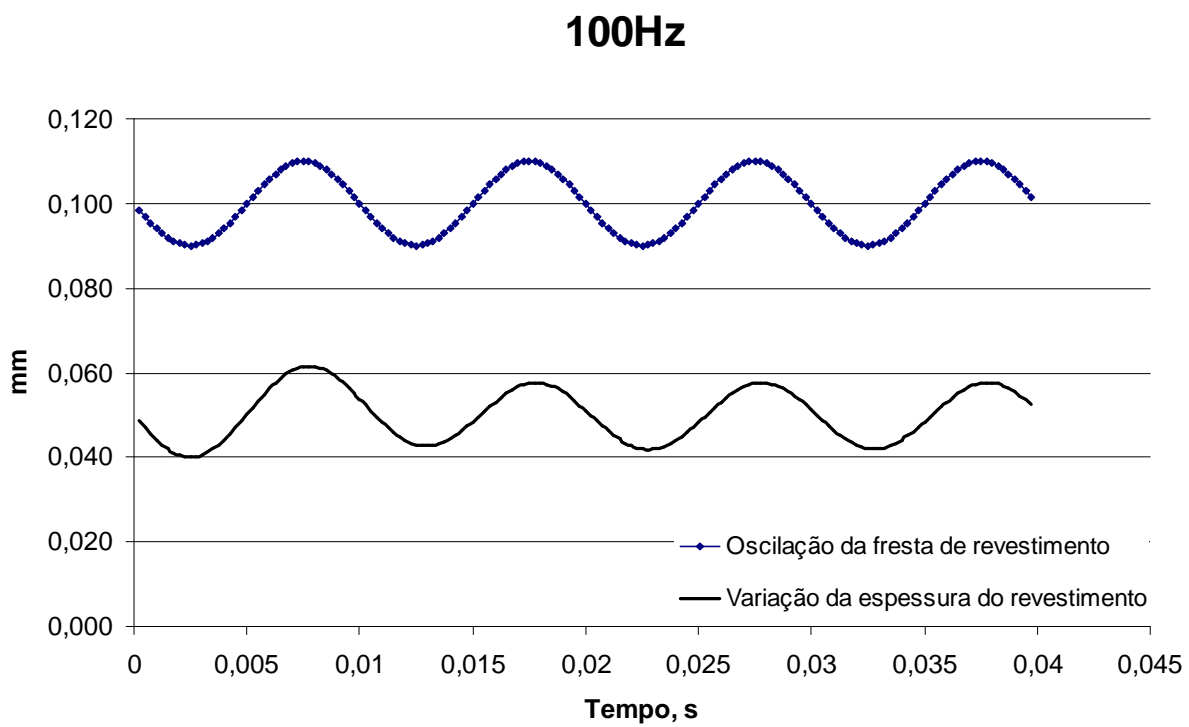


Figura 30 – Oscilação da fresta de revestimento na frequência de 100 Hz e variação da espessura de revestimento correspondente

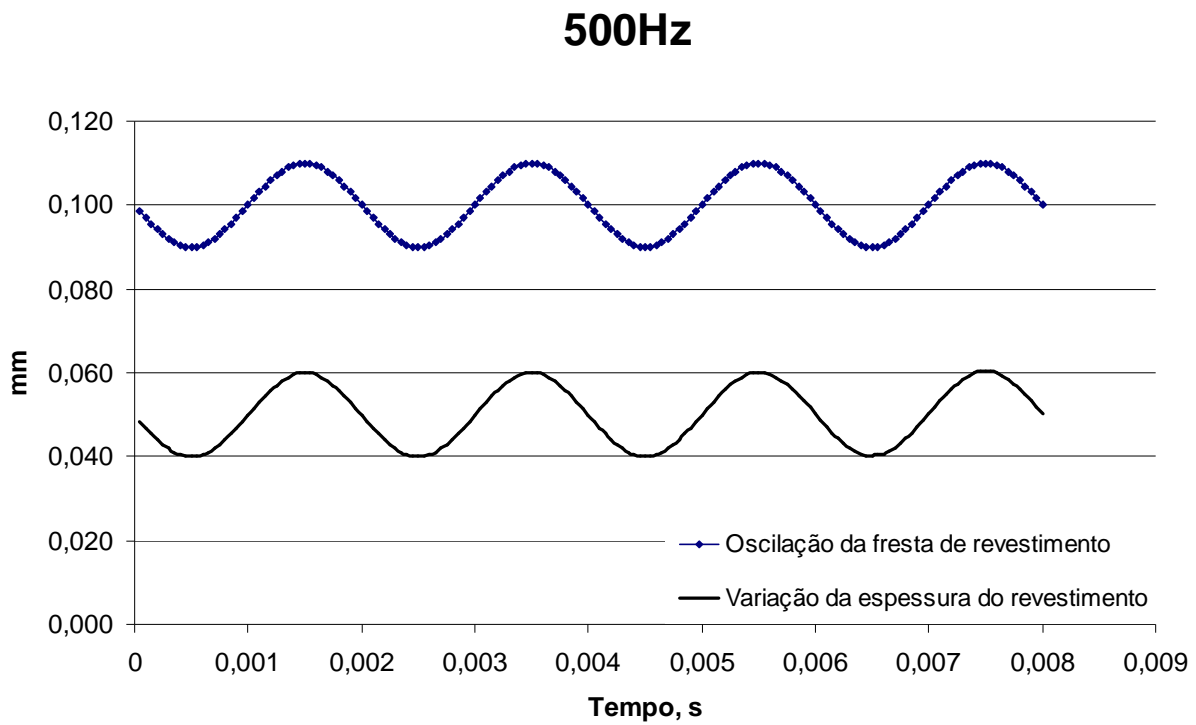


Figura 31 – Oscilação da fresta de revestimento na frequência de 500 Hz e variação da espessura de revestimento correspondente

Analisando as fig. (26) a (31), pode-se notar que com o aumento da frequência, a variação da espessura do revestimento tende a ficar em fase com a oscilação da fresta de revestimento e permanecer nesta condição.

A mesma análise que o caso anterior foi realizada para a geometria e os parâmetros de processo da fig. (32) e tab. (7). O resultado está mostrado nas fig. (33) a (38) para as frequências de 6 Hz, 10 Hz, 30 Hz, 50 Hz, 100 Hz e 500 Hz.

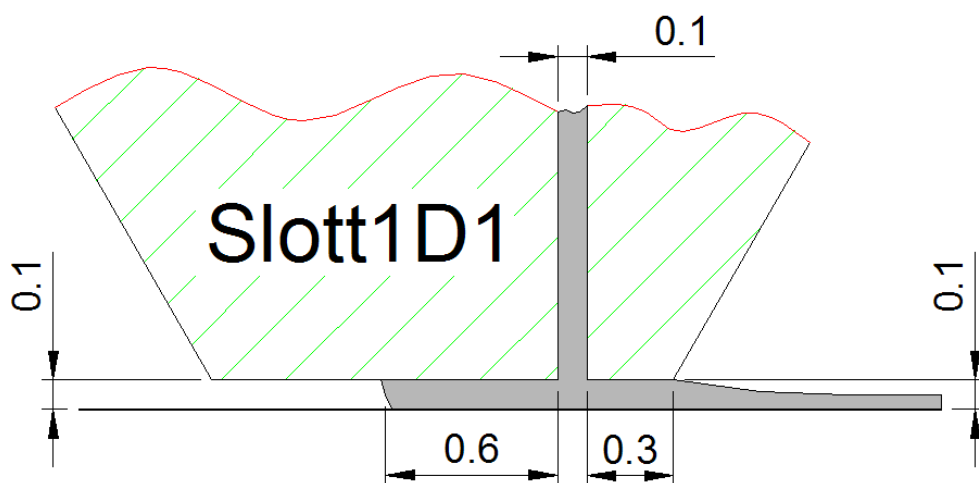


Figura 32 – Geometria utilizada na simulação numérica para comparação entre a oscilação da fresta de revestimento e a variação da espessura

Tabela 7 – Parâmetros de processo utilizados na simulação numérica para comparação entre a oscilação da fresta de revestimento e a variação da espessura

$Ca = \frac{\mu V}{\sigma}$	$Re = \frac{\rho V H_d}{\mu}$	P_{vac} (Pa)	V_w (m/min)	μ (cps)	ρ (Kg/l)	σ (dyn/cm)
0,2	0,3	-1300	6	30	1	15

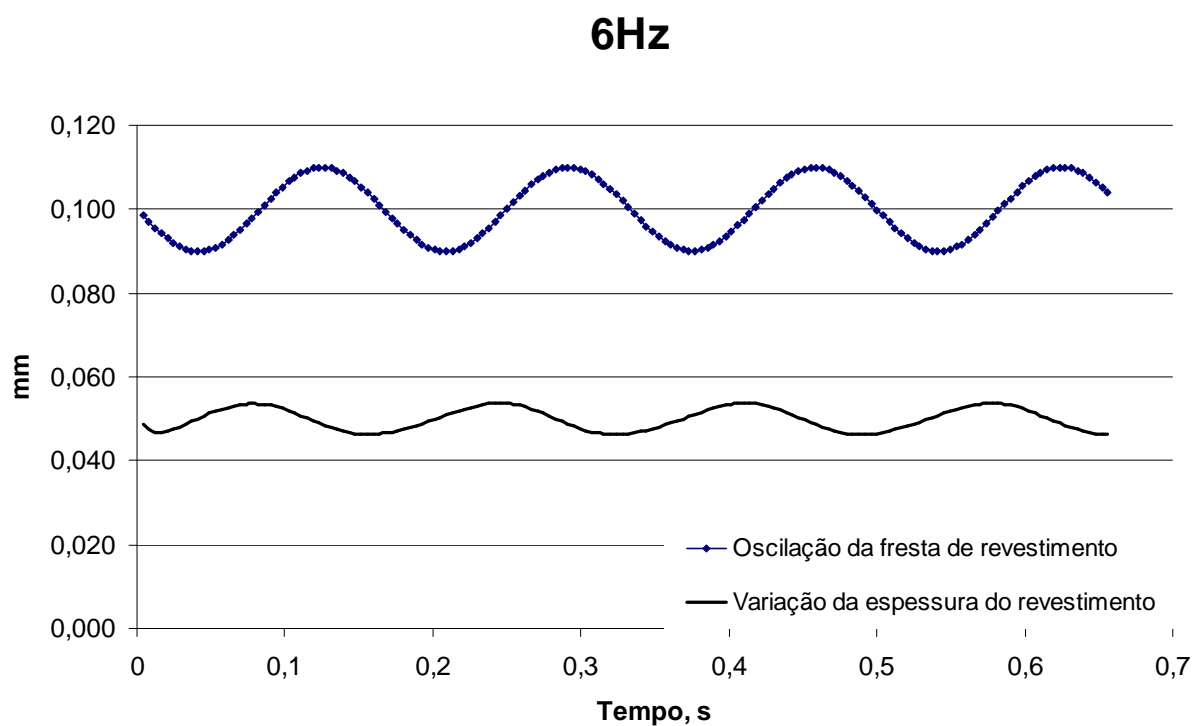


Figura 33 – Oscilação da fresta de revestimento na frequência de 6 Hz e variação da espessura de revestimento correspondente

10Hz

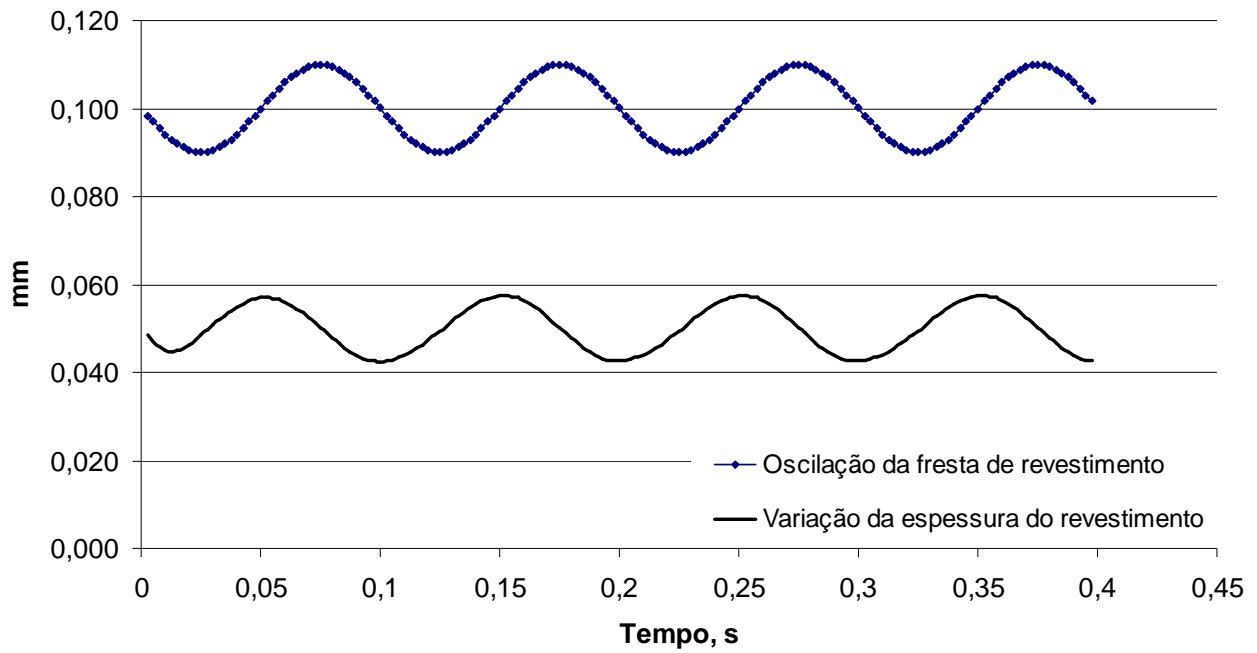


Figura 34 – Oscilação da fresta de revestimento na frequência de 10 Hz e variação da espessura de revestimento correspondente

