



ENTAC2006

A CONSTRUÇÃO DO FUTURO XI Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído | 23 a 25 de agosto | Florianópolis/SC

ENERGIA DE LANÇAMENTO DA ARGAMASSA NA PROJEÇÃO POR SPRAY A AR COMPRIMIDO

**Heloísa C. Fernandes (1); Rubiane P. N. Antunes (2); Mércia M. S. B. de Barros (1)
Vanderley M. John (1)**

(1) Departamento de Engenharia de Construção Civil – Escola Politécnica – Universidade de São Paulo, Brasil – e-mail: heloisa.fernandes@poli.usp.br; mercia.barros@poli.usp.br ; vanderley.john@poli.usp.br

(2) Camargo Corrêa Cimentos – Brasil – e-mail: rubiane.antunes@camargocorrea.com.br

RESUMO

Está demonstrada que a energia de aplicação da argamassa de revestimento influencia sua resistência de aderência através da eliminação dos vazios na interface com o substrato. Dados disponíveis revelam que revestimentos produzidos por projeção mecânica de argamassa através de spray a ar comprimido (PSAC) apresentam maior resistência de aderência do que os produzidos por aplicação manual de argamassas similares. No entanto, a energia de lançamento fornecida por este tipo de equipamento de projeção ainda não foi medida. O objetivo desse artigo é medir a energia de lançamento de três argamassas aplicadas por projeção mecânica, uma delas as diferentes pressões de operação. Para estimar a energia de lançamento de um equipamento PSAC foram desenvolvidos três modelos físicos, apresentados em detalhe, baseados em medidas experimentais de tempo de projeção e distribuição de massa em função da distância de projeção. A metodologia experimental assim como os resultados obtidos é apresentada em detalhe. Os resultados de energia de lançamento da argamassa projetada mecanicamente pelo PSAC apresentaram a mesma ordem de grandeza dos medidos na aplicação manual. Portanto o ganho na resistência de aderência observado deve ter outras origens. Adicionalmente, foi observado que a energia de projeção pode até ser reduzida com o aumento da pressão de operação acima de determinado nível.

Palavras-chave: energia de lançamento, argamassas de revestimento, projeção mecânica, projeção manual.

ABSTRACT

It is known that the energy (or speed) of projection of the mortar affects the rendering adhesion strength. It has also already been demonstrated that rendering mortar projected by spray equipment propelled by compressed air (PSAC) does have better adhesion strength than the same mortar projected manually. However, the projection energy of PSAC has not been measured yet. This paper aims to measure the projection energy of a PSAC equipment operated at different air pressure and with different mortars. Three different theoretical physical models based on experimental measurements have been developed to allow energy estimation. These models, the experimental procedures and the results are presented and discussed. The results show that PSAC's projection energy is similar to the manual projection. Therefore, the difference on adhesion strength between PSAC and manual projection must have a different reason. Additionally, the projection energy can be reduced if the air pressure increases above certain optimum level.

Keywords: projection energy, rendering mortars, sprayed mortar, manual placement

1 INTRODUÇÃO

Para que se execute o revestimento de argamassa, é necessário que a mesma seja lançada contra a base durante sua aplicação, seja esta por projeção manual ou mecânica, isto é, pela utilização de equipamentos de projeção. Durante o lançamento, a argamassa recebe certa quantidade de energia cinética que é dissipada ao atingir a base. Esta *energia de impacto* (ANTUNES, 2005) é dissipada na deformação plástica (espalhamento) da argamassa sobre a base e na eliminação dos defeitos de interface (ar preso entre camadas), garantindo o que se chama *extensão de aderência* (CARASEK, 1996). Parte da energia é também dissipada em deformação elástica da argamassa e da base e sob a forma de calor.

Antunes (2005) conseguiu determinar essa velocidade média de lançamento das argamassas a partir da medição do intervalo de tempo decorrido entre o momento que a argamassa deixava uma colher de pedreiro e o impacto em um alvo, ambos adequadamente instrumentados, e a respectiva determinação da distância percorrida pela argamassa, feita por análise de imagem. A velocidade medida variou de 2,5 a 15 m/s, sendo o valor da velocidade média, para um nível de confiança de 95%, igual a $6,0 \pm 0,5$ m/s, com desvio padrão igual a 2,7. Já o valor médio da energia de impacto foi de $22,3 \pm 3,8$ J, com desvio padrão de 18,6. A variabilidade elevada é característica do trabalho manual.

Antunes (2005) realizou experimento onde controlou a energia de impacto através de equipamento lançador de argamassa em queda livre, variou a reologia e mediu a resistência de aderência e a taxa de defeitos na interface argamassa-base. A autora concluiu que, mantida a reologia da argamassa, a energia de impacto exerce influência na aderência, pois a energia controlou a taxa de defeitos na interface. Este efeito, no entanto, foi influenciado pela reologia das argamassas. Para as misturas mais “secas” essa influência foi maior do que para as misturas “muito fluidas”. Resultados de seu trabalho mostram que as resistências de aderência à tração das argamassas “secas” e “muito fluidas” apresentaram melhorias de 69% e 34%, em média respectivamente, quando a energia de impacto com que foram lançadas passou de 15 J para 30 J aproximadamente. Portanto, a energia de lançamento é um parâmetro relevante na resistência de aderência de um revestimento de argamassa.

Em busca do aumento da produtividade e da garantia de homogeneidade de aplicação da argamassa, países desenvolvidos substituíram a técnica de aplicação manual de argamassa por técnicas de aplicação por projeção mecânica utilizando uma variedade de equipamentos. Essa tendência foi incorporada por empresas brasileiras há aproximadamente 15 anos, mas até o momento esta solução tem pequena participação na maioria dos mercados. Mais recentemente foram introduzidos com sucesso, particularmente no mercado de São Paulo¹, projetores que operam por spray a ar comprimido (PSAC), conhecidos comercialmente pelo nome de “canequinha”. Os PSAC são equipamentos muito simples, de baixo custo, que utilizam ar comprimido para projetar argamassa contida em um recipiente que possui orifícios na parte frontal inferior (Figura 1 e Figura 2). É possível conectar até 5 PSAC a um compressor de ar com capacidade para produzir 1.120 l/min que opere na faixa de pressão entre 0,93 e 1,2 N/mm² (135 e 170 psi respectivamente). A pressão de operação recomendada permanece na faixa de 0,63 e 0,77 N/mm² (90 e 110 psi respectivamente)². O operário deve encher o recipiente com argamassa e liberar o ar comprimido para a projeção. São oferecidos dois modelos: um para parede e outro para teto, diferenciados apenas pela localização dos orifícios no recipiente (Figura 1).

¹ Contato pessoal com engenheiros Alexandre Amado Britez, da construtora Cyrela, Joelson de Oliveira Santos, da construtora Tecnisa e Paulo Flaquer Filho, da construtora Tarjab.

