HELOÍSA CRISTINA FERNANDES

**ESTIMATIVA DA ENERGIA DE LANÇAMENTO DAS ARGAMASSAS
PROJETADAS POR SPRAY A AR COMPRIMIDO**

Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Civil da
Escola Politécnica da Universidade de São
Paulo para a obtenção do Título de Mestre
em Engenharia

SÃO PAULO

2007

HELOÍSA CRISTINA FERNANDES

**ESTIMATIVA DA ENERGIA DE LANÇAMENTO DAS ARGAMASSAS
PROJETADAS POR SPRAY A AR COMPRIMIDO**

Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Civil da
Escola Politécnica da Universidade de São
Paulo para a obtenção do Título de Mestre
em Engenharia

Área de Concentração:
Engenharia de Construção Civil

Orientador:
Prof. Dr. Vanderley Moacyr John

SÃO PAULO

2007

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 26 de abril de 2007.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Fernandes, Heloísa Cristina

**Estimativa da energia de lançamento das argamassas projetadas por spray a ar comprimido / H.C. Fernandes. -- ed.rev. -- São Paulo, 2007.
95 p.**

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil.

1.Argamassa 2.Projeção 3.Energia 4.Reologia I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Construção Civil II.t.

Aos meus queridos pais, João Sidney e Janete

Agradecimentos

O “nascimento” dessa dissertação não teria ocorrido se não fosse pela união de forças de várias pessoas importantes na minha vida, que colaboraram de uma forma ou de outra, às vezes nem sabendo quão valiosa era a contribuição que estavam prestando.

Para não criar mal-entendidos, não vou enumerar meus “colaboradores” por ordem de importância. Então não se sintam excluídos os que estiverem no final da lista.

Um dos maiores colaboradores é sem dúvida o meu querido orientador Vanderley John, que em diversos momentos acreditou mais em mim do que eu mesma. Suas sugestões e críticas despendidas durante horas e mais horas de discussão sendo bombardeado por mim com inúmeras perguntas foram ajudas valiosíssimas que fizeram toda a diferença na concepção desse trabalho. Devo a ele também o apelido carinhoso com que sou conhecida no departamento. Professor, a Barbie agradece!

E como não agradecer do fundo do meu coração às pessoas que me trouxeram ao mundo? Papai e mamãe, muitíssimo obrigada por todo amor, apoio, educação, oportunidades, broncas, “paitrocínio”... tudo o que vocês fazem por mim desde 1981. Já que estamos falando de família, obrigada a vocês vovós, que ajudaram a me criar, educar e mimar. Obrigada também aos tios, tias, primas, primos, “agregados”, que apesar de não entenderem muito do assunto, sempre vieram com uma palavra de conforto e com um sorriso nas horas difíceis.

Obrigada Fá, meu amor, por me agüentar com mau-humor e por sempre me ajudar, com muito carinho e apoio. Sem contar as inúmeras revisões de textos, diversas vezes cobradas com insistência da minha parte, para que essa dissertação saísse do forno. Obrigada também à família Cordon, que me recebeu de braços abertos e torceu por mim.

Obrigada Jean, Lú, Lê, Fê, Mi, e agora o Matheus, que mesmo achando que eu não sou desse mundo, também sempre torceram por mim. Aos amigos e ex-alunos do Liceu di Thiene, obrigada por me tratarem com muito carinho desde quando eu era apenas uma aluna de maternal.

Devo um agradecimento especial ao Rafael Pileggi, que com seu poder de persuasão me fez acreditar na “bendita” reologia em suas aulas de “viagem astral”, além das inúmeras ajudas

com os ensaios do reômetro e as discussões de resultados. Por falar em reômetro, obrigada César, que com a maior paciência do mundo me ajudou a realizar os ensaios e a lavar aquela “pequena” cuba pesadíssima.

Já que estamos falando do pessoal do Laboratório de Microestrutura, aqui vai meu agradecimento carinhoso aos amigos Thiago, Andréa, Fábio, Cléber, Kelly, Ismael, Mário, Ronald, que sempre ajudaram de forma prestimosa. Não posso deixar de agradecer com o mesmo carinho ao pessoal do Hall Tecnológico: Reginaldo, Renata, Talita e Adilson que foram figuras essenciais para a realização de boa parte do programa experimental. Às professoras Mércia Barros e Maria Alba Cincotto meu muito obrigada especial. Obrigada também aos professores José Alberto Quintanilha e Linda Lee Ho, que muito me ajudaram com a análise estatística dos dados experimentais. Outro agradecimento especial será dado à doutora Rubiane Antunes, que, mesmo inconscientemente, me inspirou e ajudou a dar o pontapé inicial para a concepção dessa dissertação, além das valiosas sugestões dadas em reuniões e no Exame de Qualificação. Aos outros amigos da Poli, Rosi, Bruno, Fernando, Flávio Munhoz, Mauren, Pati, Pri, Paulinha, Flávio Maranhão, Juan, Fabi Ribeiro, Fabi Leite, muito obrigada por tudo o que fizeram por mim. À Fátima Domingues e à Engrácia um obrigada muito carinhoso por sempre terem me atendido com um sorriso no rosto.

Muito importantes também foram os membros do Consitra, a começar pelo Fábio Campora, passando por Adilson, Renise, Emerson, Rodrigo, Isaac, Mirela e, finalmente Januário e Manuel, pois sem eles esse trabalho não teria “nascido”. Muito obrigada a todos vocês.

Obrigada ao pessoal da Anvi: Andréas, Rômulo, Remo e Daniel por terem acreditado na pesquisa e cedido os compressores e os projetores e prestado grande ajuda quando tudo parecia não funcionar.

Obrigada, sobretudo, a Deus, que me proporcionou a grande oportunidade de ter ao meu lado pessoas tão brilhantes contribuindo nessa etapa extremamente importante da minha vida.

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Justificativa	1
1.2	Objetivo	4
1.3	Estrutura do trabalho	5
2	Desenvolvimento de metodologia para estimativa da energia de lançamento do projetor por spray a ar comprimido	6
2.1	Introdução	6
2.2	Equipamentos de projeção de argamassa	6
2.2.1	Bombas de Projeção Convencionais	6
2.2.2	Projetor por spray a ar comprimido	8
2.3	Energia de lançamento da argamassa projetada mecanicamente	9
2.4	Desenvolvimento dos modelos físicos	11
2.4.1	Vazão e tempo para projeção	11
2.4.2	Trabalho realizado por uma força	12
2.4.3	Lançamento horizontal	14
2.5	Estimativa das perdas potenciais, da eficiência e da produtividade do projetor a ar comprimido	16
2.5.1	Perdas potenciais	16
2.5.2	Eficiência	17
2.5.3	Produtividade	17
2.6	Metodologia de ensaio para validação dos modelos desenvolvidos	18
2.6.1	Materiais	18
2.6.2	Equipamentos	19
2.6.3	Procedimento experimental	19
2.7	Resultados obtidos e discussões	21
2.7.1	Estimativa da energia de lançamento a partir do lançamento horizontal	21
2.7.2	Influência da pressão de operação no tempo para projeção	25
2.7.3	Estimativa da energia de lançamento a partir da vazão e tempo para projeção	26
2.7.4	Estimativa da energia de lançamento a partir do trabalho	27
2.7.5	Estimativa da eficiência do processo de projeção	27
2.8	Considerações sobre o capítulo	29
3	Verificação dos fatores que influenciam o processo de projeção de argamassas a ar comprimido	30
3.1	Introdução	30
3.2	Metodologia experimental	30
3.2.1	Arranjo experimental	30
3.2.2	Materiais	32
3.2.3	Equipamentos	32

3.2.4	Procedimento experimental	34
3.3	Resultados obtidos e discussões	34
3.3.1	Estimativa da produtividade do processo de projeção	34
3.3.2	Estimativa da energia de lançamento a partir do lançamento horizontal	37
3.3.3	Estimativa das perdas potenciais do sistema	41
3.3.4	Inter-relação das variáveis estudadas	44
3.4	Considerações sobre o capítulo	45
4	<i>Caracterização do comportamento reológico das argamassas e seu efeito no sistema de projeção a ar comprimido</i>	47
4.1	Introdução	47
4.2	Revisão bibliográfica	47
4.2.1	Conceitos de reologia	47
4.2.2	Importância da reologia na projeção de argamassas	48
	• <i>Tensão de escoamento</i>	53
	• <i>Viscosidade</i>	54
	• <i>Perfil reológico x Taxa de cisalhamento</i>	55
4.3	Metodologia experimental	56
4.3.1	Materiais	56
4.3.2	Equipamentos	57
4.3.3	Procedimento experimental	58
4.4	Resultados obtidos e discussões	59
4.4.1	Teor de ar incorporado	59
4.4.2	Comportamento reológico das argamassas	60
4.4.3	Energia de lançamento das argamassas	61
4.4.4	Tempo para projeção das argamassas	64
4.4.5	Perdas potenciais das argamassas	65
4.5	Considerações sobre o capítulo	67
5	<i>Conclusões e sugestões</i>	68
	Sugestões para futuros trabalhos	69
6	<i>Referências</i>	71
Anexo A		76

Lista de Figuras

Figura 1.1 – Equipamento de projeção de argamassa (a) para paredes e (b) para o teto.	2
Figura 1.2 – Equipamentos de projeção de argamassa por spray a ar comprimido: (a) francês (foto de Rodrigo Lara), (b) americano e (c) mexicano (imagens extraídas dos sites dos fabricantes).	4
Figura 2.1 – Bombas de projeção de argamassa: (a) tipo helicoidal e (b) de pistão (desenhos sem escala - adaptados de SANTOS, 2003).	7
Figura 2.2 – Bombas de projeção de argamassa: (a) aspecto do jato formado (KIM <i>et al.</i> , 2004) e (b) aspecto da camada de argamassa após a projeção (extraído de www.habikits.com.br , acessado em 19/10/2006).	7
Figura 2.3 – Vistas (a) superior e (b) frontal do equipamento de projeção e (c) formação do spray pela introdução de ar comprimido (fotos da autora).	8
Figura 2.4 – Operário (a) enchendo o projetor com argamassa, (b) aplicação da argamassa na parede e (c) formação de faixas verticais para preenchimento da área a ser revestida (fotos da autora).	9
Figura 2.5 – Aspecto do fluxo de argamassa projetada por bomba de projeção (AUSTIN; ROBINS, 1999).	10
Figura 2.6 – (a) Esquema da força exercida pelo ar comprimido sobre o corpo de argamassa e (b) desenho esquemático do tronco de cone gerado (desenho sem escala).	13
Figura 2.7 – Esquema representativo do modelo de lançamento horizontal (desenho sem escala).	14
Figura 2.8 – Esquema representativo do comportamento esperado para o modelo de lançamento horizontal: (a) vista lateral e (b) vista superior (desenho sem escala).	15
Figura 2.9 – (a) Foto e (b) esquema representativo do comportamento real do modelo de lançamento horizontal (desenho sem escala).	15
Figura 2.10 – Estimativa da altura de queda da argamassa com relação à distância de projeção para as diferentes faixas de distribuição de massa estudadas.	16
Figura 2.11 – Distribuição de massa em função da distância.	21
Figura 2.12 – Influência da pressão de operação na energia específica de lançamento estimada pelo modelo de lançamento horizontal.	22
Figura 2.13 – Desenho esquemático do jato de argamassa gerado na saída do projetor.	23
Figura 2.14 – Derramamento de argamassa durante manuseio (foto da autora).	24
Figura 2.15 – Perdas potenciais do sistema de projeção a ar comprimido.	25
Figura 2.16 – Influência da pressão de operação no tempo para projeção.	25
Figura 2.17 – Influência da pressão de operação na energia específica de lançamento estimada pelo modelo de vazão e tempo para projeção.	26
Figura 2.18 – Influência da pressão de operação na energia específica de lançamento estimada pelo modelo de trabalho realizado por uma força.	27
Figura 2.19 – Comparação entre os métodos de lançamento horizontal e trabalho e eficiência do equipamento.	28
Figura 3.1 – Equipamentos de projeção a ar comprimido estudados.	33