30Hz

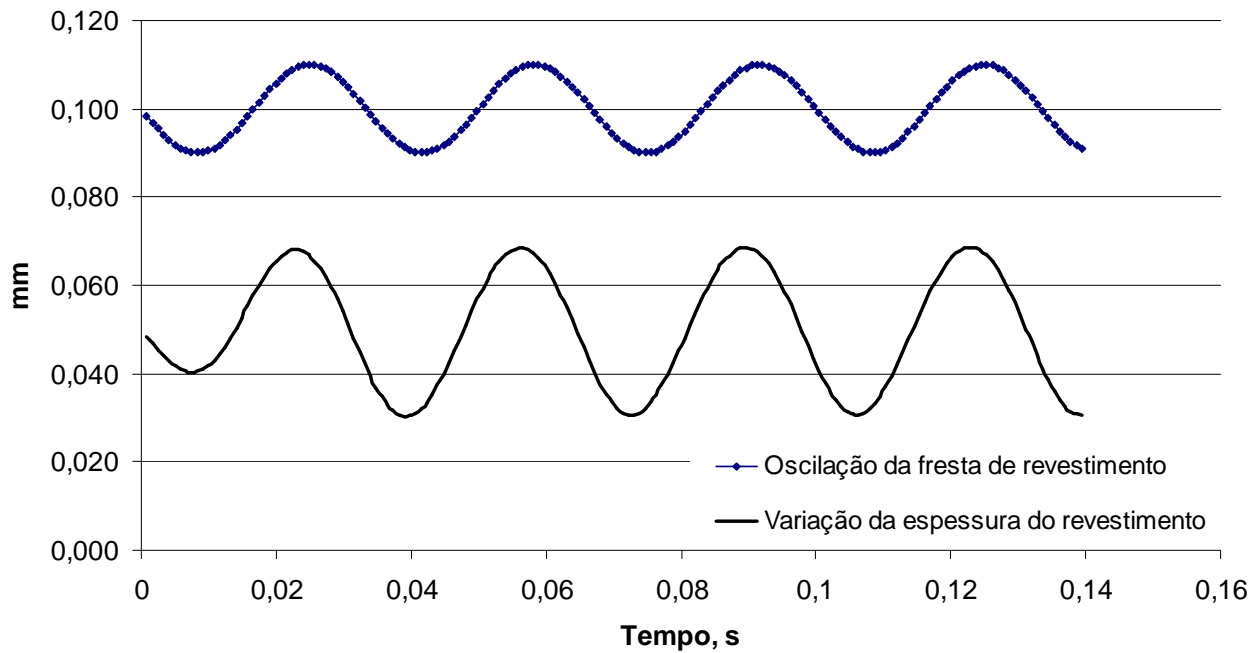


Figura 35 – Oscilação da fresta de revestimento na frequência de 30 Hz e variação da espessura de revestimento correspondente

50Hz

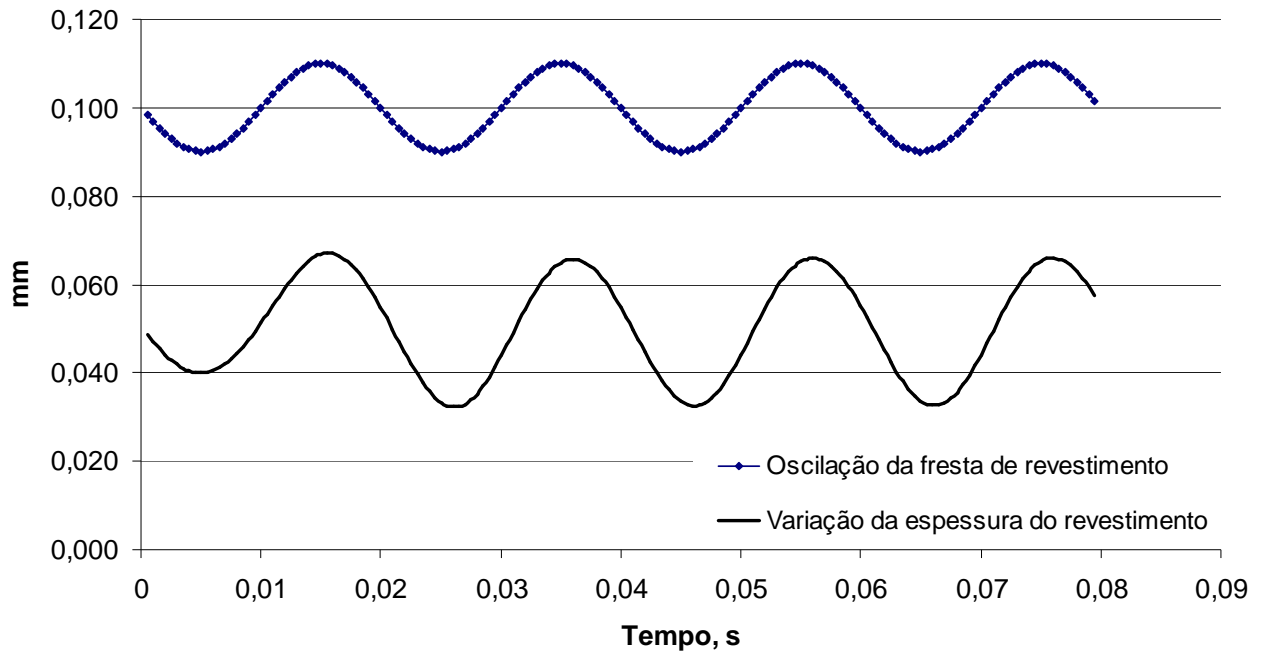


Figura 36 – Oscilação da fresta de revestimento na frequência de 50 Hz e variação da espessura de revestimento correspondente

100Hz

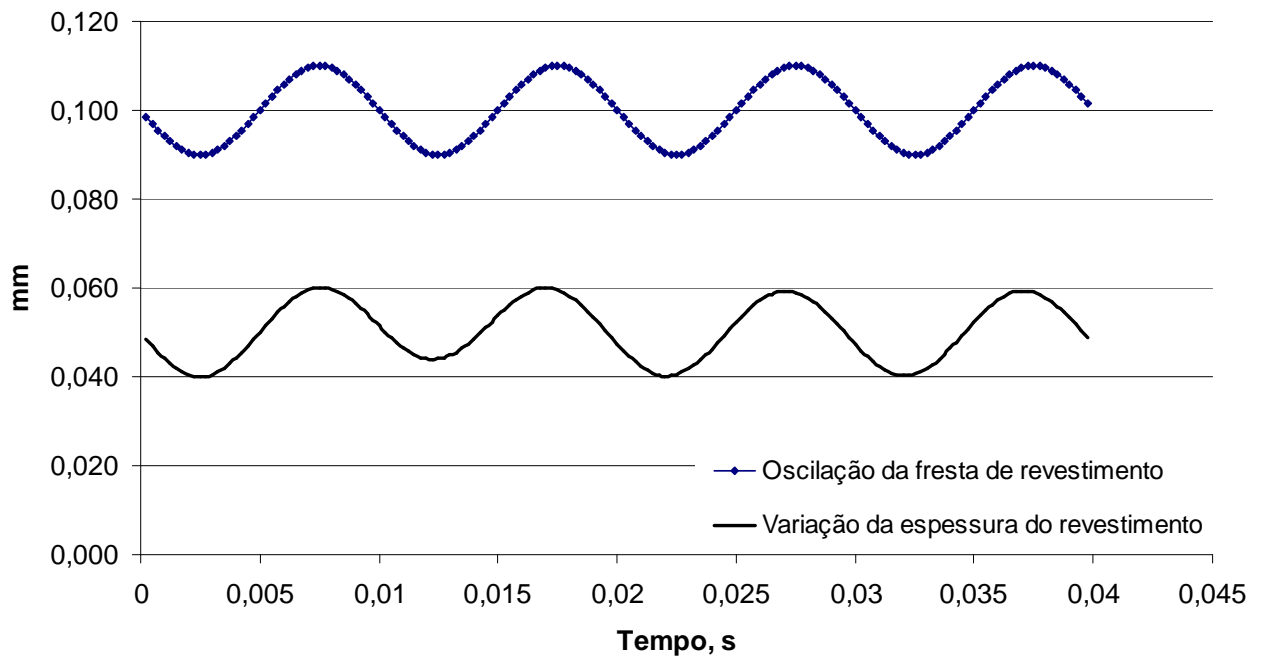


Figura 37 – Oscilação da fresta de revestimento na frequência de 100 Hz e variação da espessura de revestimento correspondente

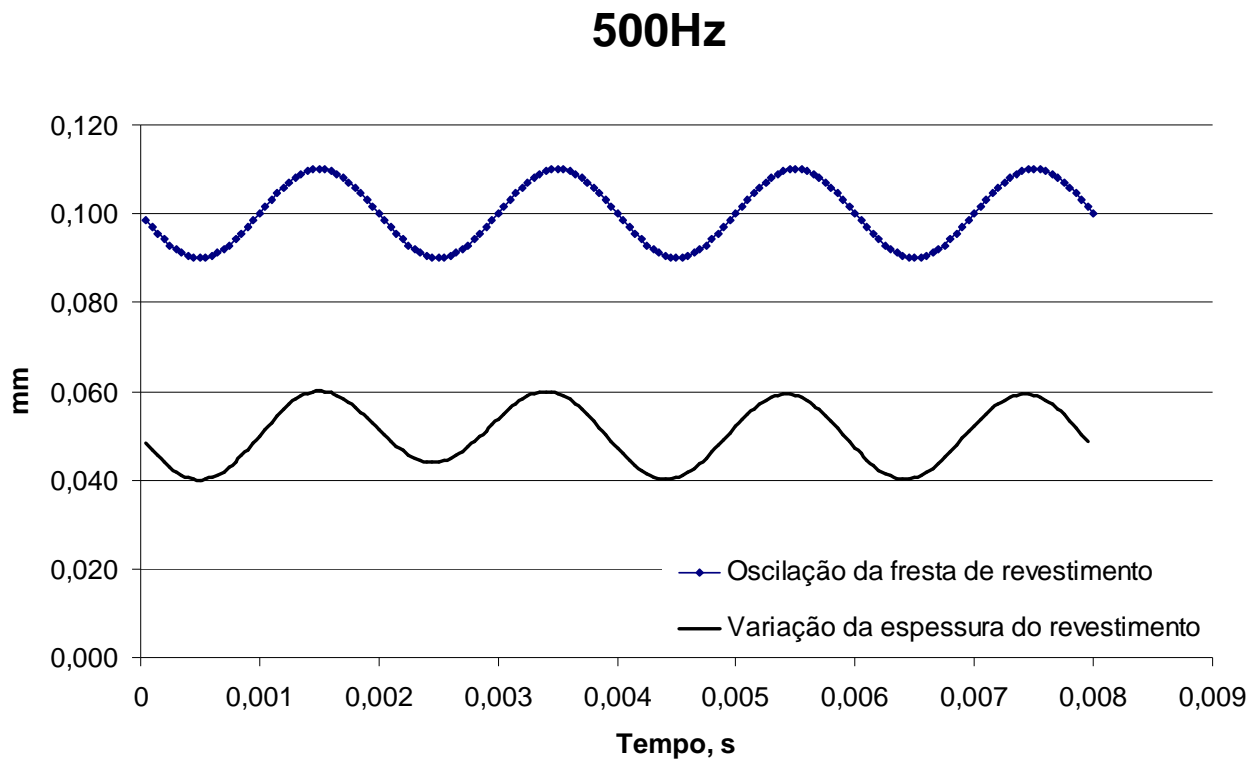


Figura 38 – Oscilação da fresta de revestimento na frequência de 500 Hz e variação da espessura de revestimento correspondente

Analisando as fig. (33) a (38), novamente pode-se notar que com o aumento da frequência, a variação da espessura do revestimento tende a ficar em fase com a oscilação da fresta de revestimento e permanecer nesta condição.

Repetindo a mesma análise do caso anterior para a nova geometria da fig. (39) e os parâmetros de processo da tab. (8), tem-se os resultados mostrados nas fig. (40) a (45), para as mesmas frequências do caso anterior.

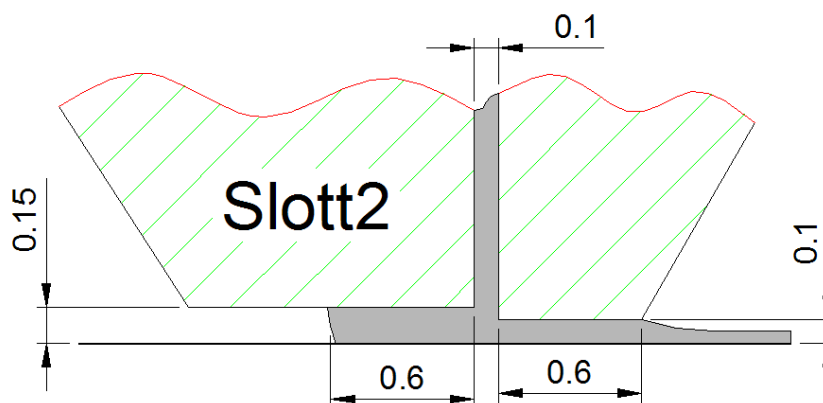


Figura 39 – Geometria utilizada na simulação numérica para comparação entre a oscilação da fresta de revestimento e a variação da espessura

Tabela 8 – Parâmetros de processo utilizados na simulação numérica para comparação entre a oscilação da fresta de revestimento e a variação da espessura

$Ca = \frac{\mu V}{\sigma}$	$Re = \frac{\rho V H_d}{\mu}$	P_{vac} (Pa)	V_w (m/min)	μ (cps)	ρ (Kg/l)	σ (dyn/cm)
0,2	0,33	-600	6	30	1	15

6Hz

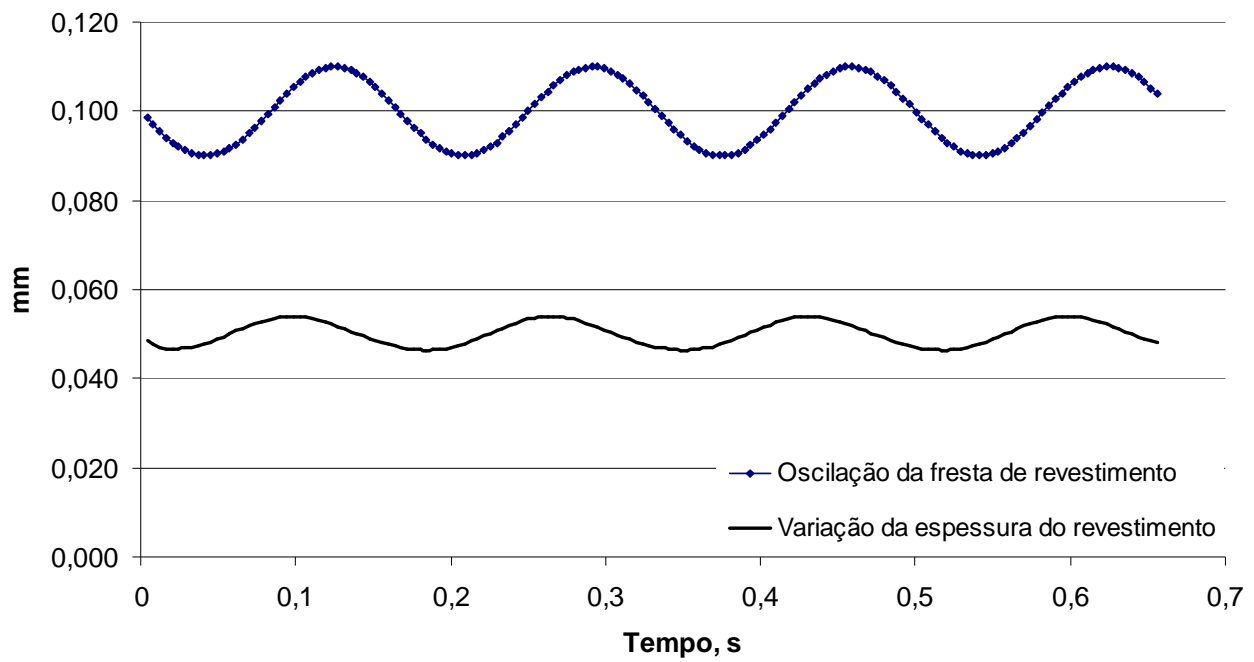


Figura 40 – Oscilação da fresta de revestimento na frequência de 6 Hz e variação da espessura de revestimento correspondente