² Dados obtidos com fabricantes do projetor, que recomendam a conexão de até 5 equipamentos de projeção por compressor.



(a)



(b)

Figura 1 – Equipamento de projeção de argamassa para paredes (a) e para o teto (b).

Estudo de Duilibre et al. (2005) mostra que revestimentos produzidos pela projeção por PSAC apresentam em média resistência de aderência à tração 55% superior a dos revestimentos produzidos com a mesma argamassa aplicada por projeção manual. No entanto, as causas deste ganho são desconhecidas. Particularmente a energia de lançamento da argamassa projetada mecanicamente pelo PSAC também não se encontra publicada.

Diversos autores (GLASSGOLD, 1996; ARMELIN *et al.*, 1996; AUSTIN *et al.*, 2000; CENGIZ e TURANLI, 2004), investigaram a energia de lançamento do concreto (ou argamassa) projetado. Glassgold (1996), ao revisar as normas americanas (ACI e ASTM) que tratam do assunto, notou a deficiência no estudo da influência da velocidade de impacto nas propriedades do estado endurecido de concretos projetados. Armelin *et al* (1996), determinaram a velocidade das partículas de concreto projetado com o auxílio de câmeras fotográficas de alta velocidade e concluíram que o tamanho das partículas influencia na velocidade de lançamento das mesmas (de 1,7 a 33 m/s), sendo que partículas maiores são lançadas com velocidades menores, não importando a direção da aplicação ou o tipo do bico de projeção. Os autores comentam também, que a determinação da velocidade das partículas de concreto projetado é muito difícil de ser feita, já que o processo pneumático gera velocidades impossíveis de serem determinadas a olho nu ou por métodos convencionais.

Em seu trabalho Austin *et al.* (2000) destacam que a argamassa projetada mecanicamente oferece inúmeras vantagens sobre a argamassa aplicada manualmente, entre elas o aumento da produtividade da execução do serviço e a melhora das propriedades do estado endurecido do revestimento, sem, contudo, estudar a energia de lançamento da argamassa aplicada mecanicamente.

2 OBJETIVO

Até o momento não foram encontrados trabalhos que medissem a energia de lançamento empregada pelo PSAC. Este trabalho tem como objetivo estimar a energia de impacto da argamassa aplicada por projeção mecânica e compará-la à energia de impacto empregada pelo pedreiro na aplicação manual.

3 POSSIBILIDADES DE ESTIMATIVA DA ENERGIA DE LANÇAMENTO

Para a determinação da energia de lançamento da argamassa é necessário conhecer a velocidade com que a mesma é lançada pelo projetor. Para tanto, foram utilizados alguns modelos físicos para estimativa da velocidade de lançamento.

Desprezando a resistência do ar e a componente vertical da velocidade, já que a distância do projetor à parede é pequena (de 15 a 30 cm), pode-se considerar a energia de impacto da argamassa como sendo a energia cinética calculada (Equação 1) a partir do valor da componente horizontal da velocidade média (BONIN, 2001³; ANTUNES, 2005):

$$E_C = \frac{1}{2} * m * v_x^2 \quad \text{Equação 1}$$

³ Informação obtida por Rubiane Paz do Nascimento Antunes através de comunicação eletrônica enviada por Luís Carlos Bonin (NORIE, UFRGS) em 20/08/2002 e presente no texto da autora para sua Qualificação no programa de Doutoramento da EPUSP em abril de 2004.

Quando a massa projetada não é conhecida, mas pode-se estimar experimentalmente a velocidade de projeção, é possível estimar a *energia específica de lançamento*, dada em J/kg. A seguir são apresentadas três diferentes metodologias simples para estimar a velocidade.

3.1 Vazão e tempo para projeção

A projeção de argamassa no PSAC se dá através da injeção de ar comprimido por 4 orifícios com 2 mm de diâmetro cada, o qual lança a argamassa por outros 4 orifícios, com 20 mm de diâmetro cada, localizados na parte frontal do recipiente onde é inserida a argamassa (Figura 2).



Orifícios de saída de ar

(a)



Orifícios para saída da argamassa

(b)

Figura 2 – Vistas superior (a) e frontal (b) do equipamento de projeção (PSAC).

Admitindo como sendo constante o fluxo de argamassa pelos orifícios de saída, conhecido o volume de argamassa a ser projetado (V) e medido o tempo para projeção (Δt), definido como o tempo necessário para esvaziar o recipiente, é possível determinar a vazão de argamassa (Q) pela Equação 2:

$$Q = \frac{V}{\Delta t} \quad \text{Equação 2}$$

Conhecendo-se a vazão de argamassa e a área dos orifícios de saída da mesma, pode-se calcular a velocidade de esvaziamento do recipiente (Equação 3):

$$v = \frac{Q}{A} \quad \text{Equação 3}$$

A velocidade de lançamento determinada por esse modelo apresenta como resultado um valor médio da velocidade do escoamento e não apenas da argamassa, tendo sido admitido como constante o fluxo de material, o que não é verdade visto que a argamassa não sai de maneira contínua, alternando-se com fluxos de ar comprimido. Assim, este método subestima a velocidade.

A velocidade de lançamento da argamassa é determinada pela *velocidade do ar comprimido*, pois é ele quem acelera as partículas de argamassa, arrastando-as, quando essas abandonam o recipiente de projeção. Sendo assim, a máxima velocidade que a argamassa pode atingir é a velocidade do ar inserido pelo compressor no equipamento de projeção.

3.2 Trabalho realizado por uma força

Outro modelo físico que representa o fenômeno em questão é o de *trabalho realizado por uma força*, que pode ser calculado pela Equação 4:

$$\tau = F * d * \cos \theta \quad \text{Equação 4}$$

onde:

τ é o trabalho da força, em N.m;

F é a força aplicada, em N;

d é distância percorrida pelo corpo, em m; e

θ é o ângulo formado entre a direção de aplicação da força e a direção do deslocamento, em graus.