Figura 3.2 – Geometria dos equipamentos de projeção a ar comprimido (desenho sem escala).	33
Figura 3.3 – Mecanismos de liberação do ar comprimido: (a) gatilho e (b) válvula de esfera.	34
Figura 3.4 – Efeito dos fatores estudados nos valores médios de tempo para projeção.	35
Figura 3.5 – Interação entre os fatores que influenciam o tempo para projeção das argamassas.	37
Figura 3.6 – Distribuição de massa das argamassas com 15% de água, projetadas pelo equipamento A.	37
Figura 3.7 – Energia específica média de lançamento de todas as argamassas para cada equipamento.	38
Figura 3.8 – Efeito dos fatores estudados nos valores médios de energia de lançamento.	39
Figura 3.9 – Interação entre os fatores que influenciam a energia de lançamento das argamassas.	40
Figura 3.10 – Perdas potenciais médias dos equipamentos para as argamassas estudadas.	41
Figura 3.11 – Valores médios de quantidade de massa projetada até 0,50 m em função dos fatores estudados.	42
Figura 3.12 – Interação entre os fatores que influenciam as perdas potenciais do processo de projeção.	43
Figura 3.13 – Energia específica de lançamento x Tempo para projeção.	44
Figura 3.14 – Perdas potenciais x Tempo para projeção.	44
Figura 3.15 – Perdas potenciais x Energia específica de lançamento.	45
Figura 4.1 – Constituição da argamassa no estado fresco.	49
Figura 4.2 – Aplicação de argamassas de revestimento por (a) projeção manual e (b) projeção por spray a ar comprimido.	50
Figura 4.3 – Influência da pressão aplicada pelo ar comprimido no ângulo de abertura e no alcance do spray formado na projeção (RIBEIRO <i>et al.</i> , 2005).	51
Figura 4.4 – Projeção de argamassa: (a) equipamento cheio antes da projeção, (b) projeção da argamassa formando espaço vazio e (c) preenchimento do espaço vazio por ação do peso próprio (desenhos esquemáticos e sem escala).	53
Figura 4.5 – Efeito do atrito entre a parede do projetor e a argamassa: (a) maior e (b) menor atrito (desenhos esquemáticos e sem escala).	54
Figura 4.6 – Distribuição granulométrica das argamassas estudadas.	57
Figura 4.7 – Proporção volumétrica percentual dos constituintes das argamassas.	57
Figura 4.8 – Reômetro rotacional utilizado para caracterização reológica das argamassas estudadas: vista frontal (A) com a cuba, (B) raquete e (C) posicionamento da mesa.	57
Figura 4.9 – Variação do teor de ar incorporado em função do tempo de mistura (os valores entre parênteses correspondem ao teor de ar incorporado pelas argamassas quando preparadas no misturador mecânico).	58
Figura 4.10 – Ciclos de ensaio: (a) argamassa X e (b) argamassas Y, Z e W. As principais diferenças são a rotação durante o período de mistura e a duração dos períodos de desaceleração.	59
Figura 4.11 – Torque equivalente x rotação no ciclo de cisalhamento e desaceleração.	60
Figura 4.12 – Viscosidade equivalente x rotação no ciclo de cisalhamento e desaceleração.	60
Figura 4.13 – Efeito da viscosidade na energia específica de lançamento média das argamassas preparadas com 15% e 17% de água e projetadas pelos equipamentos A, B e D a 0,77 e 0,91 N/mm ² de pressão.	62
Figura 4.14 – Efeito da viscosidade na energia específica média de lançamento das argamassas projetadas pelos equipamentos A, B e D a 0,77 e 0,91 N/mm ² de pressão.	62

Figura 4.15 – Formação de spray para argamassas com (a) matriz de alta viscosidade e (b) matriz de baixa viscosidade, projetadas através de orifício cilíndrico (desenhos esquemáticos e sem escala).	63
Figura 4.16 – Influência da área do orifício de projeção na energia específica de lançamento das argamassas.	64
Figura 4.17 – Efeito da viscosidade no tempo médio para projeção das argamassas projetadas pelos equipamentos A, B e D a 0,77 e 0,91 N/mm ² de pressão.	64
Figura 4.18 – Efeito da viscosidade nas perdas potenciais médias das argamassas projetadas pelos equipamentos A, B e D a 0,77 e 0,91 N/mm ² de pressão.	65
Figura 4.19 – Efeito da viscosidade nas perdas potenciais médias das argamassas projetadas pelos equipamentos A, B e D a 0,77 e 0,91 N/mm ² de pressão, desconsiderando a argamassa W preparada com 15% de água.	66
Figura 4.20 – Influência da área do orifício de projeção nas perdas potenciais do sistema.	66

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Faixas de distância e distância média para cálculo da velocidade de lançamento.	15
Tabela 2.2 – Características da argamassa ensaiada.....	18
Tabela 3.1 – Arranjo experimental.	31
Tabela 3.2 – Características das argamassas ensaiadas.	32
Tabela 4.1 – Teor de ar incorporado das argamassas após os ciclos de ensaio (média $\pm$ desvio padrão).	59

Resumo

O revestimento de argamassa é um componente comum das fachadas dos edifícios brasileiros. Sua aderência à base é um fator determinante para seu adequado desempenho, pois a queda de placas de revestimento pode resultar em falhas funcionais e estéticas e até em acidentes fatais. Está provado que a aderência do revestimento depende da combinação entre o comportamento reológico da argamassa e a energia com que foi lançada à base durante a aplicação. Sabe-se, também, que a introdução da técnica de aplicação de argamassa por spray a ar comprimido aumentou a aderência dos revestimentos com relação à aplicação manual. Não se conhecia ainda a energia empregada por esse tipo de equipamento e os fatores que exerceriam influência nesse sistema de projeção. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma metodologia simples que estima a energia de lançamento dos projetores a ar comprimido e estuda experimentalmente os fatores importantes para a projeção, tais como a pressão do ar comprimido e o comportamento reológico de diversas composições de argamassa preparadas com dois teores de água em diferentes equipamentos do mercado brasileiro. Foram estimadas, também, a produtividade, a partir do tempo necessário para esvaziamento do projetor, e as perdas potenciais de cada combinação.

Dados experimentais mostraram que a energia de lançamento, empregada pelos equipamentos estudados, para as argamassas ensaiadas variou de 2 a 16 J/kg, as perdas potenciais estimadas variaram de 1% a 25% e o intervalo de tempo para projeção medido foi de 5 a 20 s.

Palavras-chave: Argamassa. Projeção. Energia. Reologia.

Abstract

Mortar rendering is commonly applied to Brazilian buildings façades. Its adherence to the base is an important enabler for its adequate performance, since the fall of not properly applied rendering plates may result in functional and esthetical failures and even in fatalities. It is known that the mortar rendering bond strength depends on the combination between its rheological behavior and the energy (or speed) utilized in its projection. It has also already been demonstrated that the mortar projected by spray equipment propelled by compressed air have better bond strength than the same mortar projected manually. However, the projection energy of the equipment and the related parameters that may influence this process has not been measured yet. This paper aims to develop a simple methodology to measure the projection energy provided by the air spray equipment and also the role of the parameters that affect this process, such as air pressure values and rheological behavior of several mortar formulations prepared with distinct water contents being projected by different equipments commonly found in the Brazilian market. The process productivity, by means of the time necessary to empty the projector mortar reservoir, and the potential material waste of each combination were also studied.

A set of experimental data demonstrated that the projection energy provided by the studied equipments to the different mortar formulations presented a variation range from 2 to 16 J/kg, an estimated potential material losses ranged from 1% to 25% and a projection time from 5 to 20 s.

Key-words: Mortar. Projection. Energy. Rheology.

1 Introdução

1.1 Justificativa

A argamassa de revestimento é um material largamente utilizado nas fachadas de edifícios brasileiros. Além de contribuir com a estanqueidade à água, os revestimentos de argamassa têm como função regularizar a base (estrutura e vedação) para o recebimento do acabamento final, seja ele pintura, cerâmica ou outro material (BAÍIA; SABBATINI, 2004). Problemas patológicos nessa camada de revestimento, como fissuras e descolamentos, trazem prejuízos para construtoras, usuários e fabricantes, além de ser grande o risco de acidentes devido à queda de placas de revestimento que apresentarem falhas na aderência ao longo do tempo. Dependendo do peso e da altura das placas descoladas, no caso delas se desprenderem da parede e atingirem usuários, os acidentes podem ser fatais.

O desempenho dos revestimentos de argamassa depende muito da sua aderência com a base. Por estar aderido à estrutura e à alvenaria, o revestimento deve acompanhar as deformações sofridas pela edificação durante movimentações estruturais e pela ação dos agentes ambientais externos, como sol, chuva e vento, sem apresentar descolamentos (CANDIA; FRANCO, 1998; JUST; FRANCO, 2001; SILVA; LIBÓRIO, 2002; ANTUNES, 2005).

A aderência, por sua vez, é resultado da adequada combinação entre o *comportamento reológico* da argamassa e a *energia cinética* com que a mesma é lançada contra uma base com características conhecidas (rugosidade, absorção, natureza química), eliminando os vazios na interface com o substrato, conforme mostrou Antunes (2005) em seu trabalho de doutorado. De acordo com a autora, essa *energia de impacto*, que neste trabalho será tratada como *energia de lançamento*, é dissipada na deformação plástica (espalhamento) da argamassa sobre a base, levando à eliminação dos defeitos de interface (ar preso entre camadas) e aumentando 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. Em seu trabalho, Antunes (2005) concluiu que *a energia de lançamento é um fator relevante na resistência de aderência de um revestimento de argamassa*.

A substituição da técnica de aplicação manual de argamassas de revestimento pela projeção mecânica é tendência internacional. Isso se deve a fatores como aumento da produtividade, a partir da mecanização da produção (SANTOS; BAUER, 2003), e padronização da energia de lançamento, reduzindo a variabilidade intrínseca à aplicação manual medida por Antunes (2005).

No Brasil, particularmente no mercado de São Paulo¹, a utilização de equipamentos projetores de argamassa que operam a ar comprimido, conhecidos comercialmente pelo nome de “canequinha” (Figura 1.1), tem tido crescente aceitação pelas construtoras, visto que não requerem alto investimento e são de fácil utilização.

Figura 1.1 – Equipamento de projeção de argamassa (a) para paredes e (b) para o teto.

Resultados experimentais (DUAILIBE *et al.*, 2005) e a experiência das construtoras² mostram que o uso deste equipamento proporciona maior homogeneidade do revestimento e um aumento da sua resistência de aderência em relação à aplicação manual. Em seu trabalho, Duailibe *et al.* (2005) obtiveram aumento de 55% da resistência de aderência quando a aplicação de uma mesma argamassa mudou de manual para projeção a ar comprimido. No entanto, as causas deste ganho são ainda desconhecidas, embora se especule que o fator determinante desse aumento seja a *energia de lançamento* empregada pelo equipamento.