10Hz

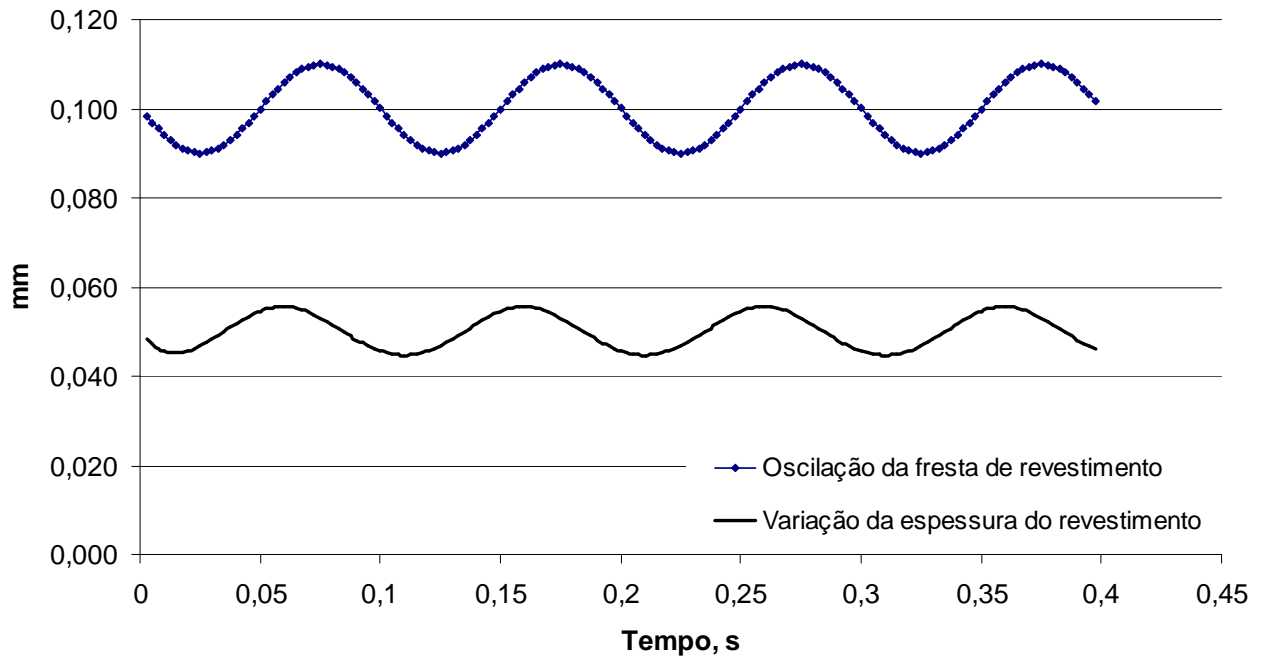


Figura 41 – Oscilação da fresta de revestimento na frequência de 10 Hz e variação da espessura de revestimento correspondente

30Hz

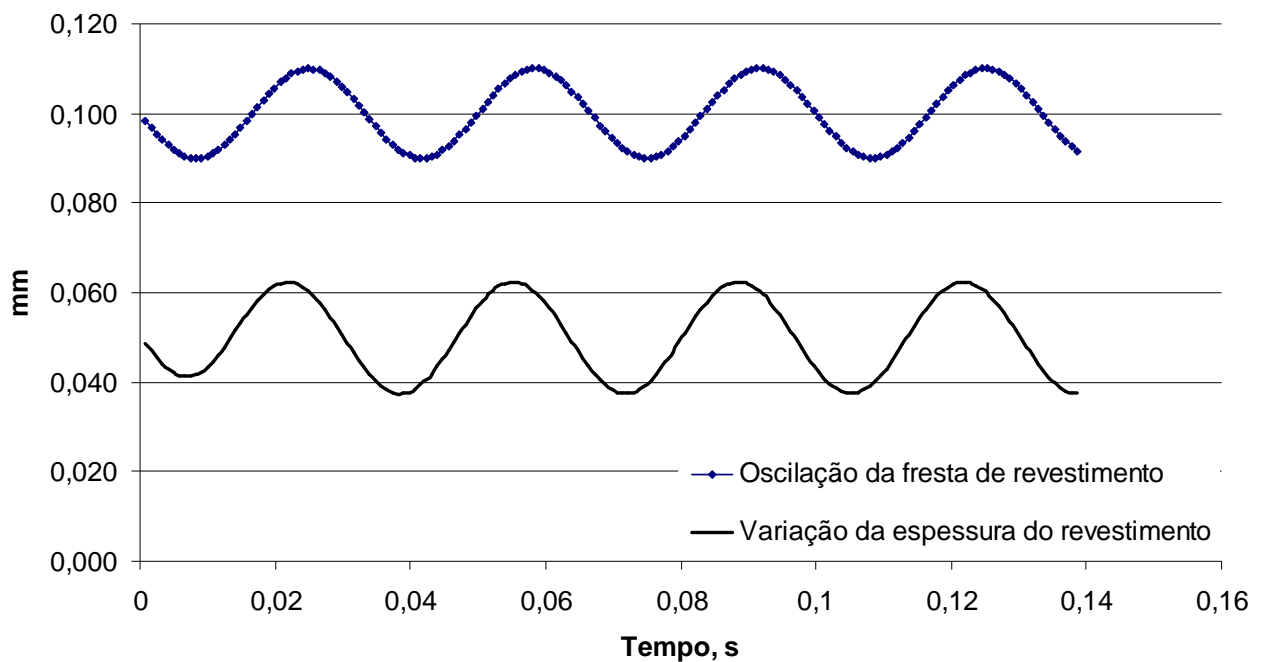


Figura 42 – Oscilação da fresta de revestimento na frequência de 30 Hz e variação da espessura de revestimento correspondente

50Hz

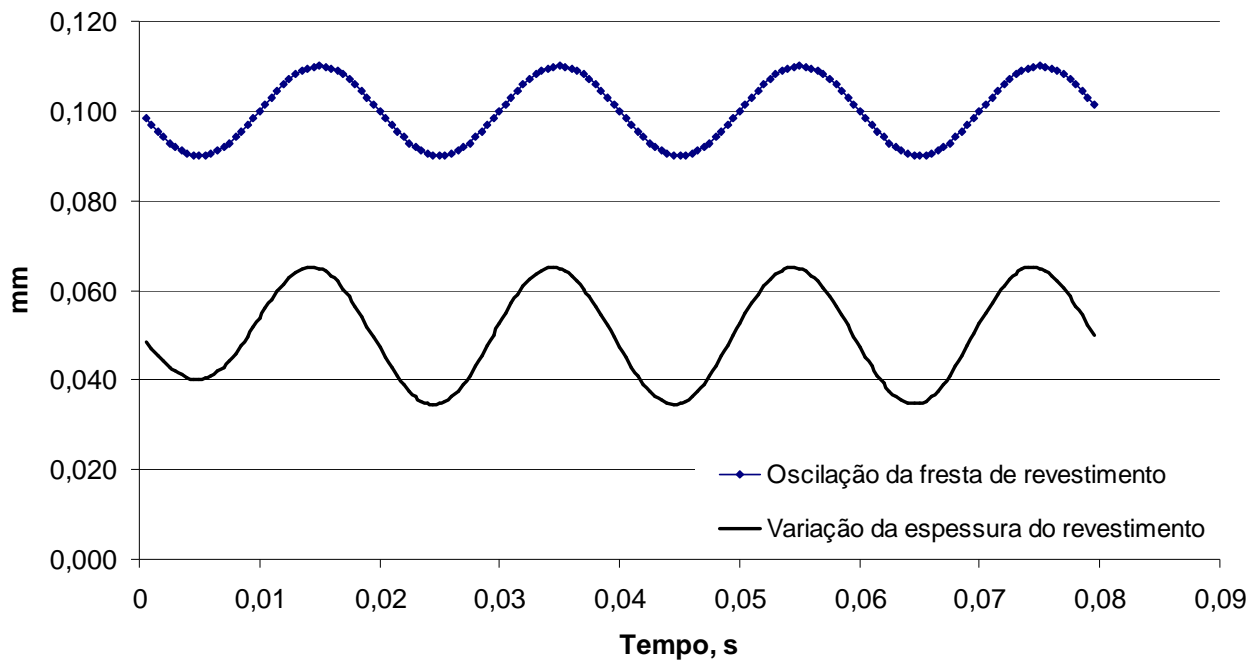


Figura 43 – Oscilação da fresta de revestimento na frequência de 50 Hz e variação da espessura de revestimento correspondente

100Hz

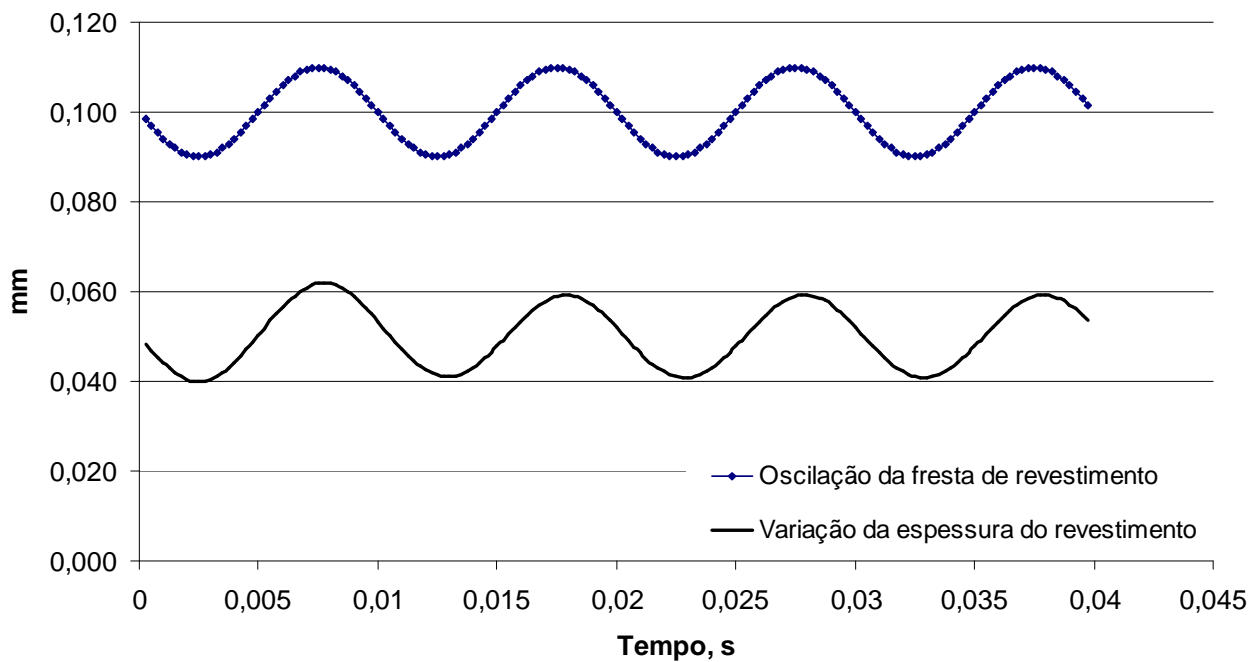


Figura 44 – Oscilação da fresta de revestimento na frequência de 100 Hz e variação da espessura de revestimento correspondente

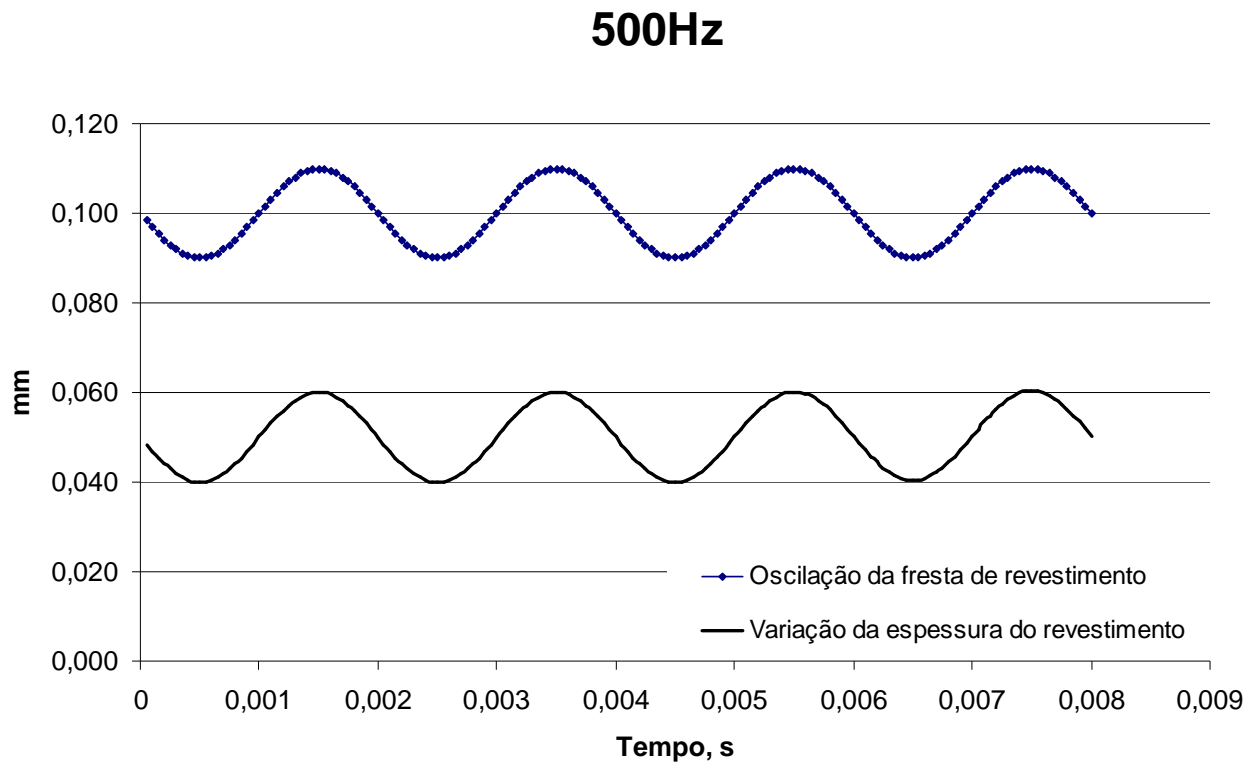


Figura 45 – Oscilação da fresta de revestimento na frequência de 500 Hz e variação da espessura de revestimento correspondente

Conforme exposto anteriormente, três conclusões podem ser tiradas da observação dos dados apresentados nesta seção:

- a) A frequência de oscilação da espessura é sempre igual à frequência de oscilação da fresta de revestimento;
- b) A amplitude de variação da espessura depende da frequência de oscilação da fresta de revestimento;
- c) A oscilação da espessura tende a ficar em fase com a oscilação da fresta de revestimento com o aumento da frequência, independentemente da geometria da barra de revestimento.