Para o caso do equipamento estudado a distância percorrida pela argamassa desde a saída do ar comprimido até o orifício frontal é de 4,5 cm. O ângulo formado entre a direção da aplicação da força e a direção do deslocamento é de 0° . Sendo assim, a Equação 4 pode ser re-escrita como segue (Equação 5):

$$\tau = F * 0,045 * \cos 0^\circ$$

$$\tau = 0,045 * F$$

Equação 5

A força que realiza trabalho é aquela exercida pelo ar comprimido. Conhecendo-se a pressão no orifício de saída do ar e sua respectiva área, calcula-se a força aplicada na argamassa (Equação 6):

$$p = \frac{F}{A}$$

$$F = p * A$$

Equação 6

O trabalho também pode ser definido como a variação de energia cinética do corpo (Equação 7):

$$\tau = \Delta E_c = E_{c_{final}} - E_{c_{inicial}}$$

$$\tau = \frac{1}{2} m(v_{final}^2 - v_{inicial}^2)$$

Equação 7

onde:

ΔE_c é a variação da energia cinética, em J;

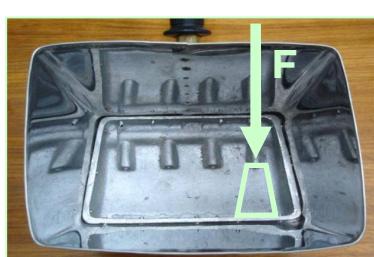
m é a massa do corpo, em kg;

$v_{inicial}$ é a velocidade inicial do corpo, em m/s; e

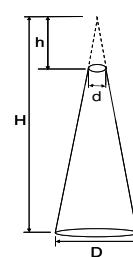
v_{final} é a velocidade final do corpo, em m/s.

No fenômeno em questão admite-se a velocidade inicial como sendo zero, pois a argamassa encontra-se em repouso antes da aplicação da força. Essa consideração só é valida para o momento em que se inicia a projeção, já que as camadas superiores já estarão em movimento para ocupar o espaço vazio. A velocidade final será, então, a velocidade com que a argamassa abandona o PSAC, ou seja, a velocidade de lançamento.

A massa deslocada pela força pode ser considerada como sendo a massa correspondente ao volume de um tronco de cone como o da Figura 3, considerando-se que o fluxo do ar comprimido fosse direcionado, o que não é verdade, já que o ar injetado se movimenta em diversas direções.



(a)



(b)

Figura 3 – Considerações sobre a geometria do corpo de argamassa projetado pelo ar comprimido (a) e dimensões consideradas no cálculo do volume do tronco de cone (b) (desenho sem escala).

O volume do tronco de cone pode ser calculado pela Equação 8:

$$V_T = \frac{\pi}{3} \left(\frac{D^2}{4} * H - \frac{d^2}{4} * h \right) \quad \text{Equação 8}$$

As dimensões do tronco de cone gerado pelo ar comprimido injetado no PSAC são: $D = 20 \text{ mm}$, $d = 2 \text{ mm}$, $H = 50 \text{ mm}$ e $h = 5 \text{ mm}$, gerando um tronco de cone com volume igual a $5,2 \times 10^{-6} \text{ m}^3$.

Conhecido o volume do tronco de cone é possível calcular, a partir do valor da massa específica aparente da argamassa fresca, a massa de argamassa projetada pela força exercida pelo ar comprimido injetado através de um orifício (Equação 9):

$$\gamma = \frac{m}{V}$$

$$m = \gamma * 5,2 \cdot 10^{-6} \quad \text{Equação 9}$$

Para as condições impostas e a geometria do equipamento estudado, chegou-se à Equação 10 para a estimativa da velocidade de lançamento:

$$v = \sqrt{\frac{2 * F * d}{m}}$$

$$v = \sqrt{\frac{2 * 0,045 * F}{\gamma * 5,2 * 10^{-6}}} \quad \text{Equação 10}$$

3.3 Lançamento horizontal

No modelo físico de *lançamento horizontal* o movimento da partícula é dividido em duas direções: horizontal e vertical. Na direção horizontal o movimento é do tipo *uniforme*, ou seja, o corpo se move com velocidade constante e ausência de aceleração. Já na direção vertical, o movimento é do tipo *uniformemente variado*, ou seja, a variação da velocidade é uniforme, existindo, portanto, aceleração.

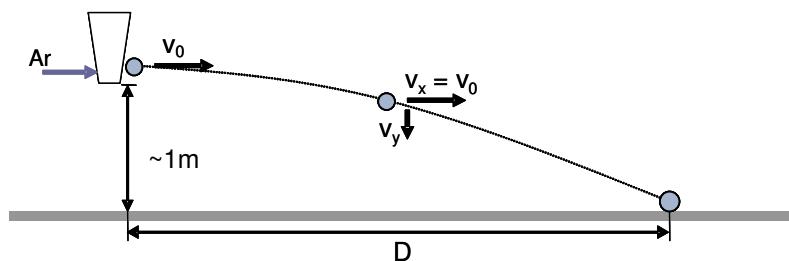


Figura 4 – Esquema representativo do modelo de lançamento horizontal (desenho sem escala).

Nesse tipo de lançamento, o tempo necessário para a partícula chegar ao chão ($t_{vô}$) depende da altura de queda, nesse caso de 1 m, e pode ser calculada pela Equação 11 a seguir:

$$t_{vô} = \sqrt{\frac{2h}{g}} \quad \text{Equação 11}$$

Sendo assim, não importa a que distância do projetor a argamassa foi lançada, todas as partículas levarão o mesmo tempo para chegar ao chão.

A velocidade de lançamento pode ser considerada como sendo a velocidade da direção horizontal do movimento (v_x). A velocidade é calculada como segue (Equação 12):

$$v_x = \frac{D}{t_{vôo}}$$

Equação 12

onde D é a distância de queda, em metros, da argamassa com relação ao projetor. Esta distância ponderada pode ser medida experimentalmente realizando a projeção de argamassas afastadas de qualquer alvo.

Esta consideração introduz erros relativos aos ângulos de saída das partículas com relação ao plano horizontal e a resistência do ar. No experimento realizado, a influência da resistência do ar é maior que a observada nas aplicações práticas, já que neste caso a distância é bem superior aos 15 a 30 cm praticados.

Esse conceito foi aplicado por Bonin (2001) e Antunes (2005) para a determinação da velocidade horizontal de lançamentos manuais.

4 METODOLOGIA

A estimativa da energia de lançamento foi realizada a partir dos três modelos apresentados anteriormente (vazão e tempo para projeção, trabalho realizado por uma força e lançamento horizontal) e a partir de medidas experimentais utilizando três tipos de argamassas diferentes, projetadas por um mesmo equipamento em diferentes pressões de operação. Nos experimentos foram medidos o tempo para projeção do PSAC e a quantidade de argamassa projetada a diferentes faixas de distâncias.

4.1 Procedimento experimental

4.1.1 Preparo da argamassa

A argamassa anidra é colocada no equipamento misturador e em seguida este é ligado simultaneamente ao início da colocação da água da mistura, a qual é acrescentada em fluxo constante por aproximadamente 15 s. O equipamento é mantido em funcionamento durante 180 s, com eventuais paradas para retirada de material anidro ou mal misturado das laterais. Ao final dos 180 s a argamassa é despejada em um carrinho de mão com o equipamento ainda em funcionamento para facilitar a operação.

Foi tomado o cuidado de sempre umedecer o misturador antes do preparo da primeira argamassa, visto que, em ensaios realizados em seqüência, as outras misturas serão preparadas no misturador úmido devido à lavagem.