Diversos autores (AUSTIN; ROBINS, 1999; JOLIN *et al.*, 1999; GORDON, 1991 apud AUSTIN *et al.*, 2000; MARQUES *et al.*, 2004; MALMGREN *et al.*, 2005) concordam que a argamassa (ou o concreto) aplicada por projeção mecânica apresenta maior compactação, e, conseqüentemente, maior densidade do que a mesma argamassa aplicada manualmente. Austin e Robins (1999) realizaram uma pesquisa bastante abrangente a respeito da influência da aplicação mecânica da argamassa por bombas de projeção sobre as propriedades do revestimento no estado endurecido e verificaram aumentos de 1,4% a 18,6% na densidade de

¹ Informação obtida por meio de comunicação eletrônica enviada por Rômulo Colares (ANVI) em 5/4/2006, onde até o momento 15 construtoras da cidade de São Paulo utilizavam o sistema de projeção a ar comprimido.

² Contato pessoal com engenheiros Alexandre Amado Brites, da construtora Cyrela, Joelson de Oliveira Santos, da construtora Tecnisa e Paulo Flaquer Filho, da construtora Tarjab.

corpos de prova quando a aplicação de uma mesma argamassa passou de manual para mecânica.

Esses fatores geram um consenso com relação à especulação de que a energia empregada pelo equipamento possa ser um fator de grande influência no citado aumento da resistência de aderência e da homogeneidade do revestimento com relação à aplicação manual. Isso porque na aplicação por projeção a ar comprimido a energia de lançamento não depende do trabalho manual do pedreiro e sim da pressão e da vazão do ar comprimido que lança a argamassa através do projetor, muito embora não se conheça a magnitude dessa energia. Não se pode perder de vista que a capacidade de vazão do compressor seja de tal ordem que adapte sua produção de ar às condições de consumo.

Existem alguns estudos sobre energia de lançamento na aplicação de argamassas, porém todos se baseiam em aplicação manual. Entre eles destacam-se os de Carasek (1996), Bonin (2001)³ e Antunes (2005).

Não foi encontrado nenhum estudo acadêmico que trate da energia de lançamento empregada na aplicação por projeção mecânica com o uso do projetor a ar comprimido, exceto o estudo inicial da autora (FERNANDES *et al.*, 2006), embora se tenha notícia da existência de equipamentos similares a ele em outros países.

Foram encontrados em sites da internet (<http://tirolelessallc.com/esp/catalogo/lanzadoras.htm#>; <http://www.northcoast.com/~tms/tiro.htm>, <http://www.johnkingsley.ca/strawbale/sprayer/v1.html>) e em feiras de equipamentos alguns projetores de argamassa por ar comprimido em países como França, EUA e México. Nos sites dos fabricantes encontram-se apenas manuais de operação e manuseio dos equipamentos e de execução de revestimentos a partir sua utilização, assim como recomendações de pressão de operação e capacidade de vazão do compressor de ar, não havendo qualquer estudo ou referências a respeito da energia de lançamento fornecida pelos mesmos na aplicação da argamassa.

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 Doutorado da EPUSP em abril de 2004.

Figura 1.2 – Equipamentos de projeção de argamassa por spray a ar comprimido: (a) francês (foto de Rodrigo Lara), (b) americano e (c) mexicano (imagens extraídas dos sites dos fabricantes).

A busca por estudos sobre o assunto mostrou-se bastante difícil, pois na literatura internacional não foi encontrada referência à *argamassa projetada mecanicamente*, mas somente a *shotcrete*, termo esse que se refere tanto à argamassa quanto ao concreto projetados pneumaticamente a alta velocidade sobre uma superfície (AUSTIN *et al*, 1999). Sendo assim, resolveu-se neste trabalho fazer uma analogia entre as propriedades do concreto e da argamassa projetados mecanicamente, já que na maioria dos estudos não é feita a distinção entre estes materiais.

Este estudo está inserido no âmbito do CONSITRA (Consórcio Setorial para Inovação Tecnológica em Revestimentos de Argamassa), do qual fazem parte a indústria (representada por ABAI e ABCP), o consumidor (representado pelo SINDUSCON-SP) e a academia (POLI-USP e UFG). O objetivo principal do CONSITRA é buscar soluções aos problemas que comprometem os revestimentos produzidos com argamassa e conta com recursos das indústrias, do Programa Habitar da Finep e da FAPESP.

1.2 Objetivo

O objetivo deste trabalho é estimar a *energia de lançamento* da argamassa aplicada por projeção mecânica por spray a ar comprimido e investigar quais os fatores que exercem influência na energia de lançamento, na produtividade e nas perdas durante a projeção.

Esta atividade envolveu, em primeiro lugar, o desenvolvimento de modelos físicos capazes de estimar a energia a partir da velocidade de lançamento da argamassa. A estimativa dessa velocidade se deu pela aplicação de medidas experimentais, obtidas a partir de uma metodologia de ensaio desenvolvida neste trabalho, a três modelos físicos diferentes que simulam o fenômeno. Estes modelos foram testados em um conjunto argamassa-equipamento, tendo sido analisada a importância da *pressão do ar* fornecida pelo compressor que alimenta o sistema. O estudo dos fatores que influenciam o sistema de projeção a ar comprimido foi realizado para argamassas com diferentes *comportamentos reológicos* (composições e teores

de água) projetadas por quatro *modelos diferentes* de equipamentos projetores operando a quatro valores de pressão de operação.

1.3 Estrutura do trabalho

O Capítulo 2 apresenta as metodologias de estimativa da energia de lançamento do projetor a ar comprimido que foram desenvolvidas. Elas consistem em modelos baseados em vários princípios da física clássica, particularmente os princípios de conservação da energia e energia cinética, que, aplicados a dados colhidos experimentalmente, permitem estimar a energia. Estes modelos são aplicados a um conjunto argamassa-equipamento a diferentes pressões e os resultados obtidos são analisados, permitindo escolher o modelo considerado mais adequado. São discutidos também alguns métodos de estimativa de eficiência, de perdas e de produtividade do processo.

O Capítulo 3 é dedicado à investigação dos fatores que exercem influência sobre a energia de lançamento, tais como a pressão de operação fornecida pelo compressor de ar e o comportamento reológico das argamassas. Neste capítulo são discutidos os resultados de ensaios com 4 formulações diferentes de argamassas produzidas com 2 teores de água cada e projetadas por 4 equipamentos de modelos diferentes.

O comportamento reológico das argamassas estudadas e sua influência na energia de lançamento, nas perdas potenciais e na produtividade do sistema são discutidos no Capítulo 4. As considerações finais e principais conclusões estão apresentadas no Capítulo 5, assim como as sugestões para futuros trabalhos. As referências bibliográficas estudadas estão listadas no Capítulo 6.

2 Desenvolvimento de metodologia para estimativa da energia de lançamento do projetor por spray a ar comprimido

2.1 Introdução

Já foi visto no Capítulo 1 que a energia de lançamento da argamassa é um dos fatores determinantes da aderência do revestimento (ANTUNES, 2005), e que revestimentos produzidos por projeção por spray a ar comprimido apresentam aderência maior que os produzidos por aplicação manual (DUAILIBE *et al.*, 2005). A energia de lançamento empregada nesse tipo de projeção, porém, ainda não é conhecida. Com isso, torna-se essencial criar uma metodologia que a estime, permitindo a comparação de seus valores com os da aplicação manual medidos por Antunes (2005).

O objetivo deste capítulo é desenvolver e validar uma *metodologia de ensaio* para estimar a *energia de lançamento* empregada pelo projetor por spray a ar comprimido. Para tanto foram desenvolvidos três modelos físicos diferentes que simulam o fenômeno e permitem estimar a velocidade de lançamento da projeção mecânica e, portanto, a *energia cinética de lançamento* do projetor. A estes modelos foram aplicados dados experimentais que resultaram em valores de energia de lançamento compatíveis com os encontrados por Antunes (2005) para lançamento manual.

2.2 Equipamentos de projeção de argamassa

Existem dois tipos de equipamento para projeção mecânica de argamassas: as *bombas de projeção* convencionais e o *projetor por spray a ar comprimido*, foco deste estudo, posto que tem maior penetração no mercado de São Paulo⁴.

2.2.1 Bombas de Projeção Convencionais

Nas bombas de projeção convencionais a argamassa fresca é bombeada mecanicamente através de um mangote flexível até uma pistola (ou bico) de projeção, onde é projetada pela introdução de ar comprimido. Algumas destas bombas são acopladas aos misturadores de tal

⁴ Em visitas a obras na cidade de São Paulo foram encontrados apenas equipamentos de projeção a ar comprimido para a produção de revestimentos por aplicação mecânica, não se tendo notícia da utilização de bombas de projeção convencionais por nenhuma construtora contatada.

maneira que a argamassa fresca preparada no misturador é descarregada diretamente para dentro da bomba de projeção. Nesse arranjo, os misturadores de argamassas podem receber a argamassa seca transportada pneumaticamente dos silos ou depositada em sacos, sendo o sistema operado por uma pessoa (CRESCÊNCIO *et al.*, 2000).

Essas bombas podem ser do tipo helicoidal ou de pistão (Figura 2.1). De acordo com Goodier e Austin (2002), as bombas do tipo helicoidal são indicadas para pequenas produções de argamassa (< 5 m³/h) enquanto as bombas de pistão são indicadas para produções médias ou grandes (de 5 a 20 m³/h).

Figura 2.1 – Bombas de projeção de argamassa: (a) tipo helicoidal e (b) de pistão (desenhos sem escala - adaptados de SANTOS, 2003).

O jato de argamassa formado durante a projeção por bombas apresenta o aspecto da Figura 2.2 a. A camada de argamassa formada após a projeção está ilustrada na Figura 2.2 b.

Figura 2.2 – Bombas de projeção de argamassa: (a) aspecto do jato formado (KIM *et al.*, 2004) e (b) aspecto da camada de argamassa após a projeção (extraído de www.habikits.com.br, acessado em 19/10/2006).

Neste tipo de aplicação, a argamassa é aplicada em cordões horizontais para preenchimento da área desejada, sendo posteriormente sarrafeada e desempenada, em tempo adequado, para obtenção do acabamento desejado.

2.2.2 Projettor por spray a ar comprimido

Os projetores a ar comprimido são equipamentos muito simples, de baixo custo, uma vez que a argamassa não é bombeada através de um mangote, sendo colocada diretamente no recipiente onde é introduzido ar comprimido. As desvantagens dessa configuração são: o peso do equipamento carregado com argamassa, que pode dificultar a execução do serviço pelo esforço físico exigido do operador e o volume do recipiente, que é limitado a cerca de 3,5 a 3,8 l de forma a não exigir esforço manual elevado, solicitando diversas paradas para recarga do equipamento.

Nos modelos existentes no Brasil o ar comprimido é injetado no equipamento através de 4 orifícios com aproximadamente 2 mm de diâmetro cada, lançando a argamassa *em forma de spray* por outros 4 orifícios, com aproximadamente 20 mm de diâmetro cada, localizados à frente dos orifícios de entrada de ar (Figura 2.3).

Figura 2.3 – Vistas (a) superior e (b) frontal do equipamento de projeção e (c) formação do spray pela introdução de ar comprimido (fotos da autora).

Esses equipamentos são constituídos por um recipiente metálico ou plástico, acoplado a uma base metálica, onde se localizam os orifícios de entrada de ar e de saída de argamassa. A base é ligada a um tubo metálico, que, além de transportar o ar, serve como cabo para manuseio. Neste tubo é localizado o gatilho para liberação do ar comprimido que é conectado a um compressor de ar através de uma tubulação flexível.