3.3 Resposta em frequência do fator de amplificação

O fator de amplificação representa a razão entre a amplitude de variação da espessura, $h_m(\omega)$, e a amplitude de variação da fresta de revestimento, H_m .

$$\alpha(\omega) = \frac{h_m(\omega)}{H_m} \quad (103)$$

Conforme indicado na eq. (103), o fator de amplificação é função da frequência de oscilação da fresta de revestimento, além dos parâmetros de processo (velocidade, viscosidade, tensão superficial, fresta de revestimento, nível de vácuo, etc.) e geométricos do lábio da barra de revestimento.

Nesta seção são apresentados os resultados de várias simulações para avaliar a sensibilidade do fator de amplificação a mudanças nos parâmetros de processo e variáveis geométricas.

A geometria da fig. (46) e os parâmetros de processo da tab. (9) foram escolhidos como base para comparação.

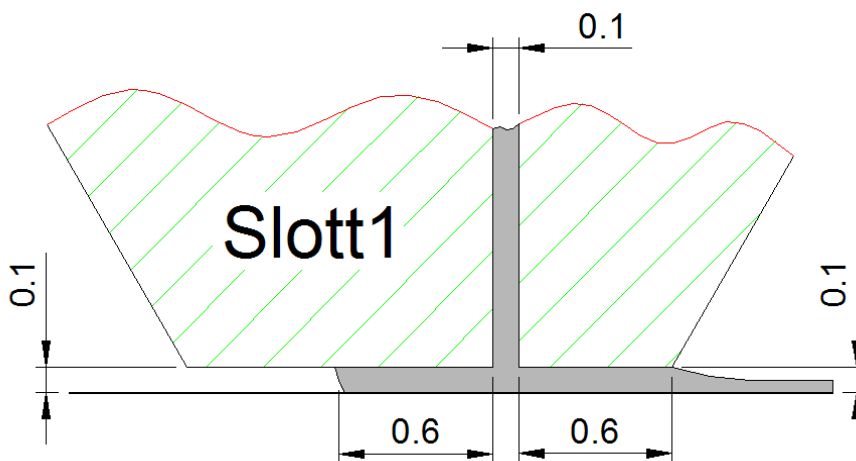


Figura 46 – Geometria base para comparação da resposta em frequência do fator de amplificação

Tabela 9 – Parâmetros de processo base para comparação da resposta em frequência do fator de amplificação

$Ca = \frac{\mu V}{\sigma}$	$Re = \frac{\rho V H_d}{\mu}$	P_{vac} (Pa)	V_w (m/min)	μ (cps)	ρ (Kg/l)	σ (dyn/cm)
0,2	0,33	-1300	6	30	1	15

A amplitude de oscilação da fresta de revestimento foi fixada em 0,010 mm e a espessura do revestimento em 0,050 mm.

O fator de amplificação em função da frequência para o caso de referência nas condições acima descritas está representado na fig. (47).

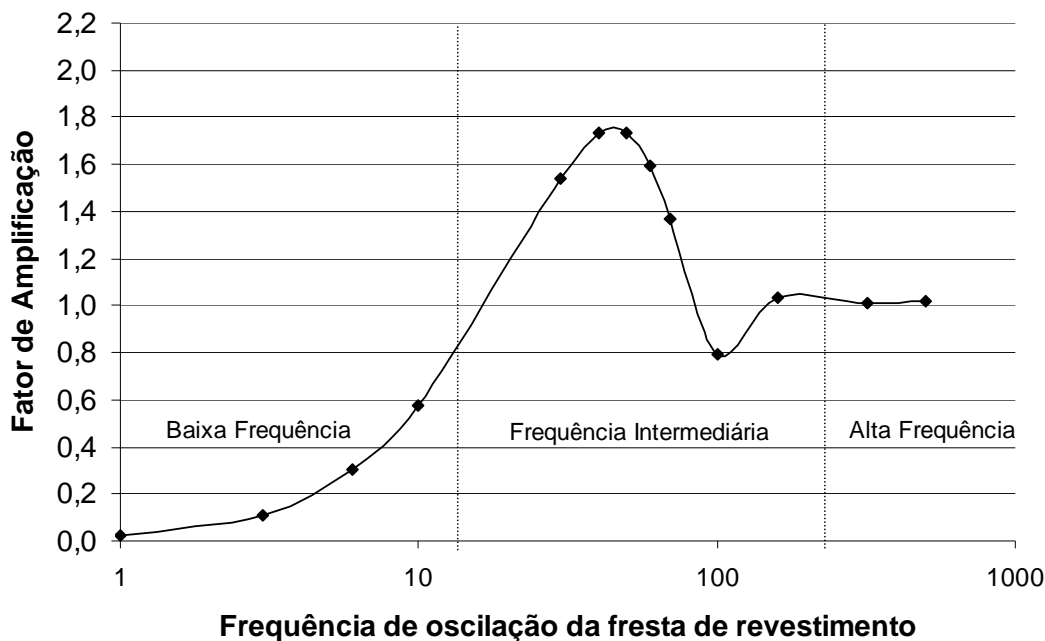


Figura 47 – Resposta em frequência do fator de amplificação para a geometria da fig. (46), parâmetros de processo da tab. (9), amplitude de oscilação da fresta de revestimento de 0,010 mm e espessura de revestimento de 0,050 mm

A resposta em frequência do fator de amplificação do caso de referência foi dividida em três faixas para ilustrar algumas características presentes em todas as simulações.

A região de baixas frequências apresenta fatores de amplificação crescentes com a oscilação da fresta de revestimento. Quando a frequência tende a valores menores (ou período de oscilação muito elevado), o fator de amplificação tende a zero. Ou seja, a espessura de revestimento tende a não ser afetada. É uma aproximação à operação em regime permanente onde a espessura depende somente da velocidade do substrato e da vazão do líquido revestido.

Um exemplo de oscilação de baixa frequência é o causado pelo desvio da tolerância de batimento do rolo suporte do substrato no revestimento por extrusão em uma cobrideira rodando a 6 m/min. Este problema causaria uma variação da fresta de revestimento na ordem de 0,2 Hz a 2 Hz.

A região de frequências intermediárias apresenta o pico máximo global e um pico mínimo local no fator de amplificação. Motores elétricos convencionais trabalham em uma faixa de rotação nominal entre 1000 rpm e 3000 rpm. Portanto vibrações geradas por estes equipamentos que atingissem a barra de revestimento causariam uma variação da fresta de revestimento na ordem de 10 Hz a 80 Hz.

Na região de altas frequências o fator de amplificação se aproxima da unidade. Esta característica é observada em todas as combinações dos parâmetros de processo e alterações geométricas da barra de revestimento. O escoamento não tem tempo para responder às altas frequências de oscilação e a superfície livre a jusante permanece na mesma posição.

Embora a grande maioria das simulações numéricas tenha resultado em gráficos de resposta em frequência com fatores de amplificação crescentes monotonamente na região de baixas frequências, em alguns casos a curva de crescimento apresenta um ponto de inflexão. A fig. (48), com geometria representada na fig. (49) e os parâmetros de processo da tab. (10), ilustra este fato.

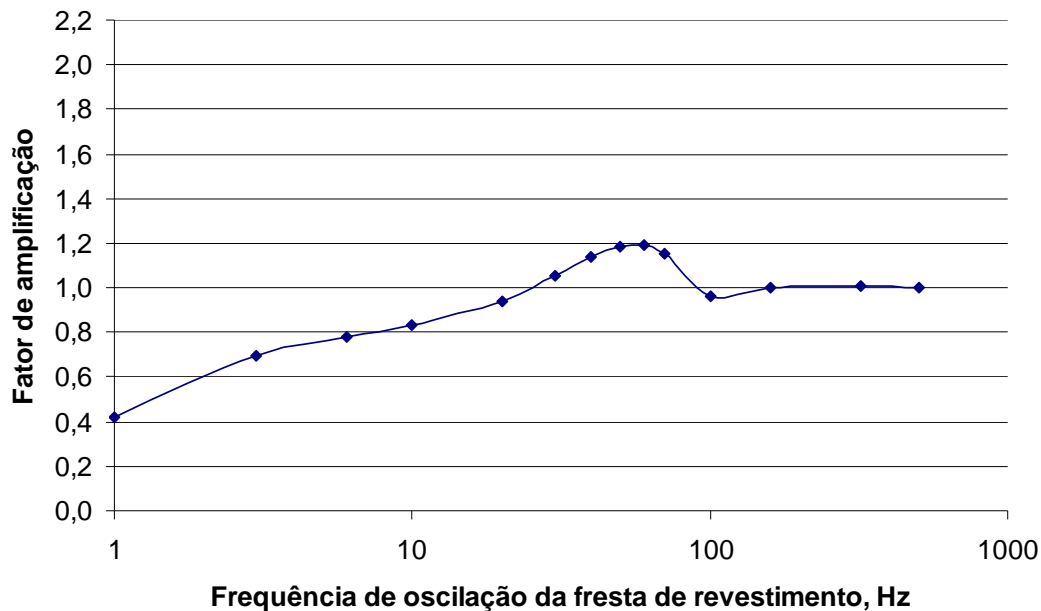


Figura 48 – Resposta em frequência do fator de amplificação para a geometria da fig. (49), parâmetros de processo da tab. (10), amplitude de oscilação da fresta de revestimento de 0,001 mm e espessura de revestimento de 0,050 mm

Tabela 10 – Parâmetros de processo relativos a resposta em frequência da fig. (48)

$Ca = \frac{\mu V}{\sigma}$	$Re = \frac{\rho V H_d}{\mu}$	P_{vac} (Pa)	V_w (m/min)	μ (cps)	ρ (Kg/l)	σ (dyn/cm)
0,4	0,11	-300	6	60	1	15

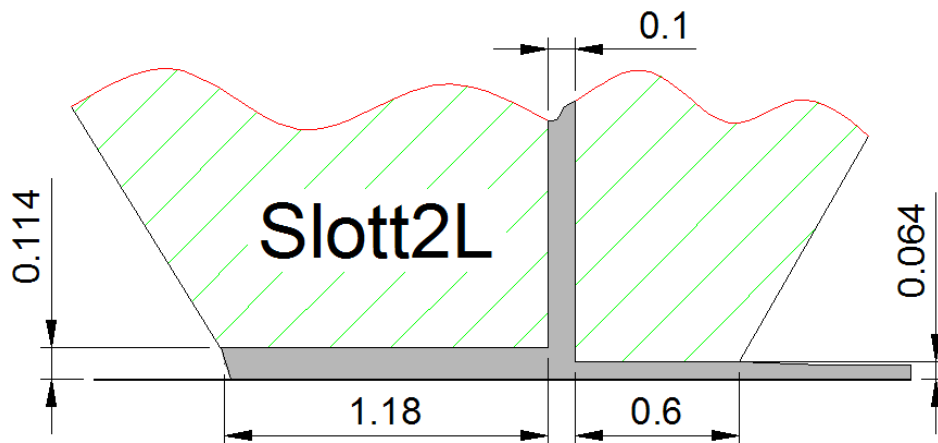


Figura 49 – Exemplo de geometria de um dos casos que não apresentou crescimento monotônico do fator de amplificação com a frequência

O surgimento do ponto de inflexão mostrado na fig. (48) pode indicar o aparecimento de um novo pico local no fator de amplificação na região de baixa frequência, embora este fato não tenha sido observado em nenhuma das simulações numéricas realizadas.

3.3.1

Sensibilidade do fator de amplificação ao ajuste da fresta de revestimento

A fresta de revestimento em regime permanente é um parâmetro de processo facilmente ajustável na maioria dos equipamentos que utilizam o processo de revestimento por extrusão. Por este motivo é um dos primeiros recursos que o engenheiro de processo tem para tentar reduzir o fator de amplificação. A uniformidade da fresta de revestimento ao longo da largura da barra de revestimento é um fator crítico para o processo.

A fig. (50) mostra as geometrias consideradas.

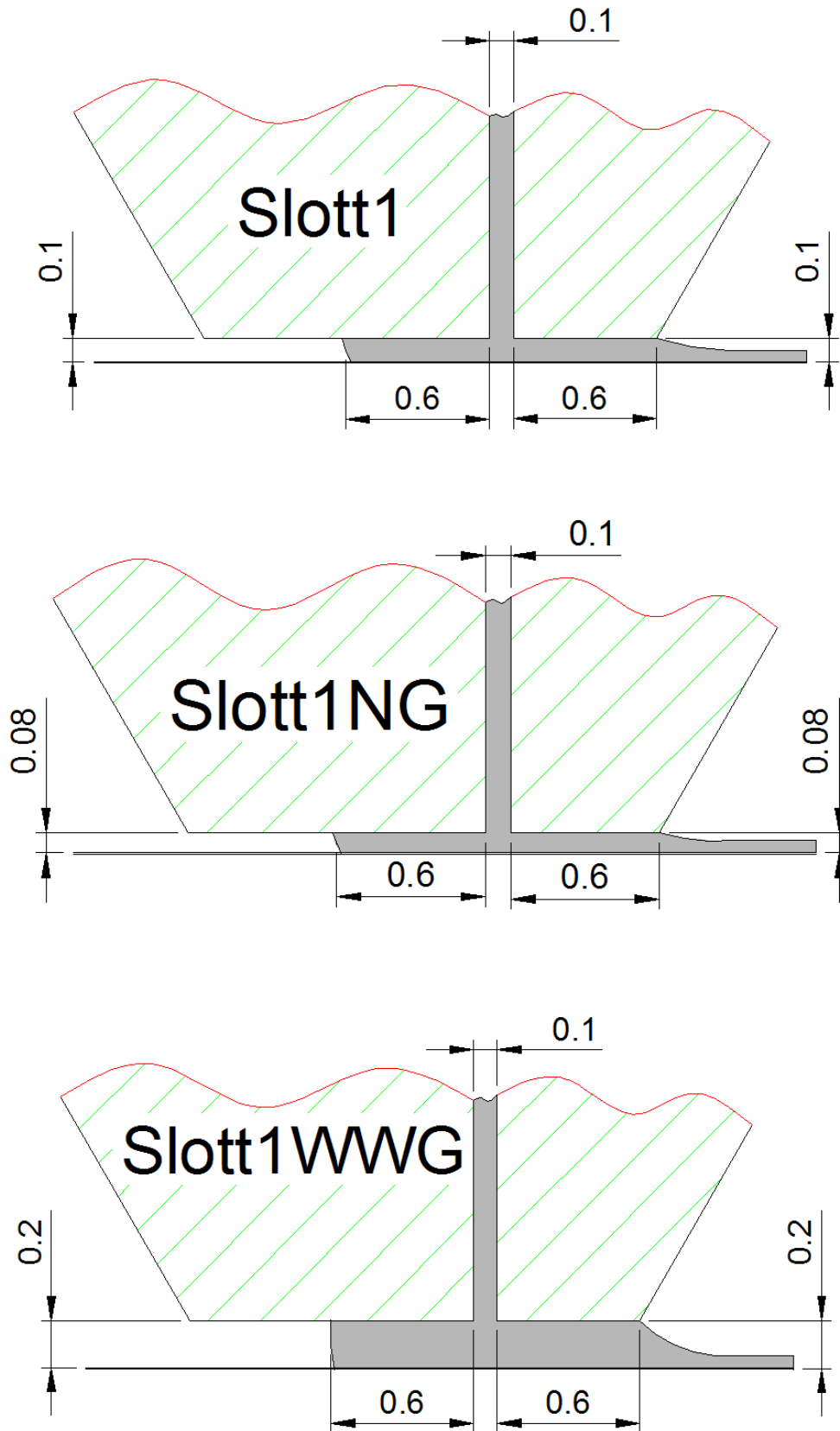


Figura 50 – Geometrias utilizadas para simulação numérica da sensibilidade do fator de amplificação ao ajuste da fresta de revestimento

A fig. (51) representa a resposta em frequência do fator de amplificação para as geometrias da fig. (50) e parâmetros de processo da tab. (9).