4.1.2 Determinação da massa específica e do teor de ar incorporado

A determinação da massa específica (NBR 13278:2005) foi realizada logo após o preparo da argamassa e imediatamente antes de cada projeção.

Para o cálculo do teor de ar incorporado segundo a mesma norma foi determinada, no picnômetro de hélio, a massa unitária da argamassa no estado anidro.

4.1.3 Projeção da argamassa

O PSAC contendo um volume constante de argamassa e conectado a uma linha de ar comprimido com pressão de operação⁴ controlada por um regulador de pressão⁵, foi fixado a um metro de altura a partir do solo de forma a garantir o lançamento horizontal da argamassa. A seguir, a passagem do ar comprimido era liberada e mantida aberta até o esvaziamento do recipiente. O tempo decorrido desde a liberação de ar comprimido até o esvaziamento do PSAC foi medido por cronômetro acionado manualmente. A argamassa projetada atingiu o solo cobrindo uma região compreendida em uma área de 2 m de largura e aproximadamente 4 m de comprimento, previamente revestida com filme plástico.

⁴ Todos os valores de pressão citados no texto são relativos à pressão estática e manométrica.

⁵ Equipamento instalado na tubulação de alimentação do PSAC, que mantém a pressão de operação abaixo da pressão mínima fornecida pelo compressor de ar, garantindo a manutenção da mesma.

Imediatamente a argamassa coletada nas faixas de distâncias de 0-50 cm; 50-100 cm; 100-200 cm; 200-300 cm e 300-400 cm foi recolhida e a massa presente em cada faixa medida usando uma balança.

4.2 Equipamentos

O compressor de ar utilizado no experimento é da marca SCHULZ, modelo MSV 40 SA/380 - 10 HP - 2 estágios, cujo deslocamento teórico é de 40 pés³/min ou 1132 l/min (1,132 m³/min). As pressões mínima e máxima tiveram seus valores regulados para 0,80 e 1,16 N/mm² (115 e 165 psi) respectivamente.

O equipamento de projeção é constituído por um recipiente metálico conectado a uma tubulação, também metálica, onde se localiza o gatilho de liberação do ar comprimido, a qual é ligada a um mangote flexível que transporta o ar. Um desenho esquemático do recipiente de projeção com as respectivas dimensões encontra-se na Figura 5 a seguir.

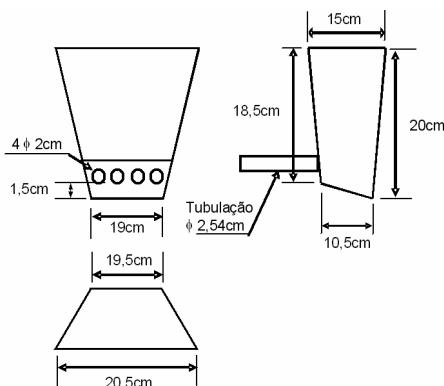


Figura 5 – Desenho esquemático (sem escala) do projetor de argamassa por ar comprimido (PSAC).

Todas as argamassas ensaiadas foram preparadas em um misturador de eixo horizontal da marca Consolid, modelo MH-50, 380 V, 1,1 kW.

4.3 Materiais

Foram estudadas argamassas industrializadas de um único fabricante, mas de três tipos diferentes: Múltiplo Uso (MU), Revestimento Interno (RI) e Revestimento Externo (RE). A quantidade de água utilizada para a produção da argamassa fresca foi a especificada pelo fabricante.

Tabela 1 – Características das argamassas ensaiadas.

Argamassa	Pressão de Operação		Massa específica (kg/m ³)		Teor de ar incorporado (%)
	psi	N/mm ²	fresca	anidra	
RI	50	0,35	1737	2769	22
RI	70	0,49	1727	2769	22
MU	75	0,53	1817	nd	nd
RI	90	0,63	1734	2769	22
RI	110	0,77	1722	2769	23
RE	120	0,84	1757	2747	22

* nd.

5 RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÕES

5.1 Efeito da pressão na distância de lançamento

A Figura 6 mostra a distribuição de massa, em porcentagem, em função da distância. A argamassa do tipo RI foi projetada com 4 pressões de operação diferentes (0,35; 0,49; 0,63 e 0,77 N/mm²), a argamassa do tipo MU foi projetada com 0,53 N/mm² e a RE com 0,84 N/mm².

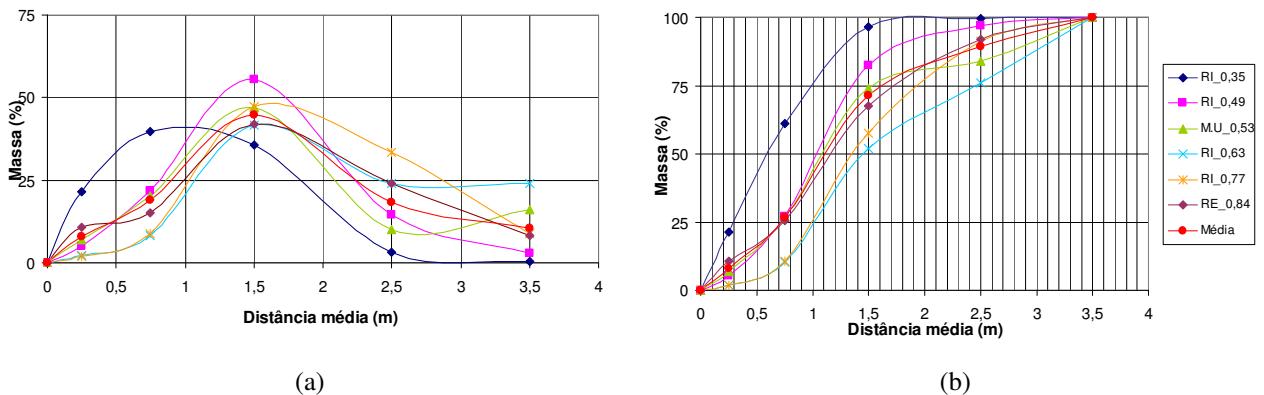


Figura 6 – Distribuição de massa pela distância: (a) porcentagem de massa distribuída e (b) porcentagem de massa acumulada.

Observa-se em (a) que a faixa de 1 a 2 m compreende a região com maior quantidade de massa, exceto para a argamassa RI projetada com 0,35 N/mm² de pressão de operação, e em (b) que 50% da massa é projetada até 1,5 m de distância para todas as pressões de operação, exceto para a argamassa RI projetada com 0,35 N/mm² de pressão, a qual teve 50% de sua massa projetada até 0,6 m de distância.

A Figura 7 apresenta a influência da pressão de operação na distância de queda para diferentes porcentagens de massa acumulada. As distâncias relativas a cada porcentagem foram determinadas a partir do gráfico (b) da Figura 6.