Os fabricantes recomendam conectar até 5 equipamentos de projeção a um compressor com capacidade para produzir 68 m³/h (40 cfm⁵) de ar e que opere na faixa de pressão entre 0,93 e 1,20 N/mm² (135 e 170 psi respectivamente). A pressão de operação recomendada permanece na faixa de 0,63 a 0,77 N/mm² (90 e 110 psi respectivamente) ⁶.

⁵ A unidade de medida de capacidade de vazão utilizada pelos fabricantes de compressor de ar é cfm (cubic feet per minute), que no Sistema Internacional corresponde a 1,7 m³/h.

⁶ Dados obtidos com fabricantes do projetor (Consolid e Anvi) em reuniões realizadas durante o decorrer do estudo.

Para a execução do revestimento o operário deve encher o recipiente com argamassa no estado fresco, mergulhando-o na caixa de massa, posicioná-lo paralelamente à parede e liberar o ar comprimido para a projeção. Durante a aplicação da argamassa o operário deve fazer movimentos ascendentes com o equipamento, formando faixas verticais até o total preenchimento da área a ser revestida (Figura 2.4). Após a aplicação a argamassa é sarrafeada e desempenada, em tempo adequado, para obtenção do acabamento final.

Figura 2.4 – Operário (a) enchendo o projetor com argamassa, (b) aplicação da argamassa na parede e (c) formação de faixas verticais para preenchimento da área a ser revestida (fotos da autora).

2.3 Energia de lançamento da argamassa projetada mecanicamente

Diversos autores (GLASSGOLD, 1996; ARMELIN *et al.*, 1996; ARMELIN *et al.*, 1999; AUSTIN; ROBINS, 1999; AUSTIN *et al.*, 2000; CENGIZ; TURANLI, 2004), investigaram a energia de lançamento do concreto (ou argamassa) aplicado por bombas de projeção.

Glassgold (1996), ao revisar as normas americanas (ACI e ASTM) que tratam do assunto, notou a deficiência no estudo da influência da velocidade de lançamento nas propriedades do estado endurecido de concretos projetados.

Buscando entender o mecanismo de reflexão/rebote dos grânulos⁷ de concreto projetado, Armelin *et al.* (1996), mediram a velocidade dos mesmos com o auxílio de câmeras fotográficas de alta velocidade. Os autores concluíram que o tamanho dos grânulos exerce influência sobre sua velocidade, que variou de 1,7 a 33 m/s, para a mesma vazão de ar comprimido, sendo que **grânulos maiores são lançados com velocidades menores**, não importando a direção da aplicação (horizontal ou vertical) ou o tipo do bico de projeção. Os autores comentam também, que a determinação da velocidade dos grânulos 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.

⁷ Serão consideradas como grânulos nesse trabalho as porções de argamassa resultantes do spray formado pela introdução de ar comprimido no equipamento de projeção, que podem ser constituídas por um ou mais agregados recobertos por uma camada de pasta.

Em estudo posterior, Armelin *et al.* (1999) notaram que a energia de lançamento dos concretos projetados mecanicamente não havia sido completamente caracterizada e, através da filmagem do evento de projeção de grânulos, concluíram que além do tipo de bocal e do tamanho dos grânulos projetados, a vazão do ar comprimido também influencia a velocidade de lançamento, sendo que a mesma aumenta com o incremento da vazão. Isso ocorre até certo valor de vazão, a partir do qual o aumento da velocidade é menor.

Austin e Robins (1999) determinaram a velocidade do concreto projetado por bombas helicoidais e de pistão com o auxílio de câmeras fotográficas de alta velocidade. A velocidade máxima atingida pelo fluxo de concreto na bomba helicoidal variou entre 9 e 11 m/s, enquanto na bomba de pistão a variação foi de 20 a 25 m/s. A partir da análise das imagens os autores observaram que o fluxo gerado pelas bombas consiste numa grande variedade de tamanho de grânulos do material que adere à superfície (Figura 2.5).

Figura 2.5 – Aspecto do fluxo de argamassa projetada por bomba de projeção (AUSTIN; ROBINS, 1999).

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, medir a energia de lançamento empregada na aplicação mecânica.

A experiência de engenheiros e fabricantes dos equipamentos mostra que a pressão de operação empregada pelo ar comprimido durante a projeção exerce papel determinante na energia de lançamento da argamassa. A estabilidade da pressão durante a projeção depende da vazão do compressor e do tamanho do reservatório de ar comprimido. Diante desse panorama torna-se essencial saber na prática qual a influência da pressão na energia de lançamento da argamassa. Também não existem informações sobre a influência do tipo de argamassa e do modelo de equipamento na energia.

2.4 Desenvolvimento dos modelos físicos

Buscou-se primeiramente identificar os fenômenos físicos que simulassem o comportamento da argamassa durante a projeção e que permitissem estimar a velocidade com que a mesma é lançada pelo projetor.

Desprezando a resistência do ar e a componente vertical da velocidade, já que a distância do projetor à parede é pequena (de 0,15 a 0,30 m), pode-se considerar a energia de lançamento da argamassa como sendo a energia cinética (E_C) calculada (Equação 2.1) a partir do valor da componente horizontal da velocidade média (BONIN, 2001³; ANTUNES, 2005):

$$E_C = \frac{1}{2} * m * v_x^2 \quad \text{Equação 2.1}$$

Quando a massa projetada não é conhecida, mas pode-se estimar experimentalmente a velocidade de lançamento, é possível estimar a *energia específica de lançamento*, dada em J/kg, termo que será utilizado durante todo o desenvolvimento deste trabalho (Equação 2.2).

$$E_{\text{específica}} = \frac{1}{2} * v^2 \quad \text{Equação 2.2}$$

A seguir são apresentadas três modelos simples para estimar essa velocidade.

2.4.1 Vazão e tempo para projeção

Durante a projeção, o ar comprimido injetado no equipamento cria um fluxo de argamassa, lançando-a pelos orifícios através da formação de um spray. Admitindo que esse fluxo seja constante, é possível determinar a vazão de argamassa (Q) em m³/s, conhecidos o volume de material (V), em m³, e o tempo para projeção (Δt) em segundos, que é o tempo necessário para o completo esvaziamento do recipiente (Equação 2.3).

$$Q = \frac{V}{\Delta t} \quad \text{Equação 2.3}$$

Conhecendo-se a vazão de argamassa e a área (A) dos orifícios de saída da mesma, em m², pode-se calcular a velocidade de esvaziamento (v), em m/s, do recipiente (Equação 2.4).

$$v = \frac{Q}{A} \quad \text{Equação 2.4}$$

A velocidade de lançamento determinada por esse modelo apresenta como resultado um valor médio das velocidades dos grânulos. Este modelo admite um fluxo constante de argamassa. No entanto trata-se de um escoamento turbulento de uma mistura de argamassa e ar injetado. **Assim, este método subestima a velocidade e a energia de lançamento.**

2.4.2 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 2.5 a seguir:

$$\tau = F * d * \cos \theta \quad \textbf{Equação 2.5}$$

onde:

τ é o trabalho realizado pela força, em N.m;

F é a força aplicada nos orifícios de ar, em N;

d é distância percorrida pelo corpo de argamassa, em m; e

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

Como o ângulo formado entre a direção da aplicação da força e a direção do deslocamento é de 0° e o $\cos 0^\circ$ é 1, a Equação 2.5 pode ser simplificada como segue (Equação 2.6):

$$\tau = F * d \quad \textbf{Equação 2.6}$$

A força que realiza trabalho é aquela exercida pelo ar comprimido. Conhecendo-se a pressão (p) no orifício de saída do ar e sua respectiva área (A) é possível calcular a força (F) aplicada na argamassa. (Equação 2.7).

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

$$F = p * A \quad \textbf{Equação 2.7}$$

O trabalho também pode ser definido como a variação de energia cinética do corpo (Equação 2.8).

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

$$\tau = \frac{1}{2} m (v_{final}^2 - v_{inicial}^2) \quad \textbf{Equação 2.8}$$

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, considerando que a argamassa se encontra em repouso antes da aplicação do ar. A velocidade final será a velocidade com que a argamassa abandona o projetor, ou seja, sua 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 2.6, considerando-se que o fluxo do ar comprimido fosse direcionado, o que pode não ser verdade, visto que o ar injetado deve se movimentar em diversas direções ao sofrer descompressão.

Figura 2.6 – (a) Esquema da força exercida pelo ar comprimido sobre o corpo de argamassa e (b) desenho esquemático do tronco de cone gerado (desenho sem escala).

O volume do tronco de cone (V_T) pode ser calculado pela Equação 2.9:

$$V_T = \frac{\pi}{3} \left(\frac{D^2}{4} * H - \frac{d^2}{4} * h \right) \quad \text{Equação 2.9}$$

Conhecido o volume do tronco de cone é possível calcular, a partir do valor da massa específica aparente da argamassa fresca (γ), a massa de argamassa (m) projetada pela força exercida pelo ar comprimido injetado através de um orifício (Equação 2.10):

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

$$m = \gamma * V_T \quad \text{Equação 2.10}$$

Para as condições impostas, chegou-se à Equação 2.11 para a estimativa da velocidade de lançamento (v):

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

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

$$\text{Equação 2.11}$$

Esse modelo superestima a velocidade e a energia de lançamento, pois o valor de pressão considerado para o cálculo da força exercida pelo ar comprimido corresponde à pressão estática, lida no manômetro do compressor antes da abertura da válvula de passagem do ar. O mais preciso seria medir a pressão dinâmica durante a projeção, que é menor do que a estática

já que o ar se encontra em movimento, e considerar este valor na estimativa da velocidade. Esta opção, no entanto, não estava disponível durante a realização do experimento.

2.4.3 Lançamento horizontal

No modelo físico de lançamento horizontal o movimento do grânulo 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, com 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 2.7 – Esquema representativo do modelo de lançamento horizontal (desenho sem escala).

Nesse tipo de lançamento, o tempo necessário para o grânulo chegar ao chão ($t_{vôo}$), desprezando-se a resistência do ar, depende da altura de queda (h), nesse caso de aproximadamente 1 m, e pode ser calculado pela Equação 2.12:

$$t_{vôo} = \sqrt{\frac{2h}{g}} \quad \text{Equação 2.12}$$

Sendo assim, não importa a que distância do projetor a argamassa foi lançada, todos os grânulos levarão o mesmo tempo para chegar ao chão.

A velocidade de lançamento da argamassa pode ser considerada como sendo a velocidade da direção horizontal do movimento (v_x), calculada pela Equação 2.13:

$$v_x = \frac{D}{t_{vôo}} \quad \text{Equação 2.13}$$

onde D é a distância de queda, em metros, da argamassa com relação ao projetor. Esta distância pode ser medida experimentalmente realizando a projeção da argamassa afastada de qualquer alvo. Esse conceito foi aplicado por Bonin (2001)³ para a determinação da velocidade horizontal de lançamentos manuais.

Esta consideração introduz erros relativos aos ângulos de saída dos grânulos com relação ao plano horizontal e à 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 0,15 a 0,30 m praticados. Sendo assim, os resultados desse método subestimam a velocidade de lançamento da argamassa.

Acreditava-se que todos os grânulos de argamassa seriam projetados com energias muito próximas, e se lançados afastados de qualquer alvo, atingiriam o chão em uma área definida (Figura 2.8). A velocidade seria então calculada em função da distância média que a massa de argamassa projetada atingiria com relação ao projetor.

Figura 2.8 – Esquema representativo do comportamento esperado para o modelo de lançamento horizontal: (a) vista lateral e (b) vista superior (desenho sem escala).