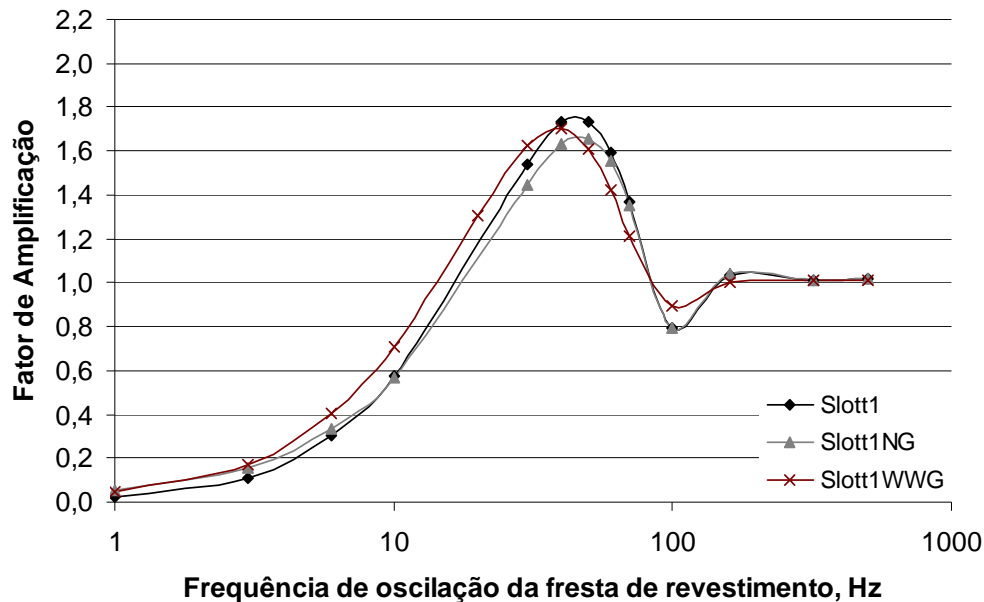


Figura 51 – Resposta em frequência do fator de amplificação para as geometrias da fig. (50) e parâmetros de processo da tab. (9)

A variação no fator de amplificação com a fresta de revestimento para a maioria das frequências não é monotônica, o pode indicar a presença de ajustes da fresta de revestimento que minimizam o fator de amplificação.

3.3.2 Sensibilidade do fator de amplificação ao ajuste da fresta do lábio a montante

Um grande número de fabricantes de barras de revestimento disponibiliza o recurso de ajuste da posição relativa entre os lábios a montante e a jusante. Os ajustes existentes são conhecidos como:

- Overbite*: quando a fresta do lábio a jusante é menor que a fresta do lábio a montante.
- Underbite*: quando a fresta do lábio a jusante é maior que a fresta do lábio a montante.
- Uniforme*: quando as frestas são iguais.

A fig. (52) ilustra as geometrias utilizadas na simulação numérica.

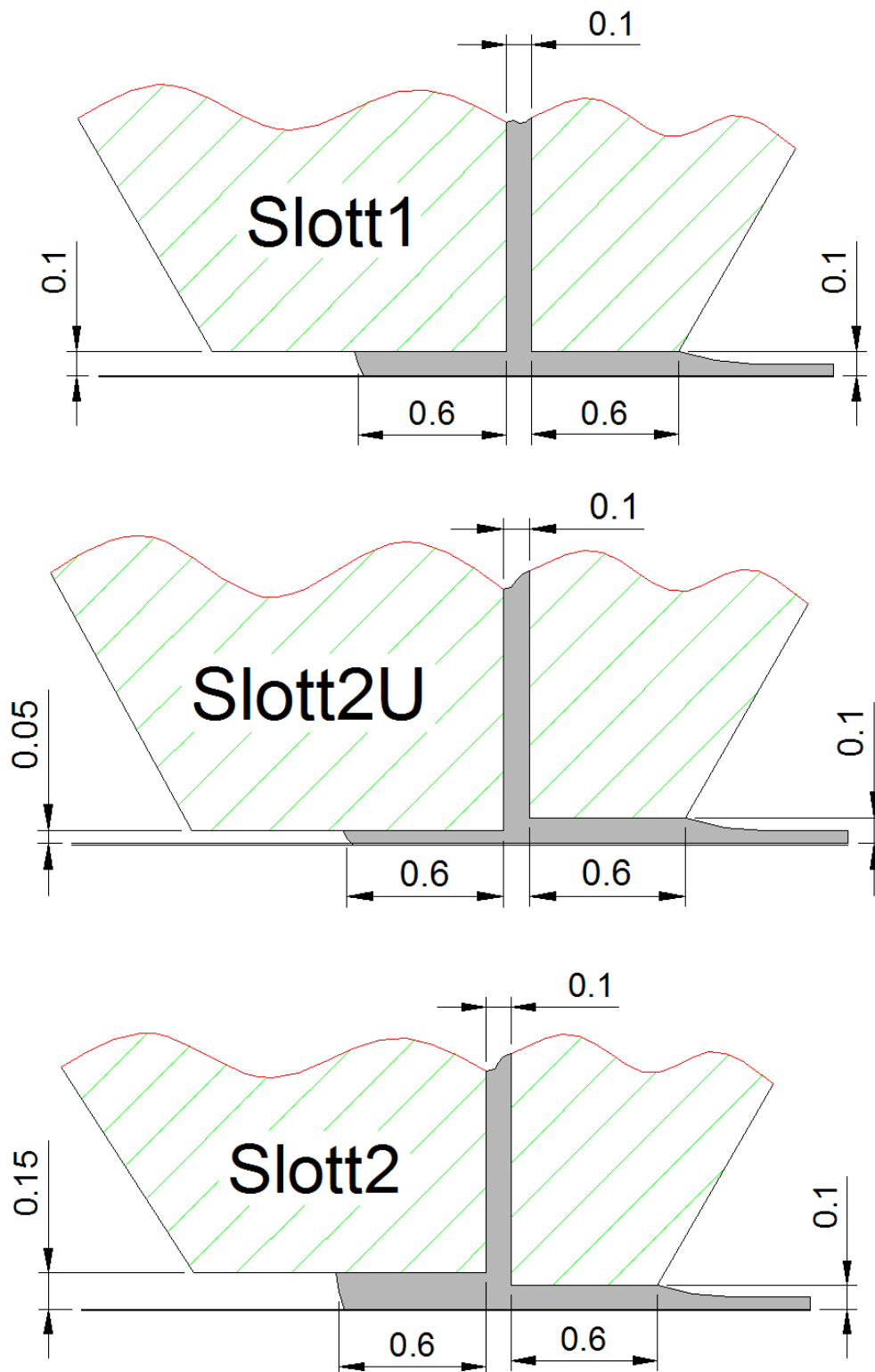


Figura 52 – Geometrias utilizadas para simulação numérica da sensibilidade do fator de amplificação ao ajuste da fresta a montante

A resposta em frequência do fator de amplificação está representada na fig. (53).

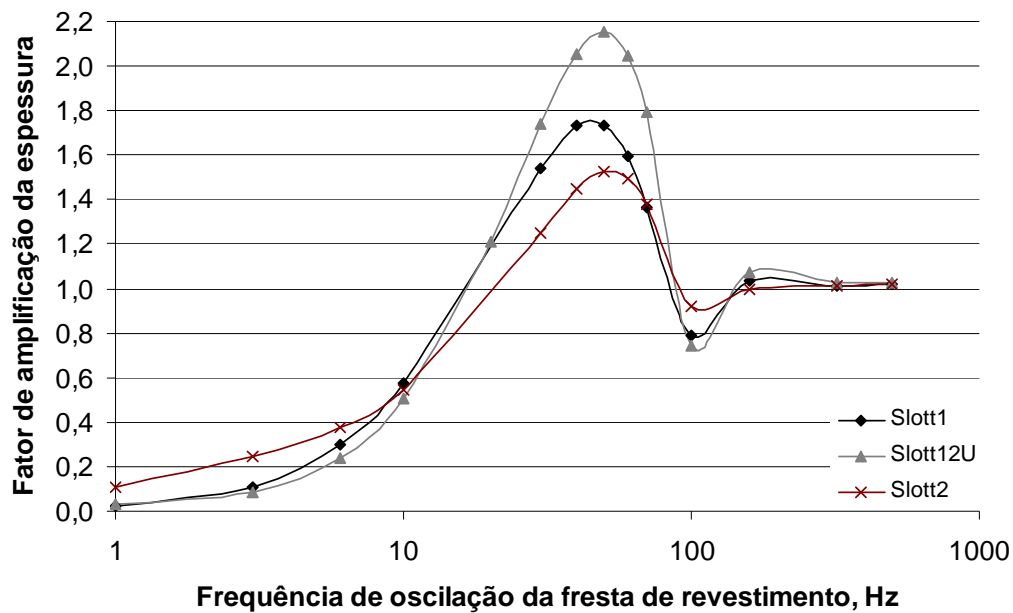


Figura 53 – Resposta em frequência do fator de amplificação para as geometrias da fig. (52) e parâmetros de processo da tab. (9).

Em baixas frequências, a geometria *underbite* (Slott2U) reduz o fator de amplificação, enquanto que em frequências intermediárias a geometria *overbite* (Slott2) reduz o fator de amplificação. Em frequências altas todas as geometrias apresentam fator de amplificação unitário.

A razão deste comportamento não é clara, porém uma comparação com os resultados obtidos com uma geometria tipo “faca raspadora”, mostrada na fig. (54), auxilia no entendimento do comportamento observado.

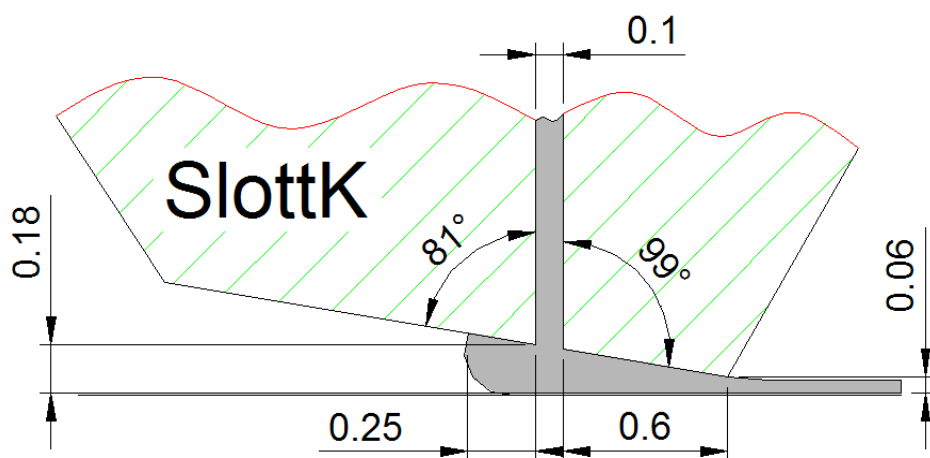


Figura 54 – Geometria tipo “faca raspadora” utilizada para comparação com as geometrias *underbite* e *overbite*

A resposta em frequência da geometria tipo “faca raspadora” está mostrada na fig. (55).

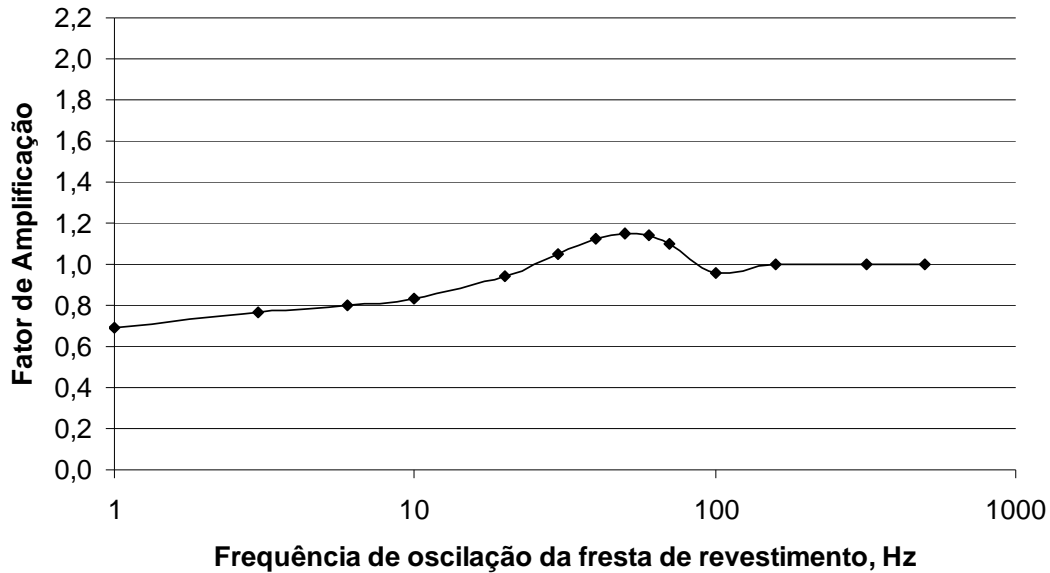


Figura 55 – Resposta em frequência do fator de amplificação para a geometria da fig. (54)

Nota-se que a resposta em frequência do fator de amplificação da geometria *overbite* se aproxima mais da resposta em frequência do fator de amplificação da geometria tipo “faca raspadora” que as outras duas geometrias, no sentido de apresentar um fator de amplificação relativamente alto em baixas frequências e relativamente baixo em frequências intermediárias.