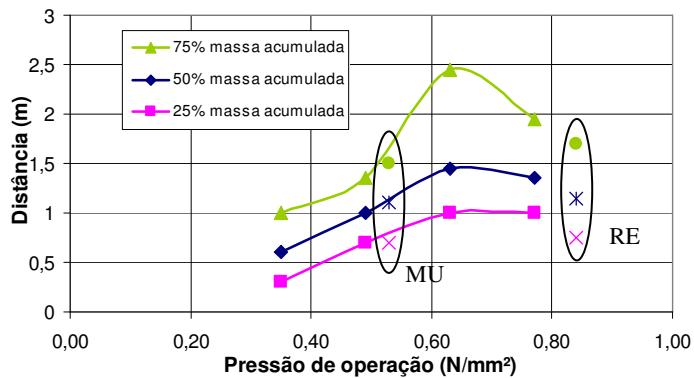


Figura 7 – Influência da pressão de operação na distância de queda para diferentes porcentagens de massa acumulada.

Observa-se que para cada porcentagem de massa acumulada, a distância de queda aumenta com o aumento da pressão de operação, porém essa situação só é válida até determinado valor de pressão, no caso 0,63 N/mm², sendo que a partir desse valor ocorre o inverso, ou seja, a distância de projeção cai com o aumento da pressão de operação.

As argamassas MU e RE têm seus pontos pouco fora das curvas por terem composições diferentes da composição da argamassa RI que foi ensaiada a diferentes pressões de operação, o que indica uma pequena, porém possível, influência da composição da argamassa na sua distribuição durante a projeção.

5.2 Influência da pressão de operação no tempo para projeção

A Figura 8 apresenta a influência da pressão de operação aplicada no projetor no tempo para projeção para as diferentes argamassas ensaiadas.

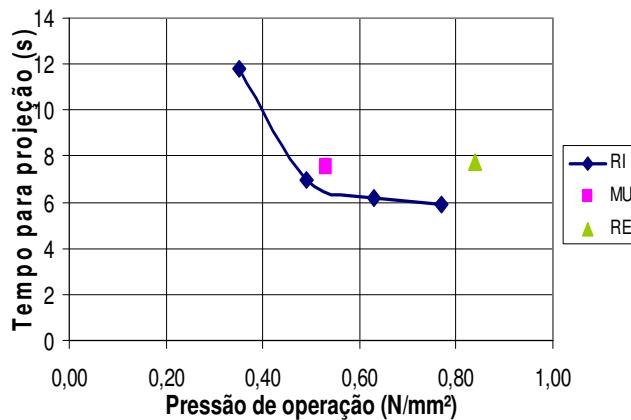


Figura 8 – Influência da pressão de operação no tempo para projeção para diferentes argamassas.

Observa-se que com o aumento da pressão o tempo para projeção diminui, sendo que a partir de 0,53 N/mm² essa queda torna-se menos acentuada. Uma justificativa para esse comportamento seria o fato de que, a partir desse valor de pressão, há um aumento no tempo de saída de ar sem que este arraste a argamassa. A outra possibilidade é uma mudança no comportamento do sistema argamassa-ar, com aumento das perdas de ar por mudanças na direção do seu movimento no momento de sua expansão, afetando o volume de ar a ser escoado e/ou mudança no regime de escoamento. Nota-se, novamente, que os comportamentos das diferentes argamassas ensaiadas são distintos, o que corrobora a idéia de que a reologia influencia o comportamento da argamassa durante a projeção por PSAC no que diz respeito ao tempo para projeção.

5.3 Estimativa da energia de lançamento a partir da vazão e tempo para projeção

Foi medido o tempo para esvaziamento do PSAC em cada uma das determinações e, conhecidos o volume do recipiente ($3,55 \times 10^{-3} \text{ m}^3$) e a área dos orifícios de saída de argamassa ($1,26 \times 10^{-3} \text{ m}^2$), foi possível calcular a vazão por orifício através da Equação 2 e a velocidade de lançamento da argamassa através da Equação 3. A influência da pressão de operação na *energia específica* de lançamento, que é a quantidade de energia por 1 kg de massa projetada pelo equipamento, encontra-se apresentada na Figura 9 a seguir.

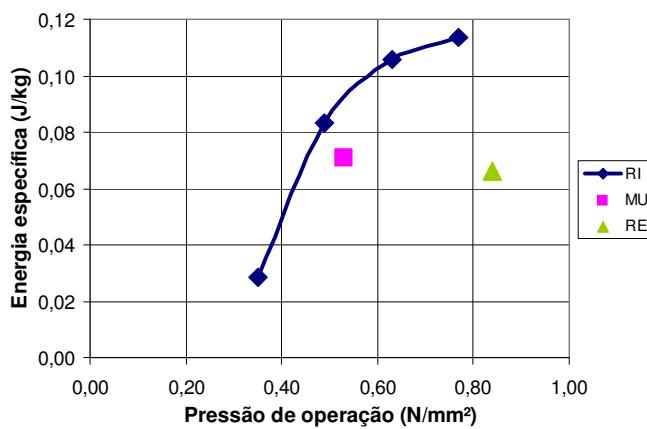


Figura 9 – Influência da pressão de operação na energia específica de lançamento, estimada a partir da vazão e do tempo para projeção, para diferentes argamassas.

A energia específica de lançamento estimada por este método apresenta valores (de 0,029 a 0,114 J/kg) de duas a três ordens de grandeza inferiores aos valores de energia específica do lançamento manual (de 3,13 a 113 J/kg), calculados com base nos valores de velocidade determinados por Antunes (2005) a partir de medições durante a aplicação do pedreiro. Isso pode ser explicado pelo fato de que durante o esvaziamento do PSAC não sai apenas argamassa, mas também o ar comprimido, o que faz aumentar o tempo necessário para esvaziar o equipamento. Nota-se, porém, que

o aumento da energia específica passa a ser menos acentuado a partir da pressão de 0,63 N/mm², indicando que o incremento da pressão, a partir desse valor, passa a não ser eficiente para o aumento da energia.

5.4 Estimativa da energia de lançamento a partir do trabalho

Aplicando os resultados de pressão e massa específica à Equação 10 obtém-se a velocidade de lançamento, o que permite estimar a energia.