Na prática os resultados experimentais demonstraram que a argamassa projetada afastada de qualquer anteparo vertical atinge o solo formando um padrão representado na Figura 2.9. Este espalhamento pode ser resultado de diferenças na energia de lançamento entre diferentes grânulos e também do ângulo de abertura do spray durante o lançamento.

Figura 2.9 – (a) Foto e (b) esquema representativo do comportamento real do modelo de lançamento horizontal (desenho sem escala).

Como é difícil medir a distância de queda para cada grânulo individualmente, a solução simplificada adotada foi medir a distribuição de massa em função da distância, a partir da divisão do comprimento em faixas (Tabela 2.1). A velocidade de cada faixa é então calculada em função da distância média ao projetor.

Tabela 2.1 – Faixas de distância e distância média para cálculo da velocidade de lançamento.

Faixa de distância (m)	0,0 – 0,50	0,50 – 1,0	1,0 – 2,0	2,0 – 3,0	3,0 – 4,0
Distância média ao projetor (m)	0,25	0,75	1,5	2,5	3,5

Essa simplificação também leva à subestimação da velocidade, já que os grânulos que são lançados afastados do eixo do equipamento percorrem uma distância maior do que os que caem na região central, de maneira que o que se chama *distância média de projeção* na verdade é a distância mínima percorrida pelos grânulos para atingir o centro de uma determinada faixa. Como a maioria dos grânulos cai próxima ao eixo do projetor, essa simplificação será considerada válida neste estudo.

2.5 Estimativa das perdas potenciais, da eficiência e da produtividade do projetor a ar comprimido

2.5.1 Perdas potenciais

A quantidade de argamassa que cai até 0,50 m do projetor (primeira faixa de distância) é lançada com baixa energia e pode servir como uma boa estimativa das *perdas potenciais* do sistema: quanto maior a porcentagem de massa recolhida nessa faixa, menos eficiente é a projeção e maior o desperdício de material e de energia para produção do ar comprimido.

A distância de 0,50 m é maior que a distância de projeção praticada em obra, que varia de 0,15 a 0,30 m. Porém, devido ao spray formado pelo projetor, nem toda a argamassa é lançada ortogonalmente à parede, uma parcela dos grânulos (principalmente aquela recolhida aos 0,50 m) colidirá contra a parede com menor energia e num ângulo de impacto desfavorável, facilitando a reflexão. A Figura 2.10 mostra a altura abaixo do projetor que a argamassa atingiria na parede a diferentes distâncias de projeção. Considerando o projetor posicionado a 1,20 m a partir do chão, a argamassa recolhida nos primeiros 0,50 m (série $D_{média} = 0,25$ m da Figura 2.10) chegaria à parede aproximadamente 0,40 m abaixo da altura do projetor se o mesmo estivesse a 0,15 m de distância da parede e cairia no chão se o projetor estivesse a 0,30 m da parede.

Figura 2.10 – Estimativa da altura de queda da argamassa com relação à distância de projeção para as diferentes faixas de distribuição de massa estudadas.

Os resultados dessa estimativa podem ser bastante significativos, já que os grânulos de argamassa que não colidem ortogonalmente com a parede na formação do spray podem gerar pontos do revestimento onde a energia de lançamento foi menor e assim prejudicar sua aderência.

2.5.2 Eficiência

Os valores de energia específica calculados pelo método do trabalho realizado por uma força 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, sendo desconsideradas as perdas de ar para outras direções quando esse sofre descompressão (por exemplo, vazamento para dentro da argamassa e saída de ar pela parte superior do projetor) e efeitos do atrito interno da argamassa e da mesma com o projetor. Esta estimativa de eficiência, porém, não considera a vazão de ar comprimido que alimenta o projetor, podendo gerar valores altos de eficiência com grande consumo de ar, o que não é desejável do ponto de vista de desperdício da energia fornecida pelo compressor. Assim seria recomendável complementar este indicador com a estimativa da medida da vazão de ar necessária para o lançamento da argamassa.

2.5.3 Produtividade

O tempo para projeção pode ser considerado como parte da estimativa de produtividade do processo, se for levado em consideração que o processo de projeção consiste no enchimento e no posterior esvaziamento do projetor, que corresponde ao *tempo para projeção* medido nos experimentos. Uma equação teórica da produtividade seria (Equação 2.14):

$$t_{\text{processo}} = t_{\text{enchimento}} + t_{\text{esvaziamento}} \quad \text{Equação 2.14}$$

O tempo para enchimento do projetor depende da habilidade do operador e da logística da obra, que inclui aspectos como o movimento necessário para reencher o recipiente, efeitos do abastecimento intermitente de argamassa na frente de trabalho, etc. Já o tempo de esvaziamento é de fácil determinação e depende do sistema de ar comprimido e do volume de argamassa disponível no recipiente, podendo servir como uma boa aproximação da produtividade do processo. Apesar de recipientes com maior volume melhorarem a produtividade por necessitarem de menor número de recargas, eles apresentam uma limitação quanto ao peso excessivo ao serem carregados com argamassa, pois passam a exigir grande esforço físico do operador, principalmente para aplicações acima da linha do ombro.

2.6 Metodologia de ensaio para validação dos modelos desenvolvidos

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 uma argamassa projetada por um equipamento em diferentes valores de pressões de operação. Caso os valores de energia de lançamento medida forem repetitivos e sensíveis à pressão de operação, e os valores médios calculados compatíveis com os encontrados na bibliografia, os modelos serão considerados válidos. Nos experimentos mediu-se o tempo para projeção do projetor e a distribuição da massa projetada nas diferentes faixas de distâncias.

2.6.1 Materiais

Foi estudada uma argamassa industrializada e a quantidade de água utilizada para a produção da argamassa fresca foi fixada em 15% da massa de material seco, estando esse valor dentro do intervalo especificado pelo fabricante.

O ensaio de distribuição de massa foi repetido 3 vezes para cada valor de pressão de operação⁸. Cada mistura de argamassa foi ensaiada nos 4 valores de pressão em sequência, sendo a última projeção realizada aproximadamente 40 min após seu preparo. A massa específica fresca foi determinada no momento de cada projeção.

Os valores de massa específica fresca e teor de ar incorporado estão apresentados na Tabela 2.2. O valor da massa específica anidra da argamassa ensaiada é de 2750 kg/m³.

Tabela 2.2 – Características da argamassa ensaiada.

Repetição	Pressão de Operação		Massa específica fresca (kg/m ³)	Teor de ar incorporado (%)
	psi	N/mm ²		
Argamassa A_1	50	0,35	1631	27,1
	75	0,53	1639	26,8
	100	0,70	1677	25,1
	115	0,81	1695	24,3
Argamassa A_2	50	0,35	1560	30,3
	75	0,53	1574	29,7
	100	0,70	1594	28,8
	115	0,81	1676	25,1
Argamassa A_3	50	0,35	1549	30,8
	75	0,53	1562	30,2
	100	0,70	1591	28,9
	115	0,81	1668	25,5

⁸ Todos os valores de pressão citados no texto são relativos à pressão estática e manométrica.

Para as três misturas de argamassa o teor de ar incorporado diminuiu em função do tempo. A primeira mistura de argamassa apresentou o menor teor de ar incorporado em todas as projeções.

2.6.2 Equipamentos

O compressor de ar utilizado no experimento é da marca SCHULZ, modelo MSV 40 SA/380 – 10 HP – 2 estágios, cuja capacidade de vazão é de 68 m³/h. As pressões mínima e máxima tiveram seus valores regulados para 0,81 e 1,16 N/mm² (115 e 165 psi) respectivamente. O equipamento de projeção utilizado é o modelo Reboq-Jet, da marca Consolid.

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

2.6.3 Procedimento experimental

2.6.3.1 Preparo da argamassa

Para cada mistura um saco de argamassa anidra foi colocado no equipamento misturador e em seguida este foi ligado simultaneamente ao início da colocação da água, a qual foi acrescentada em fluxo constante por aproximadamente 15 s. O equipamento foi mantido em funcionamento durante 180 s, com uma parada na metade do tempo (90 s) para re-incorporação do material anidro ou mal misturado das laterais e do fundo do misturador. Ao final dos 180 s a argamassa foi despejada em um carrinho de mão previamente umedecido com o equipamento ainda em funcionamento para facilitar a operação.

Tomou-se o cuidado de sempre umedecer o misturador antes do preparo da argamassa, visto que, em ensaios realizados em sequência, as outras misturas são preparadas no misturador úmido devido à lavagem.

2.6.3.2 Determinação da massa específica e do teor de ar incorporado

A determinação da massa específica (NBR 13278:2005) foi realizada imediatamente antes de cada projeção.

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

2.6.3.3 Projeção da argamassa

A cada projeção o projetor foi preenchido com argamassa com o auxílio de uma colher de pedreiro e rasado em sua superfície para manutenção da constância de volume em todas as

determinações. O equipamento, conectado a uma linha de ar comprimido com pressão de operação controlada por um regulador de pressão⁹, foi fixado a um metro de altura a partir do solo de forma a realizar o lançamento horizontal da argamassa. A seguir, a passagem do ar comprimido foi liberada e mantida aberta até o esvaziamento do recipiente. O tempo decorrido desde a liberação de ar comprimido até o esvaziamento do projetor 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 (Figura 2.9). Essa região foi recoberta por papel semi-kraft previamente cortado nas dimensões das faixas de distância da Tabela 2.1, para facilitar o recolhimento da argamassa. As faixas de papel foram colocadas sobre lona plástica, para evitar que a umidade do chão as molhasse. Após a projeção as faixas de papel foram imediatamente recolhidas e colocadas em baldes. A massa presente em cada faixa foi então medida como o auxílio de uma balança com precisão de 1 g, descontando-se as massas dos conjuntos papel-balde previamente determinadas. O material (papel e argamassa) foi descartado logo em seguida e novas faixas de papel foram colocadas para a próxima projeção. Esse procedimento foi repetido para cada valor de pressão de operação estudada, sendo esta ajustada no regulador de pressão antes do início de cada ensaio.

Os ensaios foram realizados a céu aberto, não havendo controle do vento incidente durante a projeção. Algumas determinações precisaram ser repetidas por apresentarem valores muito diferentes dos demais. Este foi o caso do artigo intitulado “Energia de lançamento da argamassa na projeção por spray a ar comprimido”, publicado no XI Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído realizado em Florianópolis no ano de 2006. Naquele trabalho, a energia de lançamento de uma argamassa projetada pelo equipamento estudado neste capítulo aumentava com o aumento da pressão até um valor acima do qual passava a diminuir, levando os autores a acreditarem que o aumento excessivo da pressão de operação não trazia benefícios para a energia. Em repetições realizadas posteriormente, notou-se que o vento incidente durante o experimento influenciava a projeção, indicando que houve um erro experimental durante os ensaios que levou ao aumento da energia de lançamento daquela argamassa. O mais indicado é realizar os ensaios em local fechado, já que os grânulos formados pelo spray são pequenos e sofrem grande influência do vento, afetando a

⁹ Equipamento instalado na tubulação de alimentação do projetor a ar comprimido, que mantém a pressão de operação abaixo da pressão mínima fornecida pelo compressor de ar, garantindo a manutenção da mesma.

distribuição da massa projetada em função da distância. Porém, na obra, como o projetor está muito próximo à parede, esse fator talvez não seja tão relevante.

2.7 Resultados obtidos e discussões

2.7.1 Estimativa da energia de lançamento a partir do lançamento horizontal

2.7.1.1 Efeito da pressão na distribuição de massa pela distância

A Figura 2.11 mostra as curvas médias de distribuição de massa, em porcentagem, em função da distância, para cada valor de pressão de operação. As linhas tracejadas correspondem à distribuição discreta e as linhas cheias correspondem à distribuição acumulada para os diferentes valores de pressão estudados.