Conforme se reduz a característica de “faca raspadora” da barra de revestimento, a resposta em frequência do fator de amplificação tende a se tornar menos constante e se aproximar mais da geometria da fig. (46). A fig. (56) ilustra geometrias com características intermediárias de “faca raspadora”.

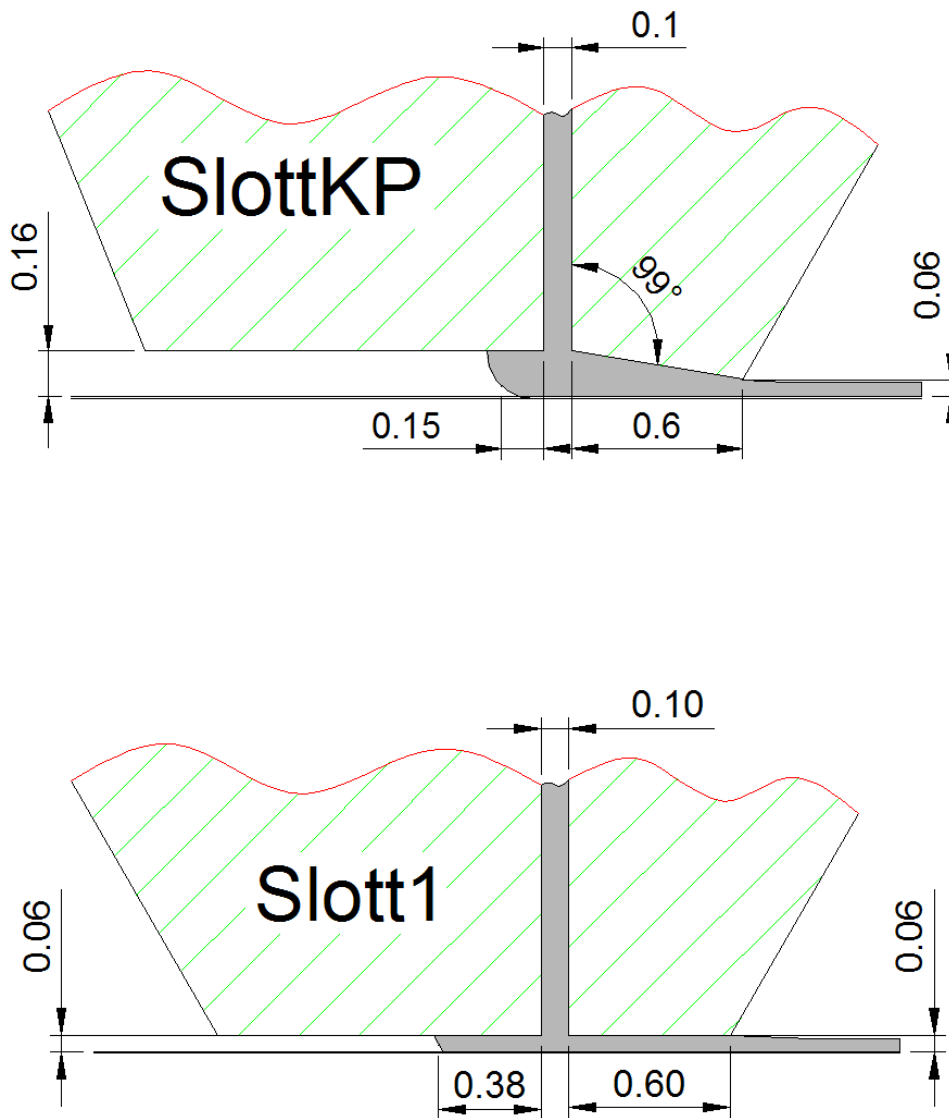


Figura 56 – Geometrias com menor característica de “faca raspadora” que a geometria da fig. (54)

A resposta em frequência comparativa está mostrada na fig. (57).

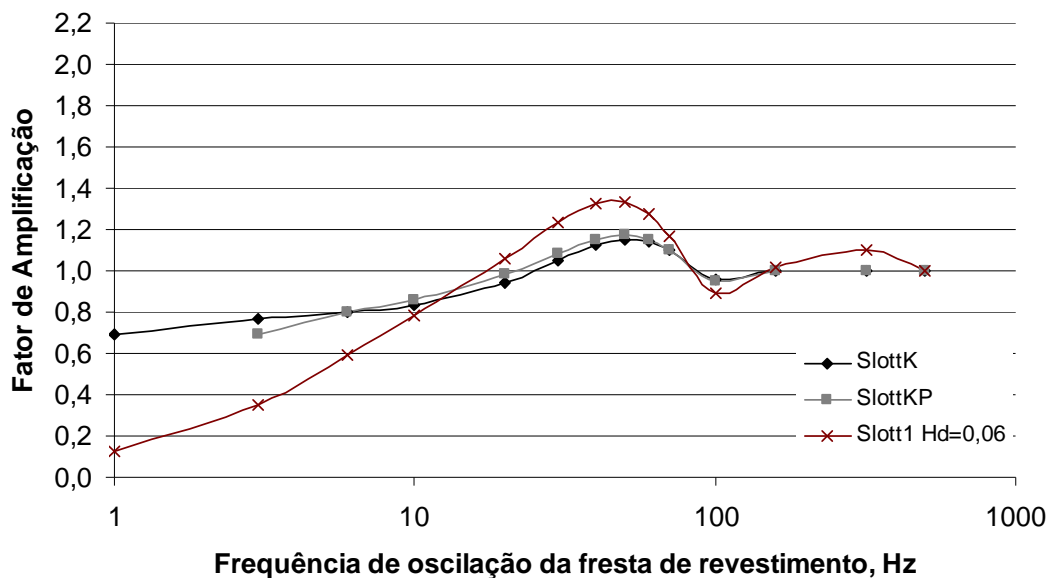


Figura 57 – Resposta em frequência do fator de amplificação para as geometrias das fig. (54) e (56)

Pela observação dos gráficos acima supomos que quanto mais a geometria se assemelha a uma geometria tipo “faca raspadora”, mais constante tende a ser seu gráfico de resposta em frequência (para uma dada oscilação da fresta de revestimento). Isto acaba sendo ruim, pois há um aumento significativo do fator de amplificação para baixas frequências.

3.3.3

Sensibilidade do fator de amplificação ao ajuste do nível de vácuo a montante

A função principal do vácuo aplicado a montante da barra de revestimento é manter a superfície livre a montante longe da fenda de alimentação e desta forma permitir a obtenção de menores espessuras de revestimento a maiores velocidades. A fig. (58) ilustra a posição da superfície livre a montante ($X_{dcl} = 0,2$ mm; $X_{dcl} = 0,6$ mm; $X_{dcl} = 1,0$ mm) no regime permanente para os diferentes níveis de vácuo utilizados na simulação numérica. O aumento do nível de vácuo puxa a superfície livre a montante em direção à caixa de vácuo. Os níveis de vácuo utilizados foram 600 Pa, 1300 Pa e 2000 Pa.

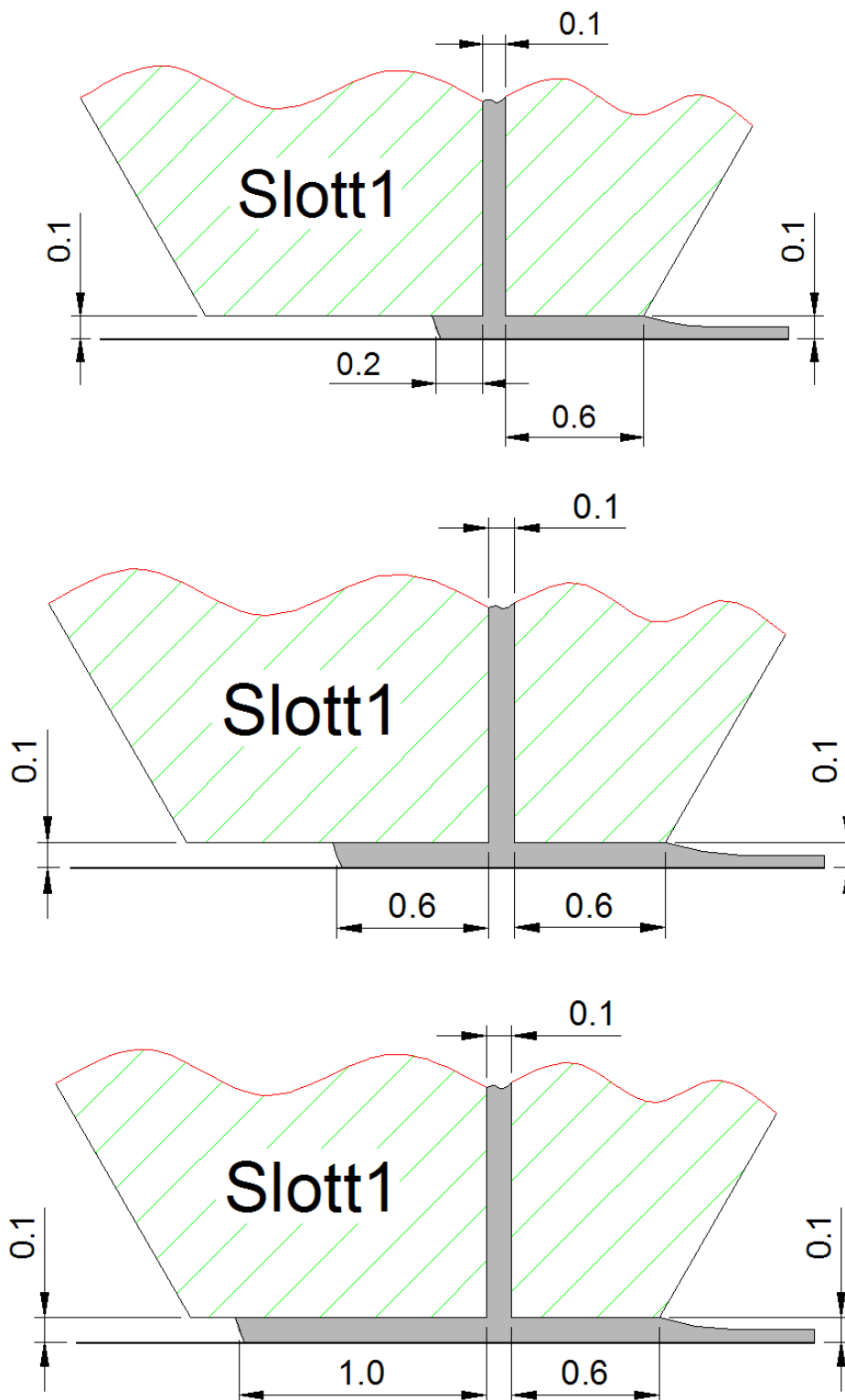


Figura 58 – Diferentes posições da superfície livre a montante utilizadas para simulação numérica da sensibilidade do fator de amplificação ao ajuste do nível de vácuo a montante