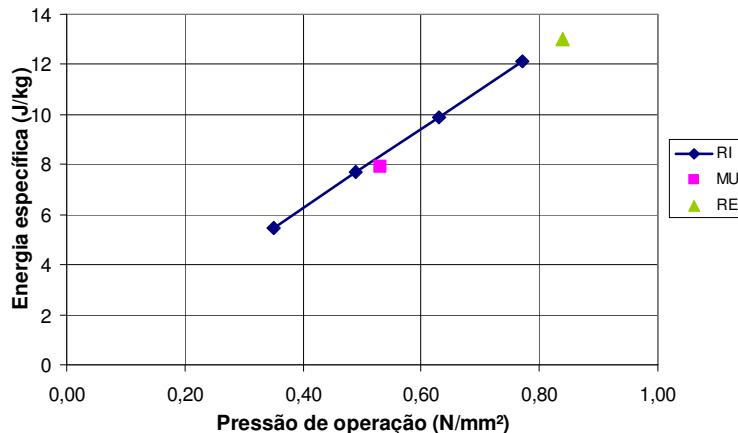


Figura 10 – Influência da pressão de operação na energia específica de lançamento, estimada pelo trabalho, para diferentes argamassas.

Neste modelo, a energia específica de lançamento da argamassa é uma função apenas da pressão de operação, que controla a força aplicada no tronco de cone, e da densidade da argamassa. Maiores pressões levam a maiores velocidades e energias de lançamento da argamassa. Nota-se, na Figura 10, que os valores de energia específica das argamassas MU e RE estão pouco fora da reta que une os resultados de projeção da argamassa RI a diferentes pressões. Isso se deve a diferenças de massa específica das argamassas frescas.

Os valores de energia específica calculados por este método (de 5,5 a 13 J/kg) representam a *capacidade máxima* do sistema, ou seja, **toda a energia oriunda do ar comprimido é utilizada para acelerar a argamassa**. Pode servir, portanto, como referência de eficiência do processo. São desconsideradas as perdas de ar por outras direções (por exemplo, vazamento para dentro da argamassa e saída de ar pela parte superior do PSAC), efeitos de variação da direção de aplicação do ar comprimido quando esse sofre descompressão e efeitos do atrito da argamassa com o projetor. Estes valores também têm a mesma ordem de grandeza dos medidos por Antunes (2005) no lançamento manual de argamassa (de 3,13 a 113 J/kg), inferiores em apenas uma ordem de grandeza para os valores máximos.

Por se tratar de uma estimativa teórica, este método não apresenta sensibilidade suficiente para detectar a não eficiência do aumento da pressão no ganho de energia de lançamento a partir da pressão de 0,63 N/mm², como nos modelos de vazão e de lançamento horizontal para as argamassas e o equipamento ensaiados.

5.5 Estimativa da energia de lançamento a partir do lançamento horizontal

A partir da Equação 11 e da Equação 12, apresentadas anteriormente, calculam-se o tempo de queda das partículas de argamassa e para cada distância média as respectivas velocidades de lançamento.

A partir da distribuição de massa em função da distância é possível calcular a velocidade ponderada para cada pressão de operação. Com esses valores de velocidade estimou-se a energia específica de lançamento.



Figura 11 – Influência da pressão de operação na energia específica de lançamento, estimada pelo modelo de lançamento horizontal, para diferentes argamassas.

Assim como foi observado nos gráficos da Figura 7 e da Figura 8, a partir de determinado valor da pressão de operação, a distribuição de massa e o tempo para projeção sofreram uma inversão no seu comportamento, indicando que valores muito altos de pressão não são eficientes para aumentar a energia de lançamento das argamassas estudadas. Isso fica comprovado no gráfico da Figura 11, onde a energia específica aumenta com o aumento da pressão até essa atingir o valor de 0,63 N/mm², a partir do qual a energia sofre uma diminuição. Assim, os dados mostram que aumentar a pressão acima do valor ótimo causou uma **redução na energia de lançamento da argamassa estudada, sem trazer aparentes benefícios para o aumento de produtividade**. O aumento da pressão acima do ponto ótimo provoca um aumento no consumo de energia para produção do ar comprimido e, simultaneamente, uma redução na energia de lançamento que é utilizada no adensamento das partículas. E isto ocorre sem qualquer ganho de produtividade.

Comparando os valores de energia específica de lançamento estimada por este método (de 2,3 a 11 J/kg) com os valores medidos por Antunes (2005) no lançamento manual de argamassa (de 3,13 a 113 J/kg), observa-se que se encontram próximos, inferiores em apenas uma ordem de grandeza para o valor máximo.

Com relação aos outros métodos apresentados, esse é o que mais se aproxima do comportamento real, uma vez que a estimativa da energia é baseada na medida da distância de lançamento, incluindo efeitos como atrito das argamassas com o sistema, perdas de ar e pressão, etc. Uma outra fonte de erro é a hipótese de que o ângulo de lançamento com o plano horizontal é zero. Isto de fato não ocorre para todas as partículas, pois o jato de argamassa tem ângulo de abertura com relação à horizontal, que pode variar dependendo da pressão de projeção. Este erro que pode tanto levar à subestimação da velocidade quando o ângulo de projeção varia entre $0^\circ < T < 45^\circ$ acima do horizonte ou reduzir a velocidade com ângulo $T < 0^\circ$ - abaixo do horizonte (Figura 12). Outra questão a ser considerada é a real contribuição da componente vertical da velocidade da partícula no adensamento da mesma contra a parede. Adicionalmente, é possível que estes dois erros (positivo e negativo) se compensem.

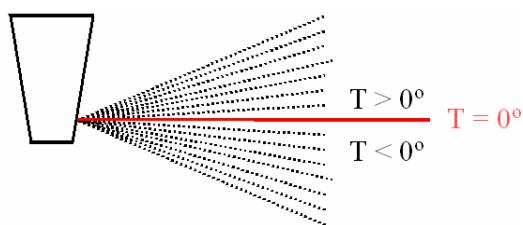


Figura 12 – Desenho esquemático do jato de argamassa gerado na saída do PSAC.

Coerentemente, este método mostrou sensibilidade ao apresentar a diminuição da energia específica de lançamento com o aumento excessivo de pressão, o que era esperado pelo método da vazão e tempo para projeção.

As argamassas MU e RE, apesar de serem diferentes entre si e da argamassa RI, apresentam seus valores de energia específica dentro da curva do gráfico da Figura 11, indicando que as argamassas estudadas não exerceram influência na energia de lançamento, mas apenas no tempo para projeção (Figura 8). Esta conclusão, no entanto, ainda precisa ser confirmada por maior número de experimentos.

5.6 Efeito da argamassa e da pressão de operação na eficiência do processo

5.6.1 Tempo de projeção de ar e de argamassa

É evidente que durante o esvaziamento do PSAC não sai apenas argamassa, mas também ar. Sendo assim, pode-se considerar que a vazão do escoamento (Q_{total}) é a soma das vazões de ar (Q_{ar}) e de argamassa (Q_{arg}) (Equação 13).

$$Q_{total} = Q_{ar} + Q_{arg} \quad \text{Equação 13}$$

Pela Equação 3 tem-se:

$$\begin{aligned} v_{arg} &= \frac{Q_{arg}}{A} \\ Q_{arg} &= v_{arg} * A \end{aligned} \quad \text{Equação 14}$$

Conhecidos os valores da velocidade da argamassa (v_{arg}), admitidos como sendo os estimados pelo método de lançamento horizontal, e a área dos orifícios ($1,26 \times 10^{-3} \text{ m}^2$) pelos quais sai argamassa, pode-se estimar o valor da vazão de argamassa pela Equação 14.