Figura 2.11 – Distribuição de massa em função da distância.

Nas curvas de massa distribuída nota-se que faixa de 1 a 2 m compreende a região com maior quantidade de massa projetada, exceto para as projeções realizadas com 0,35 N/mm² de pressão. Nas curvas de massa acumulada observa-se que 50% da massa cai antes de 1,5 m de distância do projetor. Observa-se que com o aumento da pressão de operação, a argamassa é projetada a maiores distâncias do projetor.

O aumento na distância de projeção para valores mais altos de pressão indica que a argamassa está sendo projetada com velocidades maiores, ou seja, o aumento da pressão parece levar ao aumento da energia de lançamento.

2.7.1.2 Estimativa da energia de lançamento a partir do lançamento horizontal

A partir da Equação 2.12 e da Equação 2.13, apresentadas anteriormente, calculam-se o tempo de queda dos grânulos de argamassa e para cada distância média as respectivas velocidades de lançamento.

Com os valores de 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 pela Equação 2.2.

Figura 2.12 – Influência da pressão de operação na energia específica de lançamento estimada pelo modelo de lançamento horizontal.

Observa-se no gráfico da Figura 2.12, que a energia específica média aumenta com o aumento da pressão. A variação entre as repetições não é significativa, ou seja, a energia específica de lançamento se mantém constante para uma mesma argamassa projetada diversas vezes a vários valores de pressão. Deve-se considerar, porém, que o aumento da energia pode não ser benéfico se com isso aumentar o rebote e a reflexão da argamassa quando a mesma atinge a base. O valor ótimo de energia é aquele que leva à maior aderência com menor reflexão, tudo isso combinado com o comportamento reológico da argamassa.

Os valores de velocidade de lançamento calculados pelo modelo de lançamento horizontal, em função da altura de queda e da distância média, para cada faixa de distância, variam de 0,56 a 7,87 m/s (primeira e última faixa respectivamente), indicando que a energia de lançamento não é constante: para qualquer valor de pressão de operação há uma variação muito grande de velocidade entre os grânulos projetados. A energia específica aumenta com o aumento da pressão devido ao aumento da quantidade de grânulos mais velozes lançados durante a projeção.

A faixa de velocidade estimada por este método apresenta resultados coerentes, apenas uma ordem de grandeza inferior para o valor máximo, com os medidos por Armelin *et al.* (1996) para concreto projetado, que chegaram a valores de 1,7 a 33 m/s em função do tamanho do grânulo projetado (quanto menor o grânulo maior a velocidade com que é lançado), e com os medidos por Antunes (2005) para lançamento manual (2,5 a 15 m/s).

Os resultados de energia de lançamento média estimados por esse método, que variaram de 1,3 a 7,8 J/kg, também estão coerentes com o valor de energia específica calculado a partir da velocidade média do lançamento manual determinada por Antunes (2005) para um intervalo de 95% de confiança, que é de 18 J/kg.

Portanto, o método fornece valores coerentes. *No entanto o ganho da resistência de aderência obtido quando se usa o projetor a ar comprimido, ao contrário do que comumente se imaginava, provavelmente não se deve ao aumento da energia de lançamento.* O aumento da aderência talvez se deva ao *tamanho dos grânulos que atingem a base* que, por serem muito menores do que a porção de massa lançada na aplicação manual, permitem uma melhor acomodação dos mesmos, diminuindo a quantidade de defeitos na interface, já que durante a projeção pode haver perda do ar incorporado à argamassa devido à formação do spray.

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 da argamassa com o projetor, resistência do ar, perdas de ar e pressão, etc. Uma fonte de erro é a hipótese de que o ângulo de lançamento com o plano horizontal é zero. Isto de fato não ocorre para todos os grânulos, pois o jato de argamassa tem ângulo de abertura com relação à horizontal, que pode variar dependendo da pressão de operação. Este erro que pode tanto levar à subestimação da velocidade quando o ângulo de projeção varia entre $0^\circ < T < 45^\circ$ ¹⁰ acima do horizonte como ao contrário para $T < 0^\circ$ - abaixo do horizonte (Figura 2.13). Outra questão a ser considerada é a real contribuição da componente vertical da velocidade do grânulo no seu adensamento contra a parede. Adicionalmente, é possível que estes dois erros (positivo e negativo) se compensem.

Figura 2.13 – Desenho esquemático do jato de argamassa gerado na saída do projetor.

Em estudo inicial, Fernandes *et al.* (2006) utilizaram a metodologia desenvolvida nesse capítulo para estimar a energia de lançamento de 3 argamassas diferentes projetadas pelo mesmo equipamento. Nesse estudo a pressão de operação foi variada para apenas uma das

¹⁰ Para partículas lançadas em direção oblíqua, o ângulo de 45° é o que proporciona alcance máximo na direção horizontal.

argamassas, não sendo possível concluir se existe influência do comportamento reológico na energia. Especula-se, porém, que essa influência exista.

Como os experimentos deste capítulo foram realizados para apenas uma argamassa, a influência do comportamento reológico será investigada por maior número de experimentos, com diferentes composições de argamassas projetadas por equipamentos de modelos variados, que serão apresentados no Capítulo 3 deste trabalho.

2.7.1.3 Perdas potenciais do sistema

Os valores de perdas potenciais aqui considerados derivam de medida primária capaz de estimar o desperdício de material devido ao projetor – outras perdas podem ocorrer, como por exemplo, derramamento durante o manuseio (Figura 2.14). Eventualmente inclui também uma parcela de argamassa que vai gerar um revestimento cuja aderência pode ser baixa pela diminuição na energia de lançamento. Essa consideração inclui, além de aspectos técnicos, aspectos ambientais, já que quanto maior a quantidade de argamassa que não aderiu à parede durante a projeção, maior o volume de resíduo gerado na execução do revestimento.

Figura 2.14 – Derramamento de argamassa durante manuseio (foto da autora).

A Figura 2.15 apresenta a porcentagem de argamassa recolhida na faixa de 0 a 0,50 m de distância do projetor em função da pressão de operação, indicando a perda teórica do equipamento, visto que a argamassa que cai nessa faixa, mesmo que chegue à parede terá colidido numa direção que não a ortogonal, ou seja, com menor energia.

Figura 2.15 – Perdas potenciais do sistema de projeção a ar comprimido.

Para valores baixos de pressão, quase 40% da massa projetada cai antes de 0,50 m de distância do projetor. Desse total, parte cai no chão e parte atinge a base com baixa energia, podendo gerar pontos falhos no revestimento. Com o aumento da pressão a porcentagem de massa projetada até 0,50 m diminui, caindo para um mínimo de 10%, valor ainda elevado. Esta pode ser uma grande limitação deste tipo de equipamento, se isso se confirmar para outros modelos e argamassas.

2.7.2 Influência da pressão de operação no tempo para projeção

Na Figura 2.16 estão os valores de tempo para projeção em função da pressão de operação.

Figura 2.16 – Influência da pressão de operação no tempo para projeção.

Observa-se que com o aumento da pressão o tempo para projeção diminui, sendo que a partir de aproximadamente 0,60 N/mm² ocorre uma inversão no comportamento do tempo, que aumenta para valores de pressão mais elevados, o que pode diminuir a produtividade. Uma justificativa para esse comportamento seria que, com o aumento da pressão e conseqüente aumento da vazão, o ar inserido abandona o projetor sem arrastar 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.

Para os valores extremos do intervalo de pressão estudado (mínimo e máximo) houve grande variação entre as repetições, o que não ocorreu para os valores intermediários (0,53 e 0,70 N/mm²), sendo esses valores de pressão coerentes com a faixa recomendada pelos fabricantes⁶. Uma possível explicação seria que em baixas pressões a força exercida pelo ar pode não ser suficiente para projetar a argamassa, dificultando sua saída. Nas altas pressões, pode ocorrer o inverso: a vazão do ar é bem maior e o mesmo abandona o projetor sem arrastar a argamassa.

2.7.3 Estimativa da energia de lançamento a partir da vazão e tempo para projeção
Conhecidos o volume do recipiente e a área dos orifícios de saída de argamassa, que para o equipamento estudado correspondem a $3,5 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ e $1,26 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ respectivamente, e o tempo para projeção medido em cada determinação, foi possível calcular a vazão por orifício através da Equação 2.3 e a velocidade de lançamento da argamassa através da Equação 2.4. A influência da pressão de operação na energia específica de lançamento da argamassa, calculada pela Equação 2.2, está apresentada na Figura 2.17.

Figura 2.17 – Influência da pressão de operação na energia específica de lançamento estimada pelo modelo de vazão e tempo para projeção.

A energia específica de lançamento estimada por este método apresenta valores que variam de 0,019 a 0,057 J/kg. Esses valores são três ordens de grandeza inferiores ao valor de energia específica média do lançamento manual (18 J/kg), calculados com base no valor médio de velocidade determinado por Antunes (2005) a partir de medições durante a aplicação do pedreiro. Isso pode ser explicado pelo fato de que durante o esvaziamento do projetor não sai apenas argamassa, mas também o ar comprimido, ou seja, ao contrário do que se admitiu o fluxo de argamassa não é constante. Nota-se que a energia específica de lançamento aumenta com o aumento da pressão até o valor de 0,60 N/mm², a partir do qual passa a diminuir. Esse fato indica que o incremento da pressão, a partir de aproximadamente 0,60 N/mm², parece não

ser eficiente para o aumento da energia estimada por esse modelo para a argamassa e o equipamento estudados, o que não foi observado nos demais métodos.

2.7.4 Estimativa da energia de lançamento a partir do trabalho

Aplicando os resultados de pressão e massa específica à Equação 2.11 obtém-se a velocidade de lançamento, o que permite estimar a energia específica pela Equação 2.2.

Figura 2.18 – Influência da pressão de operação na energia específica de lançamento estimada pelo modelo de trabalho realizado por uma força.

Neste modelo, a energia específica de lançamento da argamassa é função apenas da pressão de operação, que controla a força aplicada no tronco de cone, da geometria do equipamento e da massa específica da argamassa fresca. O aumento da pressão de operação leva ao aumento proporcional da velocidade e da energia de lançamento da argamassa.

Os valores de energia específica calculados por este método, que variam de 5,4 a 12 J/kg, estão coerentes com os valores estimados no modelo de lançamento horizontal e apresentam a mesma ordem de grandeza do valor médio determinado por Antunes (2005) no lançamento manual de argamassa (18 J/kg).

2.7.5 Estimativa da eficiência do processo de projeção

A Figura 2.19 mostra a comparação entre os valores de energia específica estimados pelos métodos do lançamento horizontal e do trabalho e a eficiência do equipamento, obtida pela razão entre tais valores (Equação 2.15).

$$Eficiência = \frac{Energia_{lançamento}}{Energia_{trabalho}} \quad \text{Equação 2.15}$$

Figura 2.19 – Comparação entre os métodos de lançamento horizontal e trabalho e eficiência do equipamento.

Existe coerência entre os modelos de estimativa de energia de lançamento horizontal e trabalho realizado por uma força. Como já discutido, a energia estimada pelo método do trabalho implica no aproveitamento de 100% da energia disponível e pode ser utilizado 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 pode ser observado na Figura 2.19. Desta forma a hipótese de que a energia estimada pelo trabalho é uma boa referência para estimativa da eficiência continua válida. Deve-se considerar, contudo, que a alta eficiência para os valores elevados de pressão pode estar atrelada a um gasto excessivo de ar (e de energia para produzi-lo), o que não é interessante do ponto de vista prático.