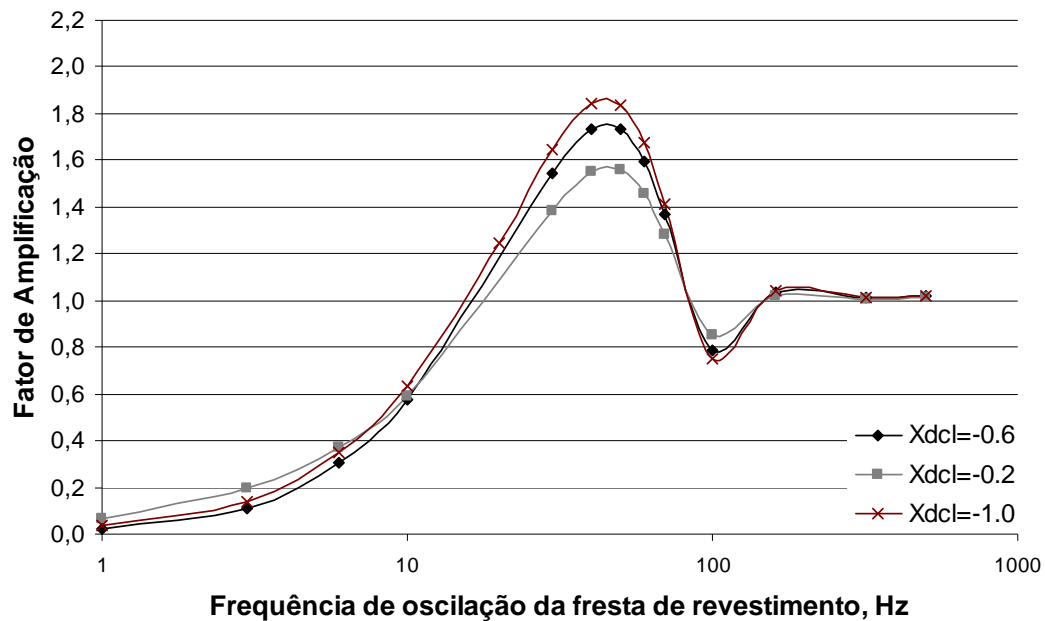


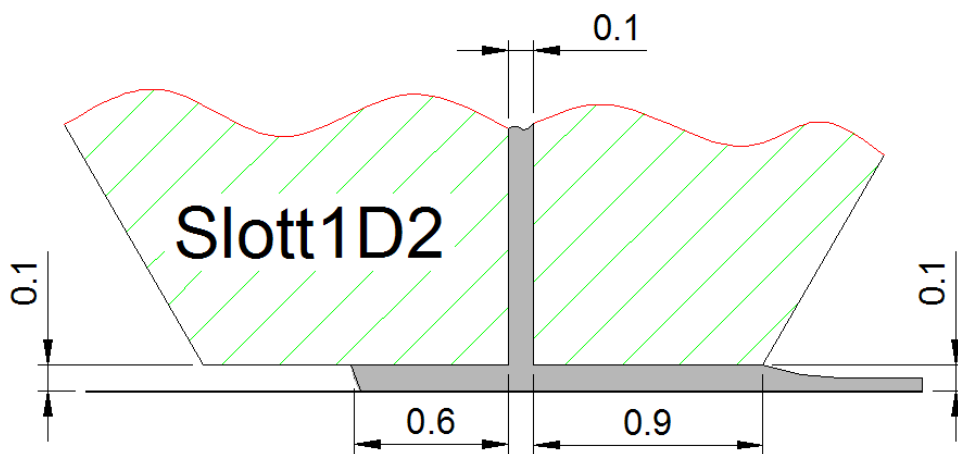
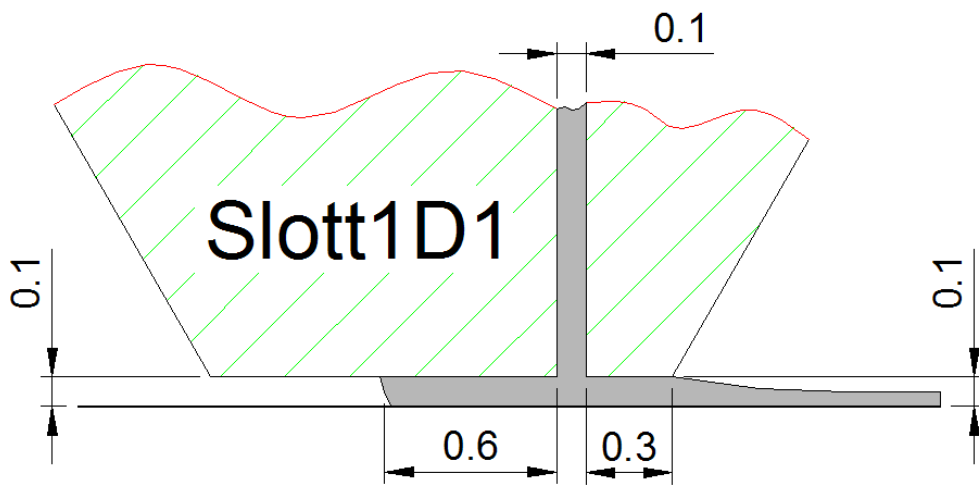
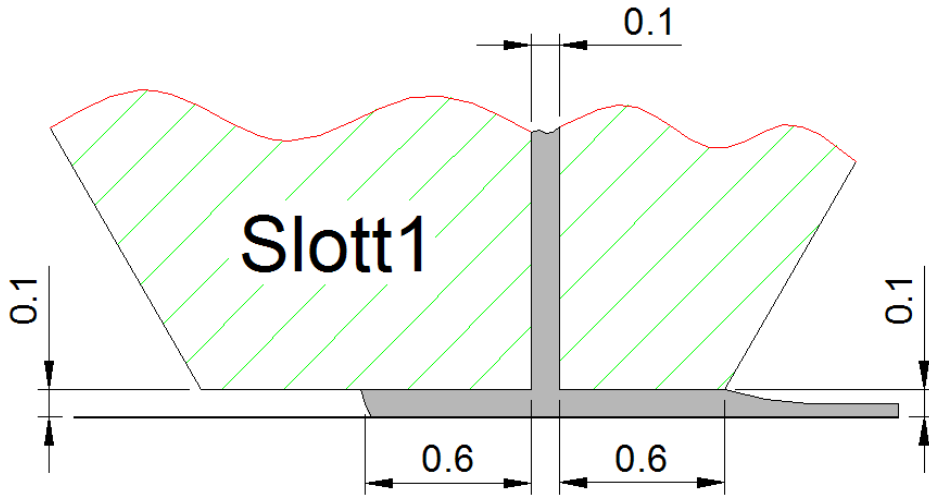
Figura 59 – Resposta em frequência do fator de amplificação para diferentes níveis de vácuo a montante

Como pode ser observado na fig. (59), o fator de amplificação é sensível ao nível de vácuo. Em baixas frequências a variação do fator de amplificação com a alteração do nível de vácuo é não monotônica, o que indica a presença de um mínimo no fator de amplificação. Em frequências intermediárias, baixos níveis de vácuo reduzem o fator de amplificação.

3.3.4 Sensibilidade do fator de amplificação em relação ao comprimento do lábio a jusante

O comprimento do lábio a jusante é uma variável geométrica da barra de revestimento. Sartor (1990) mostrou sua importância na determinação da janela de operação em regime permanente.

A fig. (60) mostra as diferentes geometrias estudadas.



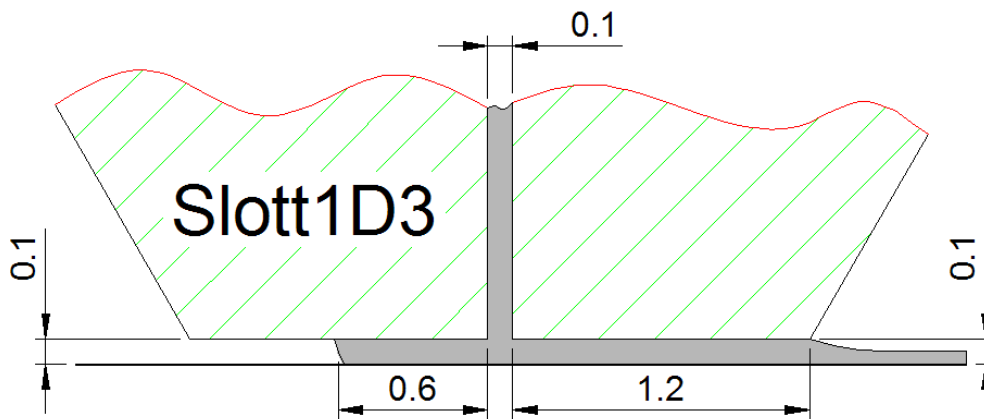


Figura 60 – Geometrias utilizadas para simulação numérica da sensibilidade do fator de amplificação ao comprimento do lábio a jusante

A resposta em frequência do fator de amplificação para cada configuração é mostrada na fig. (61).

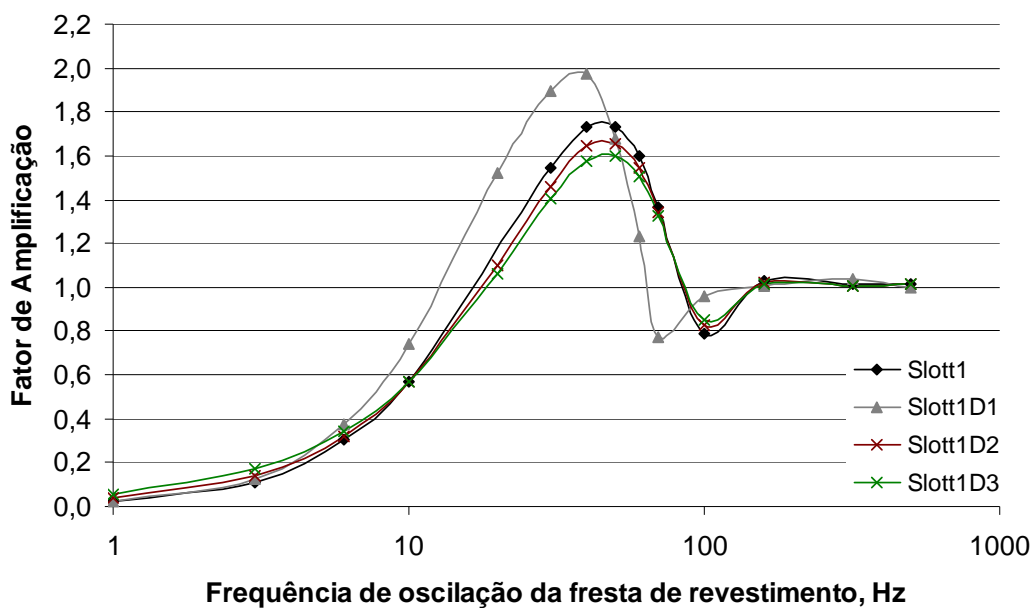


Figura 61 – Resposta em frequência do fator de amplificação para as geometrias da fig. (60) e parâmetros de processo da tab. (9)

Nota-se que o fator de amplificação é sensível ao comprimento do lábio a jusante. Em baixas frequência a variação do fator de amplificação com a alteração do comprimento do lábio a jusante é não monotônica, o que indica a presença de

um comprimento de lábio que minimiza o fator de amplificação. Em frequências intermediárias lábios mais longos reduzem o fator de amplificação.

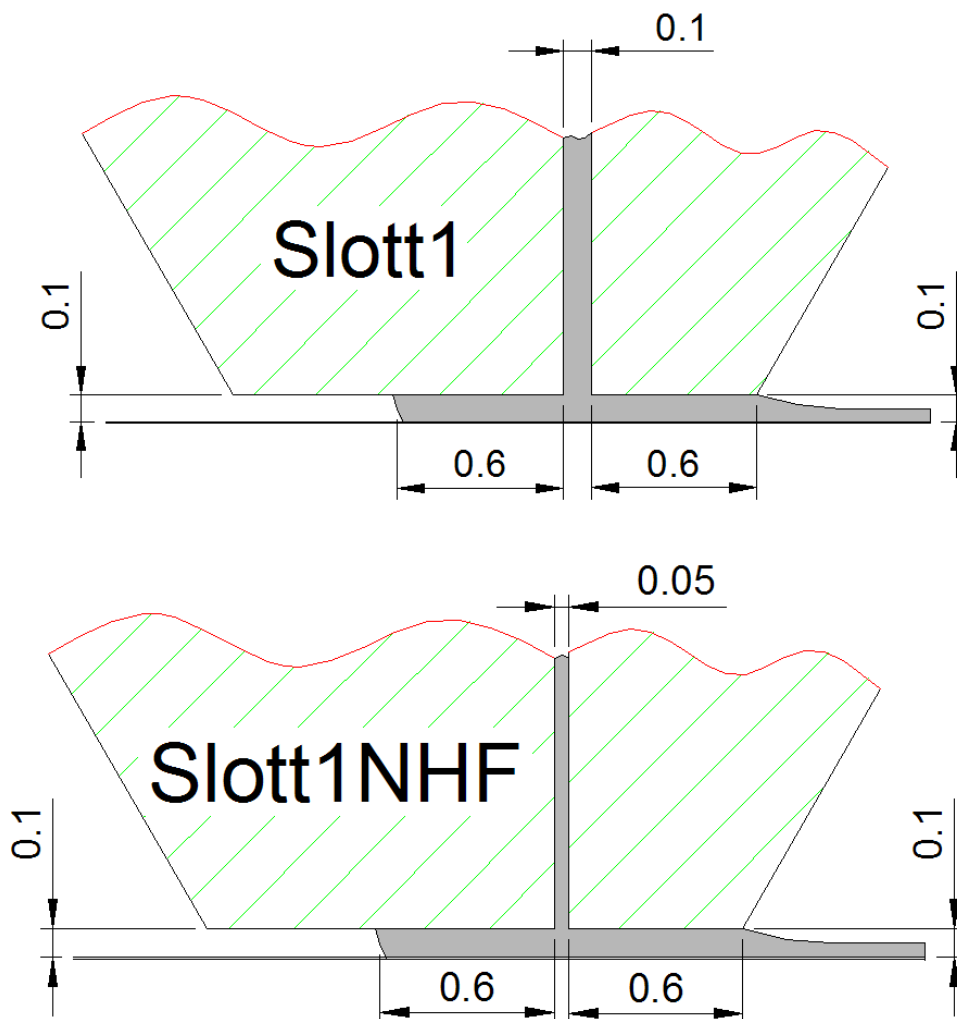
3.3.5

Sensibilidade do fator de amplificação ao ajuste da fresta de alimentação do líquido

A maioria das barras de revestimento dispõe de ajuste da fresta de alimentação do líquido a ser revestido. Este ajuste geralmente é feito com o uso de lâminas de diferentes espessuras que são inseridas na barra de revestimento.

A fresta de alimentação deve ser ajustada para melhorar a uniformidade de espessura do líquido revestido em regime permanente. A magnitude da fresta depende das propriedades do líquido.

A fig. (62) mostra os diferentes valores da fresta de alimentação considerados na simulação numérica.



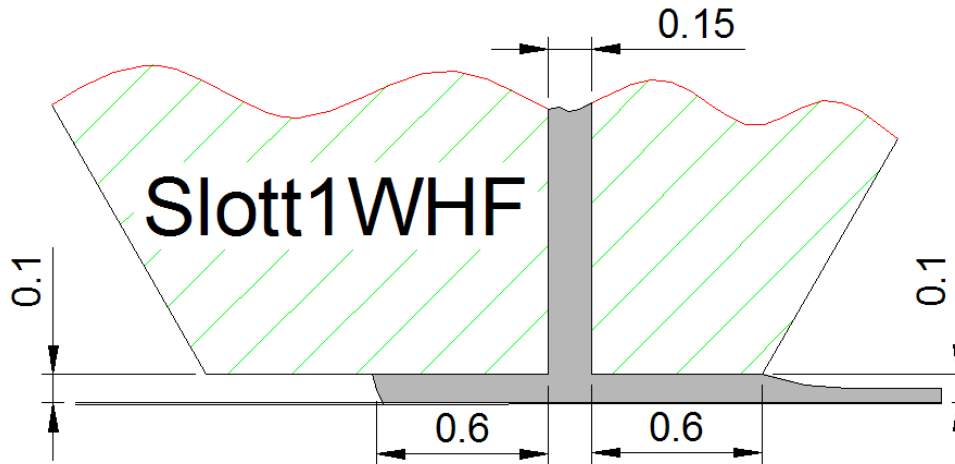


Figura 62 – Geometrias utilizadas para simulação numérica da sensibilidade do fator de amplificação ao ajuste da fresta de alimentação do líquido

A resposta em frequência do fator de amplificação é mostrada na fig. (63).

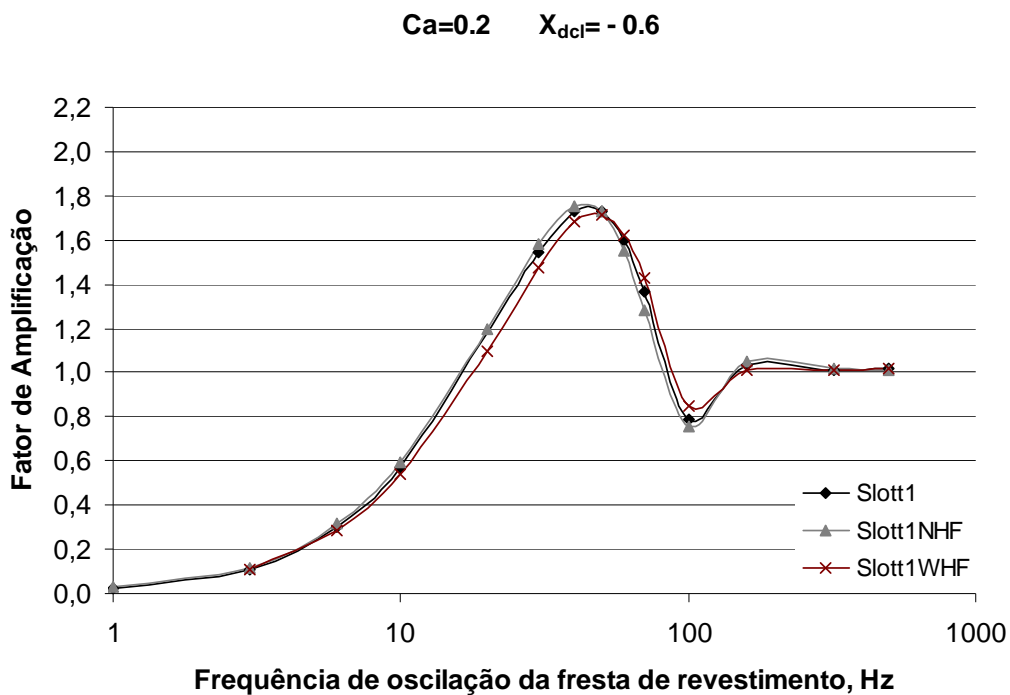


Figura 63 – Resposta em frequência do fator de amplificação para as geometrias da fig. (62) e parâmetros de processo da tab. (9)

Nota-se que a variação da fresta de alimentação não muda significativamente o fator de amplificação nas condições da simulação numérica.