Com os valores de vazão e de volume de argamassa (V_{arg}), que é igual ao volume do recipiente ($3,55 \times 10^{-3} \text{ m}^3$), pode-se estimar o tempo ideal de saída de argamassa (t_{arg}) pela Equação 15.

$$\begin{aligned} Q_{arg} &= \frac{V_{arg}}{t_{arg}} \\ t_{arg} &= \frac{V_{arg}}{Q_{arg}} \end{aligned} \quad \text{Equação 15}$$

Com o tempo para projeção (t_{total}) medido e o tempo ideal de saída de argamassa estimado pela Equação 15, estima-se o tempo ideal de saída de ar (t_{ar}) pela Equação 16:

$$\begin{aligned} t_{total} &= t_{ar} + t_{arg} \\ t_{ar} &= t_{total} - t_{arg} \end{aligned} \quad \text{Equação 16}$$

Estes tempos são idealizados, pois na prática, o que escoa é uma mistura argamassa e ar. Eles refletem a proporção de escoamento entre estas duas fases. O correto aqui seria estimar uma proporção de vazões, mas como não se conhece o volume de ar nem tampouco sua velocidade, esta estimativa não pode ser feita. Assim, a proporção entre t_{ar} e t_{arg} é um indicativo da relação entre vazões e neste trabalho será utilizado com indicador da eficiência do processo.

A relação entre o tempo de saída de argamassa e o tempo total e os tempos ideais de saída de ar e de argamassa estimados encontram-se na Figura 13. Estes valores não expressam tempos reais, uma vez que provavelmente boa parte do tempo parte da área pela qual ocorre o escoamento é ocupada por argamassa e a outra parte por ar, mas dão uma idéia da eficiência do processo.

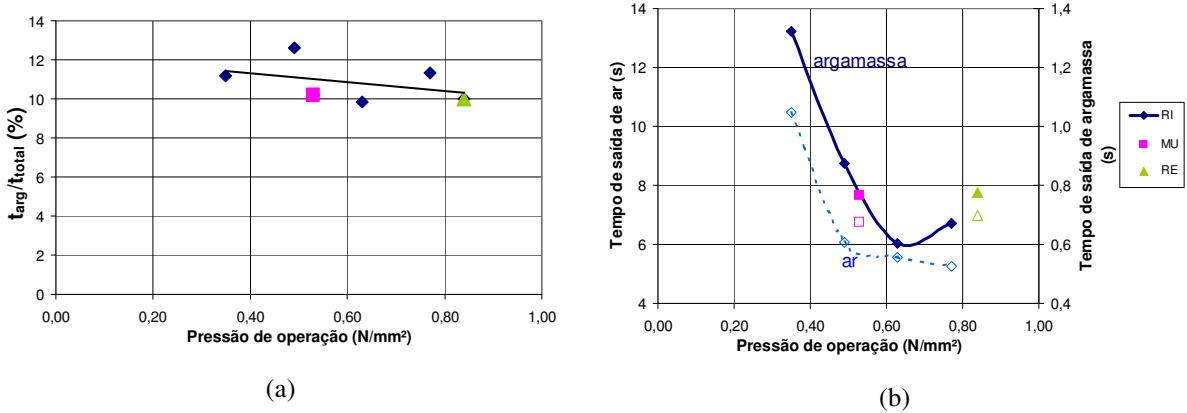


Figura 13 – Influência da pressão de operação na proporção do tempo de saída de argamassa em relação ao tempo para projeção do PSAC (a) e nos tempos ideais de saída de ar e de argamassa (b).

Observa-se na Figura 13 (a) que a pressão de operação pouco influencia na proporção de tempo de saída de argamassa em relação ao tempo para projeção, assim como também não é significativa a influência da argamassa, para os tipos de argamassas e de equipamentos utilizados. Na Figura 13 (b) nota-se a influência tanto da pressão de operação quanto da argamassa no tempo ideal de saída de ar, que pode ser entendida como a dificuldade imposta pela argamassa à passagem do ar. Por terem sido estimados com base no modelo de lançamento horizontal, que não é influenciado pela argamassa, os valores de tempo ideal de saída de argamassa sofrem influência apenas da pressão de operação, aumentando a partir da pressão de 0,63 N/mm². Esse aumento leva à diminuição da energia de lançamento, como visto nos modelos de vazão e tempo para projeção e de lançamento horizontal.

É impossível impedir a saída do ar, afinal é ele quem impulsiona a argamassa, porém para que o sistema fosse mais eficiente, a proporção do tempo de saída de argamassa com relação ao tempo total deveria ser maior.

5.6.2 Comparação entre os métodos de estimativa de energia de lançamento

A Figura 14 (a) mostra a comparação da energia específica estimada pelos métodos do lançamento horizontal e do trabalho e a Figura 14 (b) apresenta a eficiência do equipamento, obtida pela razão entre os valores de energia específica estimados por lançamento horizontal e por trabalho.

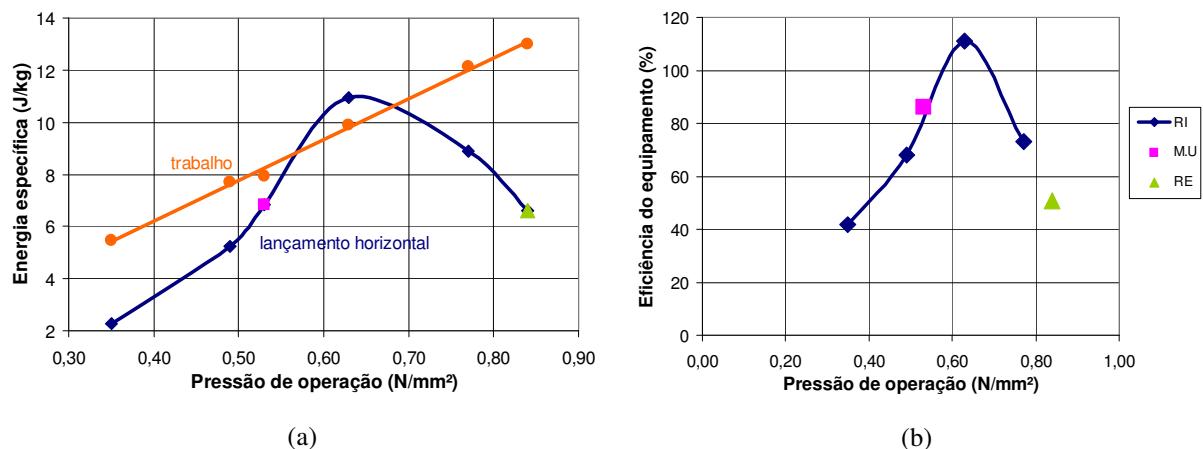


Figura 14 – Comparação entre os métodos de lançamento horizontal e trabalho (a) e eficiência do equipamento (b).