Como pode ser visto na Figura 2.19 a eficiência do sistema varia aproximadamente de 25% a 65%, sendo pequena nas baixas pressões, apesar de não ser ruim se comparada à eficiência de um motor a combustão (em torno de 30%).

O controle da pressão é um fator muito relevante no processo, pois se sabe que para pressões mais baixas a argamassa não adere à parede⁶, o que confirma os resultados teóricos aqui obtidos.

A pressão ideal de operação do projetor a ar comprimido certamente irá depender de detalhes geométricos do equipamento tornando necessário o estudo da pressão para cada equipamento em particular, sendo então possível projetar um equipamento com características e geometria que o tornem mais eficiente. Além disso, como já foi discutido, é necessário adequar a energia de lançamento ao comportamento reológico da argamassa projetada, visto que a mesma pode sofrer grande reflexão ao ser aplicada com alta energia se sua natureza for elástica.

2.8 Considerações sobre o capítulo

Dos métodos desenvolvidos neste trabalho para estimativa da energia de lançamento do projetor a ar comprimido o de lançamento horizontal mostrou-se o mais adequado, já que exprime o comportamento real do fenômeno, apesar de apresentar algumas imprecisões devidas às simplificações. As perdas potenciais estimadas pela quantidade de massa projetada até 0,50 m de distância do projetor expressam o comportamento real da argamassa, considerando desperdícios e eventuais falhas na aderência do revestimento. Essas perdas dependem da pressão de operação e podem ser elevadas em baixos valores de pressão. O método do trabalho estima a energia máxima que pode ser desenvolvida pelo sistema, podendo ser então utilizado para estimar a eficiência do equipamento. Já o método da vazão e tempo para projeção mostrou-se inadequado para estimar a energia de lançamento.

A formação do spray pela introdução de ar comprimido gera grânulos que são lançados pelo projetor com velocidades muito diferentes. A faixa de velocidade estimada pelo modelo de lançamento horizontal (0,56 a 7,87 m/s) está coerente com a encontrada por Armelin *et al.* (1996) para concreto projetado (1,7 a 33 m/s). A energia estimada pelos métodos propostos corresponde à média das energias de cada grânulo.

Estima-se que a energia específica média de lançamento do projetor a ar comprimido varia entre 1,3 e 7,8 J/kg, valores esses que são da mesma ordem de grandeza do valor médio de 18 J/kg medido por Antunes (2005) na aplicação manual. Portanto a melhora da aderência comparativamente ao lançamento manual da argamassa provavelmente não pode ser explicada pelo aumento da energia, como se acreditava. Outros fatores, como o tamanho dos grânulos que chegam à base, devem influenciar neste resultado.

A energia de lançamento estimada foi influenciada pela pressão de operação do sistema. Especula-se, porém, se o aumento excessivo de energia prejudica a projeção, causando rebote excessivo da argamassa durante sua aplicação, e se o comportamento reológico da argamassa influencia sua energia de lançamento.

3 Verificação dos fatores que influenciam o processo de projeção de argamassas a ar comprimido

3.1 Introdução

No Capítulo 2 foram apresentadas as metodologias desenvolvidas para estimativa da energia específica de projeção de argamassas a partir da velocidade. Adotou-se, então, o modelo de lançamento horizontal apresentado naquele capítulo como o mais adequado para a estimativa da energia de lançamento. A quantidade de massa projetada até 0,50 m de distância do equipamento permitiu estimar as perdas potenciais do sistema. O tempo para projeção foi tomado como sendo um indicativo da produtividade do processo. Verificou-se a influência da pressão de operação na energia de lançamento da argamassa, nas perdas potenciais, no tempo para projeção e na eficiência do processo para a argamassa e o equipamento estudados. Ficou então pendente investigar a influência da composição da argamassa e, particularmente, seu comportamento reológico, sobre essas variáveis e verificar se equipamentos com diferentes geometrias apresentam comportamentos distintos entre si.

O objetivo deste capítulo é, portanto, estudar a influência das *argamassas* e dos *modelos de equipamento de projeção* operados a diferentes *pressões* na energia de lançamento, no tempo para projeção e nas perdas potenciais do sistema.

3.2 Metodologia experimental

A estimativa da energia de lançamento e das perdas potenciais foi realizada a partir de medidas experimentais de distribuição de massa em função da distância para ponderação da velocidade calculada pelo modelo de lançamento horizontal. Foi medido também o tempo para projeção. A caracterização do comportamento reológico das argamassas será apresentada em detalhes no Capítulo 4.

3.2.1 Arranjo experimental

Os fatores estudados foram (a) argamassa, (b) teor de água, (c) modelo do equipamento de projeção e (d) pressão de operação. O estudo desses fatores foi feito com base no arranjo experimental da Tabela 3.1 e os níveis atribuídos a cada fator foram os seguintes:

- *argamassa*: 4 composições diferentes;
- *teor de água*: 15% e 17% em relação à massa de argamassa anidra¹¹;
- *modelo do projetor a ar comprimido*: 4 modelos diferentes disponíveis no mercado de São Paulo;
- *pressão de operação*: 0,50; 0,63; 0,77 e 0,91 N/mm² (70, 90, 110 e 130 psi, respectivamente) fornecida pelo compressor de ar.

Tabela 3.1 – Arranjo experimental.

Distribuição de massa e tempo para projeção			Argamassa W	Argamassa X	Argamassa Y	Argamassa Z
Teor de água 15%	Equipamento A	Pressão 0,50 N/mm ²	2	...		
		Pressão 0,63 N/mm ²	...			
		Pressão 0,77 N/mm ²				
		Pressão 0,91 N/mm ²				
	Equipamento B	Pressão 0,50 N/mm ²				
		Pressão 0,63 N/mm ²				
		Pressão 0,77 N/mm ²				
		Pressão 0,91 N/mm ²				
	Equipamento C	Pressão 0,50 N/mm ²				
		Pressão 0,63 N/mm ²				
		Pressão 0,77 N/mm ²				
		Pressão 0,91 N/mm ²				
	Equipamento D	Pressão 0,50 N/mm ²				
		Pressão 0,63 N/mm ²				
		Pressão 0,77 N/mm ²				
		Pressão 0,91 N/mm ²				
Teor de água 17%	Equipamento A	Pressão 0,50 N/mm ²				
		Pressão 0,63 N/mm ²				
		Pressão 0,77 N/mm ²				
		Pressão 0,91 N/mm ²				
	Equipamento B	Pressão 0,50 N/mm ²				
		Pressão 0,63 N/mm ²				
		Pressão 0,77 N/mm ²				
		Pressão 0,91 N/mm ²				
	Equipamento C	Pressão 0,50 N/mm ²				
		Pressão 0,63 N/mm ²				
		Pressão 0,77 N/mm ²				
		Pressão 0,91 N/mm ²				
	Equipamento D	Pressão 0,50 N/mm ²				
		Pressão 0,63 N/mm ²				
		Pressão 0,77 N/mm ²				
		Pressão 0,91 N/mm ²				

Para cada combinação foram feitas duas determinações: uma com um compressor de 34 m³/h de capacidade de vazão e outra com um compressor de 68 m³/h. Como o aumento da

¹¹ A combinação entre as diferentes composições de argamassa e a variação do teor de água tem como objetivo gerar materiais com comportamentos reológicos distintos.

capacidade de vazão do compressor de ar não influenciou significativamente o tempo para projeção e a energia de lançamento, apresentando pequena influência apenas nas perdas potenciais do sistema, optou-se por realizar as repetições dos experimentos apresentados na sequência com os dois compressores.

3.2.2 Materiais

A Tabela 3.2 apresenta as características das argamassas ensaiadas. Os valores de massa específica fresca referem-se à média de três determinações feitas logo após o preparo de cada mistura e a massa específica da argamassa anidra foi determinada no picnômetro de hélio.

Tabela 3.2 – Características das argamassas ensaiadas.

Argamassa	Teor de água (%)	Massa específica (kg/m ³)		Teor de ar incorporado (%)
		Anidra	Fresca	
W	15	2718	1719	23
	17		1728	21
X	15	2800	2208	2,6
	17		2209	0,5
Y	15	2750	1623	28
	17		1715	22
Z	15	2792	1778	21
	17		1892	15

3.2.3 Equipamentos

3.2.3.1 Compressores de ar

Foram utilizados dois compressores de ar com capacidades de vazão de 34 m³/h (20 cfm) e 68 m³/h (40 cfm), da marca ANVI, modelos CSL 20 BR/200 L – 5 HP – 2 estágios e CSL 40 BR/250 L – 10 HP – 2 estágios. As pressões mínima e máxima tiveram seus valores regulados em 0,98 e 1,19 N/mm² (140 e 170 psi) respectivamente em ambos os compressores.

3.2.3.2 Projetores de argamassa

Dos quatro modelos de equipamentos de projeção utilizados nessa etapa, um é idêntico ao utilizado no programa experimental do Capítulo 2 (equipamento A) e os outros três são semelhantes no funcionamento, diferindo na geometria, no volume e no material que compõe o recipiente para colocação da argamassa e no mecanismo de liberação do ar comprimido. A Figura 3.1 apresenta os equipamentos utilizados neste trabalho, que são os mais comumente encontrados no mercado de São Paulo, e a Figura 3.2 apresenta esquematicamente suas respectivas geometrias.

Figura 3.1 – Equipamentos de projeção a ar comprimido estudados.

Figura 3.2 – Geometria dos equipamentos de projeção a ar comprimido (desenho sem escala).

O volume do recipiente de projeção do equipamento A é de 3,5 l e dos outros três é de 3,8 l. Os equipamentos C e D possuem a mesma geometria e em ambos o recipiente para colocação da argamassa é de material plástico. A diferença entre eles está no tipo de mecanismo para liberação da passagem do ar comprimido. Enquanto no equipamento D há um gatilho composto por uma alavanca que libera a passagem do ar quando pressionada, assim como nos equipamentos A e B (Figura 3.3 a), no equipamento C a liberação do ar é dada pela abertura de uma válvula do tipo esfera (Figura 3.3 b). Esse mecanismo sofre maior influência da habilidade do operador, pois se a válvula não for completamente aberta, a quantidade de ar que passa pelo projetor é reduzida, podendo prejudicar o lançamento da argamassa.

Figura 3.3 – Mecanismos de liberação do ar comprimido: (a) gatilho e (b) válvula de esfera.

3.2.4 Procedimento experimental

3.2.4.1 Preparo das argamassas

O procedimento de preparo das argamassas foi realizado da mesma forma que o apresentado no item 2.6.3.1 deste trabalho. Todas as argamassas ensaiadas foram preparadas em um misturador de eixo horizontal da marca Consolid, modelo MH-100, 380 V, 1,1 kW, com redutor 1/40.

3.2.4.2 Determinação da massa específica e do teor de ar incorporado

A determinação da massa específica e do teor de ar se deu igualmente à realizada no item 2.6.3.2.

3.2.4.3 Projeção das argamassas

O procedimento de projeção das argamassas utilizado nesse experimento é similar ao apresentado no item 2.6.3.3 deste trabalho.

O compressor de ar foi regulado para a pressão de operação desejada (0,50; 0,63; 0,77 ou 0,91 N/mm²) e um dos equipamentos de projeção estudados conectado ao mangote de transporte do ar comprimido. A determinação da distribuição de massa e do tempo para projeção se deu da mesma forma que a apresentada no item 2.6.3.3. Quando todos os equipamentos de projeção já haviam sido testados a um dos valores de pressão de operação em estudo, o compressor tinha sua pressão regulada para o próximo valor a ser estudado e o procedimento era repetido.