3.3.6 Sensibilidade do fator de amplificação em relação ao ângulo de convergência do lábio a jusante

A fig. (64) mostra geometrias com diferentes ângulos de convergência do lábio a jusante consideradas na simulação numérica.

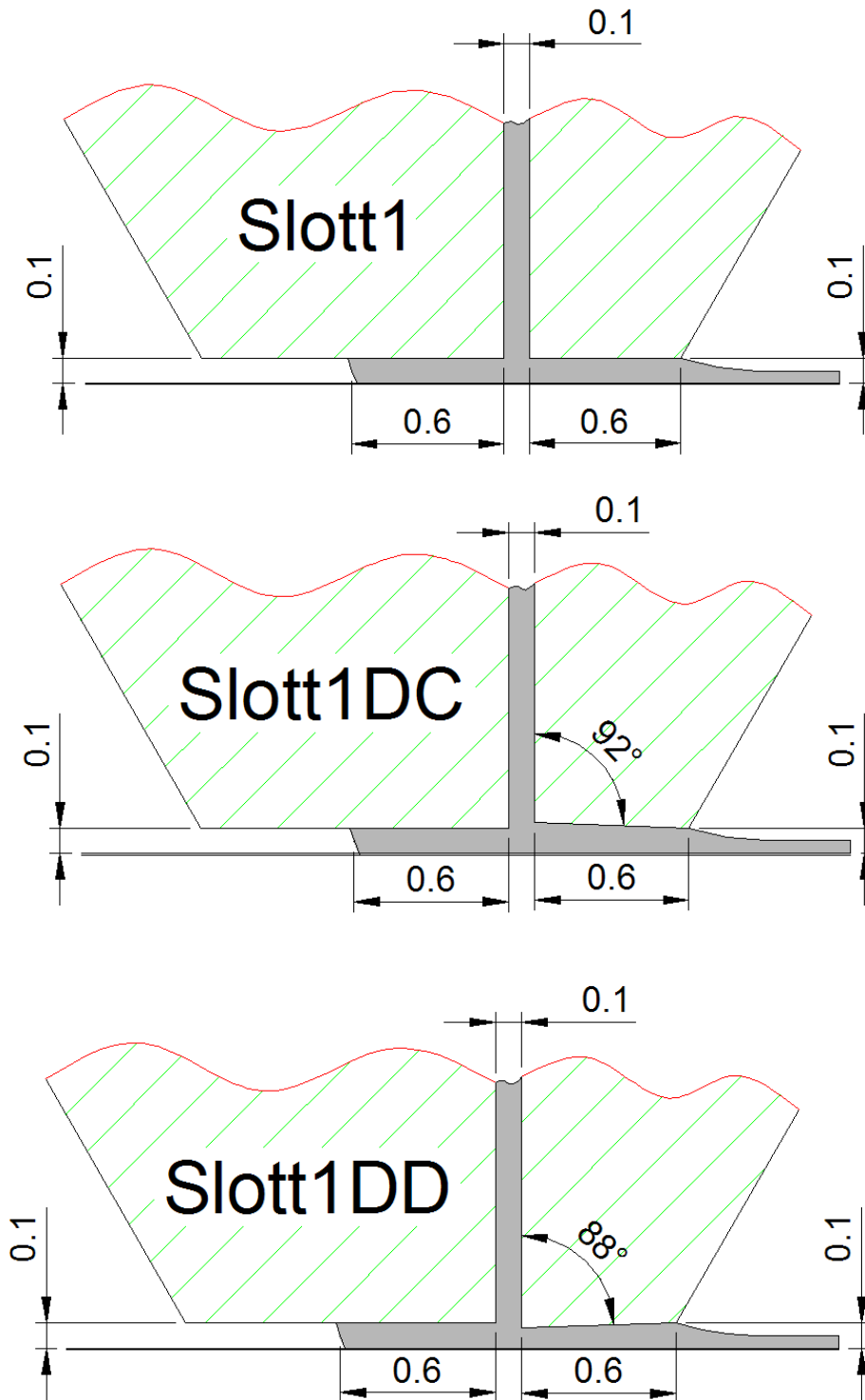


Figura 64 – Geometrias utilizadas para simulação numérica da sensibilidade do fator de amplificação ao ângulo de convergência do lábio a jusante

A resposta em frequência do fator de amplificação é mostrada na fig. (65).

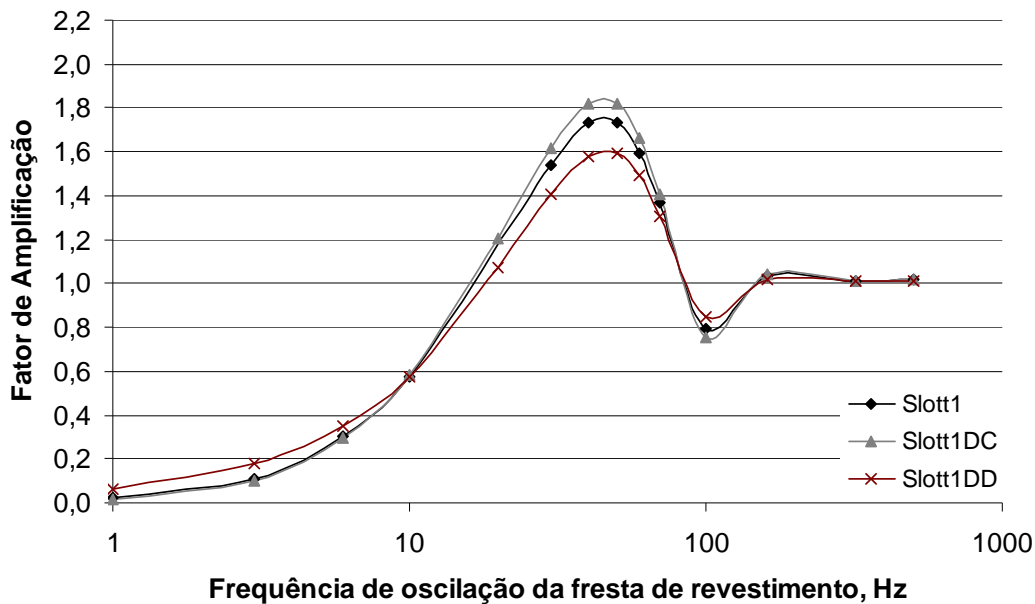


Figura 65 – Resposta em frequência do fator de amplificação para as geometrias da fig. (64) e parâmetros de processo da tab. (9)

Pode-se observar que em baixas frequências, tanto a geometria uniforme (*Slott1*) como a geometria convergente (*Slott1DC*) apresentaram o mesmo fator de amplificação. Em frequências intermediárias a geometria divergente (*Slott1DD*) foi a que apresentou menor fator de amplificação.

3.3.7 Sensibilidade do fator de amplificação à mudança no número de capilaridade

O número de capilaridade, $Ca = \mu V / \sigma$, é função da velocidade do substrato, viscosidade e tensão superficial do líquido revestido. Todas as simulações numéricas apresentadas até agora consideraram a velocidade do substrato em 6 m/min, a viscosidade em 30 cps e a tensão superficial em 15 dyn/cm, resultando no número de capilaridade igual a 0,2.

A fig. (66) mostra a resposta em frequência do fator de amplificação para os números de capilaridade apresentados na tab. (11) e na geometria de referência da fig. (46).

Tabela 11 – Números de capilaridade utilizados nas simulações numéricas

Ca	Viscosidade (cps)	Tensão Superficial (dyn/cm)
0,05	30	60
0,2	30	15
0,8	120	15

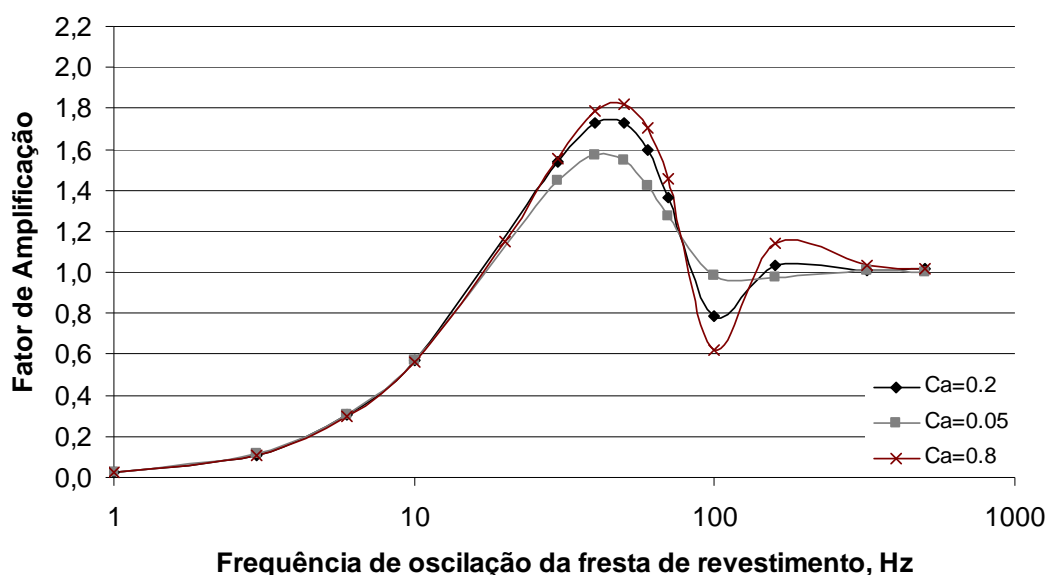


Figura 66 – Resposta em frequência do fator de amplificação para a geometrias da fig. (46) e os números de capilaridade da tab. (11)

Alterações das propriedades do líquido revestido afetam o fator de amplificação somente nas frequências intermediárias. Um aumento no número de capilaridade gera aumento no fator de amplificação na região dos picos.

3.3.8 Sensibilidade do fator de amplificação ao ajuste da velocidade do substrato

A alteração da velocidade do substrato também muda o número de capilaridade e adicionalmente tem o efeito de deslocar a curva de resposta em

frequência. Velocidades maiores deslocam a curva para frequências maiores, conforme mostrado na fig. (67).

A tab. (12) mostra como a velocidade do substrato altera a frequência do pico máximo.

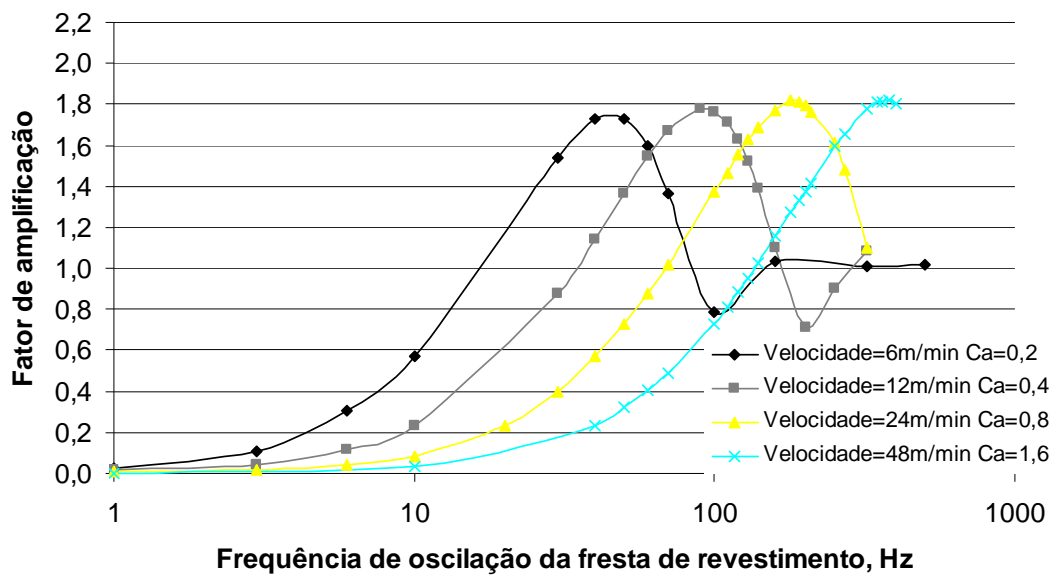


Figura 67 – Resposta em frequência do fator de amplificação para a geometrias da fig. (46), viscosidade, densidade, tensão superficial da tab. (9) e velocidades do substrato conforme tab. (12)

Tabela 12 – Velocidade do substrato utilizadas para simulação numérica e faixa de frequência onde se encontra o pico máximo do fator de amplificação

Velocidade (m/min)	Faixa da frequência do pico máximo (Hz)
6	40 - 50
12	80 - 100
24	160 - 200
48	320 - 400

O deslocamento da curva de resposta em frequência com a mudança da velocidade do substrato cria a possibilidade de atuar na velocidade de revestimento para reduzir o fator de amplificação. Porém esta possibilidade só

funciona se a fonte de oscilação da fresta de revestimento não depender da velocidade do substrato.

É interessante prever aproximadamente onde estará o pico máximo da curva de fator de amplificação para uma dada velocidade e geometria. Conforme mostrado na tab. (13) para a geometria da fig. (46), a faixa de frequência que engloba o pico máximo é aproximadamente proporcional à velocidade do substrato.

Dentro da faixa dos parâmetros geométricos e de processo utilizados na análise de sensibilidade desta seção, além da velocidade do substrato, somente o comprimento do lábio a jusante mostrou um impacto relativamente significativo na frequência do pico máximo do fator de amplificação.

Pela observação do gráfico pode-se considerar “baixas” as frequências abaixo da metade do mínimo da faixa da frequência de pico e “altas” as frequências acima que quatro vezes o máximo da faixa da frequência de pico.

A tab. (13) apresenta uma convenção baseada na observação dos resultados presentes nesta seção. Estes resultados possuem abrangência limitada às geometrias e parâmetros de processo estudados.

Tabela 13 – Convenção baseada na observação da curva do fator de amplificação da fig. (67)

Velocidade (m/min)	Faixa da frequência do pico máximo (Hz)	Baixas frequências (Hz)	Altas frequências (Hz)
6	40 - 50	0 - 20	> 200
12	80 - 100	0 - 40	> 400
24	160 - 200	0 - 80	> 800
48	320 - 400	0 - 160	> 1600

O próximo capítulo apresenta uma teoria mais abrangente que, junto a dados experimentais ou de simulação numérica, possibilita a previsão da frequência do pico máximo para uma grande variedade de geometrias e parâmetros de processo.