Existe coerência entre os modelos de estimativa de energia de lançamento horizontal e trabalho realizado. Estes resultados também são coerentes com os medidos por Antunes (2005) para projeção manual, embora sejam ligeiramente inferiores. A faixa de velocidade média estimada também se encontra no limite inferior da faixa medida por Armelin *et al.* (1996) para concreto projetado.

Portanto, o ganho da resistência de aderência obtido quando se usa o PSAC provavelmente não se deve ao aumento da energia de lançamento e sim ao tamanho das partículas que atingem a base.

Como já discutido, a energia estimada pelo método do trabalho implica no aproveitamento de 100% da energia disponível e pode ser utilizada como referência da eficiência do processo. Já a energia obtida pelo modelo de lançamento horizontal está ligada diretamente ao que de fato ocorre. Portanto, os resultados de energia a partir do lançamento horizontal não poderiam ser superiores aos obtidos pelo trabalho, o que não acontece em somente um ponto, onde a energia estimada por lançamento horizontal é 10% superior à energia estimada pelo trabalho. Esta discrepância pode ser considerada pequena, dadas as incertezas e as simplificações dos modelos. Adicionalmente, sabe-se que a medida da pressão, que afeta diretamente o processo, é também imprecisa. Desta forma a hipótese de que a energia estimada pelo trabalho é referência da eficiência continua válida.

Como pode ser visto na Figura 14 (b) a eficiência do sistema é pequena nas baixas pressões (de 42% a 68%), apesar de não ser ruim se comparada à eficiência de um motor a combustão (em torno de 30%). O aumento da pressão provoca um aumento na eficiência e na energia até um ponto máximo na pressão de 0,63 N/mm², diminuindo progressivamente para pressões mais altas. Esse pico de eficiência encontra-se dentro da faixa operacional de pressão utilizada no mercado (0,63 a 0,77 N/mm²), embora a variação de eficiência dentro desta faixa seja significativa (em torno de 40%). Sabe-se também que para pressões mais baixas a argamassa não adere à parede¹, o que confirma os resultados teóricos aqui obtidos. Assim, o controle da pressão é muito relevante no processo.

A pressão ideal de operação do PSAC certamente irá depender de detalhes geométricos tornando necessário o estudo da pressão para cada equipamento em particular e possível projetar um equipamento com características e geometria que o tornem mais eficiente.

6 CONCLUSÕES

Estima-se que a energia específica de lançamento do PSAC varia entre 2,3 e 11 J/kg. A energia específica na faixa usual de operação do equipamento encontra-se em torno de 10 J/kg, valor da mesma ordem de grandeza do valor médio de 18 J/kg medido por Antunes (2005). Portanto a melhora da aderência comparativamente ao lançamento manual da argamassa provavelmente não pode ser explicada pelo aumento da energia. Outros fatores, como o tamanho das partículas que chegam à base, devem influenciar neste resultado.

A energia de lançamento medida foi influenciada pela pressão de operação do sistema. No entanto, para o aparelho e as argamassas testados, um aumento da pressão acima do valor ótimo de 0,63 N/mm² causou uma **redução da energia** de lançamento.

O tempo de projeção, que mede a produtividade do serviço, foi influenciado tanto pela argamassa quanto pela pressão. O tempo de projeção também foi reduzido pelo aumento da pressão até se atingir a pressão que maximiza a energia de projeção. Aumento da pressão acima deste limite não provocou redução significativa do tempo para projeção do volume de argamassa contido no PSAC. Provavelmente cada configuração de equipamento deverá apresentar um valor de pressão de operação ótima.

Dos métodos desenvolvidos neste trabalho para estimativa da energia de lançamento do PSAC o de lançamento horizontal é o que melhor exprime o comportamento real do fenômeno. O método do trabalho estima a energia máxima que pode ser desenvolvida pelo sistema, o que permite estimar a eficiência do uso da energia. Já o método da vazão e tempo para projeção mostrou-se ineficiente para estimar a energia de lançamento.

7 REFERÊNCIAS

ANTUNES, R. P. N. **Influência da reologia e da energia de impacto na resistência de aderência de revestimentos de argamassa.** 97 p. Texto para qualificação no programa de Doutoramento – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2004.

ANTUNES, R. P. N. **Influência da reologia e da energia de impacto na resistência de aderência de revestimentos de argamassa.** 163 p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2005.

ARMELIN, H. S.; BANTHIA, N.; MORGAN, D. R. **Particle kinematics in dry-mix shotcrete – Research in progress.** In: Sprayed Concrete Technology for the 21st Century. p. 243 a 251, Edinburgh University, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado – NBR 13278.** Rio de Janeiro, 2005.

AUSTIN, S. A.; ROBINS, P. J.; GOODIER, C. I. **The performance of hardened wet-process sprayed mortars.** Magazine of Concrete Research, 52, n. 3, p. 195 a 208, 2000.

CARASEK, H. **Aderência de argamassas à base de cimento Portland a substratos porosos – avaliação dos fatores intervenientes e contribuição ao estudo do mecanismo da ligação.** 285 p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1996.

CENGIZ, O.; TURANLI, L. **Comparative evaluation of steel mesh, steel fibre and high-performance polypropylene fibre reinforced shotcrete in panel test.** Cement and Concrete Research, n. 34, p. 1357 a 1364, 2004.

DUA LIBE, R. P.; CAVANI, G. R.; OLIVEIRA, M. C. B. **Influência do tipo de projeção da argamassa na resistência de aderência à tração e permeabilidade à água.** In: VI Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas. Anais. Florianópolis, 2005. p. 508-517. (Trabalho de evento).

GLASSGOLD, L. L. **Shotcrete standards – an American perspective.** In: Sprayed Concrete Technology for the 21st Century. p. 217 a 225, Edinburgh University, 1996.

8 AGRADECIMENTOS

Este projeto faz parte do CONSITRA (Consórcio Setorial para Inovação Tecnológica em Revestimentos de Argamassa) do qual participam ABCP, ABAI, SINDUSCON, ABRATEC, Poli USP e UFG e que conta também com recursos da FINEP HABITARE e FAPESP. Os autores agradecem aos técnicos do laboratório do CPqDCC da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, em particular à Renata Monte e Talita de Almeida; às empresas ANVI e Consolid pela cessão de equipamentos; às construtoras Cyrela, Tecnisa e Tarjab, pelas informações prestadas e pelo acesso às obras.