Misturou-se sempre um saco de argamassa por vez para medição da distribuição de massa. O tempo máximo entre a mistura e a última determinação era de aproximadamente 40 minutos.

3.3 Resultados obtidos e discussões

3.3.1 Estimativa da produtividade do processo de projeção

3.3.1.1 Tempo para projeção

A Figura 3.4 apresenta de maneira simplificada a influência de cada fator estudado sobre o tempo para projeção através das médias de todas as determinações.

Figura 3.4 – Efeito dos fatores estudados nos valores médios de tempo para projeção.

De forma geral, *todos os fatores estudados* (a composição da argamassa, o teor de água, o modelo do equipamento e a pressão de operação) exerceram influência sobre o tempo médio para projeção das argamassas estudadas, o que foi comprovado pela análise de variâncias (ANOVA) apresentada no Anexo A.

As argamassas X e W são as que oferecem menor produtividade, pois levam mais tempo para abandonar o projetor. A argamassa Z, apesar de apresentar um tempo médio para projeção baixo, apresenta também grande variação. A argamassa Y é a que apresenta o menor tempo médio para projeção e a menor variação entre as combinações de equipamentos e pressão, o que é interessante do ponto de vista prático, já que oferecerá a maior produtividade e será pouco sensível a mudanças de geometria no equipamento.

O aumento do teor de água, além de reduzir o tempo médio para projeção em 22%, reduz também sua variação, que passou de 35% para 19%.

O equipamento A, que possui o menor volume de reservatório de argamassa (3,5 l), é o que apresenta o maior tempo médio para projeção e a maior sensibilidade à variação de pressão e de argamassa (38%). Já os equipamentos B, C e D além de proporcionarem tempos médios inferiores, são menos sensíveis às variáveis do processo (em torno de 23%). Do ponto de vista

prático, considerando apenas o tempo para projeção, os três últimos equipamentos seriam os mais indicados para utilização em obra, já que podem aumentar a produtividade com menor variação entre as combinações.

A pressão de operação, de uma forma geral, exerce pouca influência no tempo médio para projeção do experimento. A análise de variâncias (ANOVA) realizada para cada equipamento em particular mostra que apenas o equipamento A sofre influência significativa da pressão de operação nesta variável, mas o ganho é modesto. Sendo assim, a idéia intuitiva de que o aumento da pressão levaria ao aumento da produtividade pela redução do tempo de esvaziamento do projetor é, de forma geral, equivocada e pode levar ao aumento do consumo de energia para produção de ar comprimido sem ganho de produtividade, principalmente para os equipamentos B, C e D.

O tempo para projeção, que é de fácil determinação, pode servir como um dos critérios para especificação do conjunto argamassa-projetor, sendo que argamassas que levam menos tempo para esvaziar um determinado modelo de projetor a um valor adequado de pressão de operação, são as que podem aumentar a produtividade do processo. Tudo isso sem perder de vista o gasto excessivo de ar em pressões elevadas.

3.3.1.2 Interação entre os fatores que influenciam o tempo para projeção

A Figura 3.5 apresenta de forma simplificada a interação entre os fatores que exerceram maior influência no tempo para projeção das argamassas.

O grau de interação entre as variáveis é pequeno. Observa-se, no entanto, que a argamassa Y não mostrou sensibilidade ao aumento do teor de água quanto ao tempo para projeção, ao contrário das outras composições estudadas. O equipamento A foi mais sensível ao aumento do teor de água e à composição da argamassa. Por esta razão, convém analisar sempre a combinação argamassa versus equipamento.

Figura 3.5 – Interação entre os fatores que influenciam o tempo para projeção das argamassas.

3.3.2 Estimativa da energia de lançamento a partir do lançamento horizontal

3.3.2.1 Distribuição de massa pela distância e estimativa de energia de lançamento

A Figura 3.6 apresenta as curvas médias dos resultados de distribuição de massa em função da distância para todas as argamassas preparadas com 15% de água, projetadas pelo equipamento A. As outras configurações de equipamento apresentaram comportamentos semelhantes. Os resultados de todos os ensaios de distribuição de massa estão apresentados no Anexo A.

Figura 3.6 – Distribuição de massa das argamassas com 15% de água, projetadas pelo equipamento A.

A Figura 3.7 apresenta a estimativa da energia específica média de lançamento de todas as argamassas estudadas para cada modelo de projetor em função da pressão de operação.

Figura 3.7 – Energia específica média de lançamento de todas as argamassas para cada equipamento.

Nota-se a existência de certa influência da composição das argamassas sobre a energia de lançamento média para todos os modelos de equipamento de projeção. Observa-se, porém, que o equipamento A parece ser o menos sensível à composição da argamassa.

Os valores médios de energia para todas as combinações variaram entre 2,11 e 15,7 J/kg, valores esses coerentes com o valor médio medido por Antunes (2005) para a aplicação manual (18 J/kg). A faixa de velocidade estimada variou de 0,56 a 7,87 m/s, apresentando coerência com os valores encontrados por Armelin *et al.* (1996) para concreto projetado, que variaram de 1,7 a 33 m/s.

Em geral, a energia específica média aumenta com o aumento da pressão de operação até um determinado valor de pressão (em torno de 0,70 N/mm²) a partir do qual pode haver uma leve redução, manutenção ou aumento menos significativo da energia dependendo da configuração do equipamento. Esse valor de pressão está dentro da faixa de operação recomendada pelos fabricantes dos equipamentos de projeção, que varia de 0,63 a 0,77 N/mm². Se a energia de lançamento da argamassa se mantém constante ou diminui a partir de certa pressão, a projeção acima de tal valor se torna inviável, já que passa a haver gasto excessivo de ar sem qualquer ganho na energia.

Os projetores B e D apresentam maior energia de lançamento em quase todas as faixas de pressão, enquanto o equipamento A é o que gera os menores valores. O equipamento C apresenta comportamento um pouco diferente dos outros para as argamassas preparadas com 15% de água. Isso pode ser atribuído ao tipo de mecanismo de liberação do ar comprimido, que por ser susceptível à habilidade do operador, dificulta a passagem do ar se não for completamente aberto, afetando conseqüentemente a energia de lançamento da argamassa, o que pode vir a inviabilizar sua utilização em obras.

3.3.2.2 Estudo dos fatores que influenciam a energia de lançamento

A Figura 3.8 apresenta o efeito dos fatores estudados nos valores médios de energia de lançamento. Essa simplificação permite analisar de forma geral o comportamento da energia de lançamento em função de cada fator.

Figura 3.8 – Efeito dos fatores estudados nos valores médios de energia de lançamento.

A composição da argamassa exerceu pouca influência sobre a energia de lançamento, comportamento este diferente do observado no tempo de projeção. O teor de água pouco influenciou a energia média e também não diminuiu sua variação como no tempo para projeção.

O modelo de equipamento apresentou grande influência na energia. A energia média de lançamento proporcionada pelo equipamento A é praticamente metade da fornecida pelos demais equipamentos. Isso pode ser explicado pela variação na geometria (dimensão dos orifícios de entrada de ar e de saída de argamassa, distância entre esses orifícios, etc.). O equipamento C, apesar de apresentar a mesma geometria e ser composto do mesmo material do equipamento D, proporciona energia média de lançamento inferior, o que pode estar relacionado à deficiência do mecanismo de liberação do ar comprimido, como já discutido.

A pressão de operação também influenciou a energia de uma forma geral: maior pressão (e conseqüentemente maior vazão de ar), maior energia. Porém o ganho de energia não é diretamente proporcional ao aumento da pressão de operação, sendo que o ganho é inferior para pressões maiores. Esta observação é consistente com a de Armelin *et al.* (1999) quanto ao aumento da vazão de projeção. Isto indica que o aumento excessivo da pressão pode causar desperdício de ar sem aumento significativo da energia de lançamento da argamassa.

A análise de variâncias (ANOVA) realizada comprova que o único fator estudado que não exerceu influência na energia de lançamento das argamassas foi o *teor de água*, confirmando a especulação feita a partir da análise dos gráficos da Figura 3.8.

3.3.2.3 Interação entre os fatores que influenciam a energia de lançamento

A interação entre os fatores analisados foi pequena. A Figura 3.9 mostra os fatores mais relevantes.

Figura 3.9 – Interação entre os fatores que influenciam a energia de lançamento das argamassas.

Pode-se observar claramente, que o aumento de pressão provocou um aumento médio da energia de lançamento em torno de 4 J/kg para todas as argamassas estudadas. Isto sugere que o ganho de energia devido ao aumento da pressão independe da argamassa. A argamassa Z apresenta os menores valores médios de energia em todas as pressões estudadas, enquanto a argamassa W apresenta os maiores. Todos os equipamentos se mostraram sensíveis à composição da argamassa. Mas para um mesmo equipamento a magnitude desta influência é pequena se comparada à diferença entre os equipamentos, embora seja um pouco maior para o equipamento B.

3.3.3 Estimativa das perdas potenciais do sistema

3.3.3.1 Quantidade de massa projetada até 0,50 m

A Figura 3.10 apresenta as perdas potenciais médias do sistema estimadas pela quantidade de massa projetada até 0,50 m de distância do projetor para as argamassas estudadas.

Figura 3.10 – Perdas potenciais médias dos equipamentos para as argamassas estudadas.

Observa-se uma grande dispersão nos valores de perda potencial, que podem chegar até a 25% quando o equipamento A projeta argamassas contendo 15% de água operando a baixa pressão (0,50 N/mm²). Portanto a combinação inadequada entre equipamento, argamassa e pressão pode resultar em perdas muito elevadas, com impactos financeiros e ambientais.

A Figura 3.11 apresenta os valores médios de perdas potenciais em função dos fatores estudados. A composição da argamassa, ao contrário do que se esperava, não exerceu influência significativa sobre as perdas potenciais médias do sistema, que se mantiveram em torno de 5%. No entanto a argamassa Z apresentou maior dispersão de resultados. O aumento do teor de água, por sua vez, exerceu grande influência, reduzindo em 43% as perdas potenciais médias. Argamassas com 15% de água apresentaram maior dispersão de resultados. Assim, o controle do teor de água é crítico para o processo.

Figura 3.11 – Valores médios de quantidade de massa projetada até 0,50 m em função dos fatores estudados.

O equipamento A apresenta perdas potenciais médias até 100% superiores às dos outros equipamentos, aumentando o desperdício de material e podendo trazer prejuízos à aderência do revestimento produzido, como discutido no Capítulo 2. No entanto, com a seleção correta de argamassa, teor de água e pressão de operação este equipamento pode operar com perdas similares às dos demais. Os outros equipamentos apresentam valores médios de perdas potenciais bastante próximos e abaixo de 5%. Observa-se que uma boa combinação entre pressão de operação, equipamento, argamassa e teor de água controlado permite perdas potenciais de projeção abaixo de 2%.

A pressão de operação, de uma forma geral, não influenciou significativamente as perdas potenciais médias. A partir de 0,77 N/mm² as perdas médias não são reduzidas com o aumento da pressão, levando ao gasto excessivo de ar sem diminuir o desperdício de material.

A análise de variâncias (ANOVA) confirma o que havia sido observado nos gráficos da Figura 3.11: a *composição da argamassa* é o único fator que não exerce influência sobre as perdas potenciais do sistema. A análise de variâncias (ANOVA) para cada equipamento indica que apenas o equipamento A sofre influência da pressão, ou seja, o aumento excessivo da pressão para os outros três equipamentos leva ao desperdício de ar.

3.3.3.2 Interação entre os fatores que influenciam as perdas potenciais

A Figura 3.12 apresenta a interação entre os fatores que influenciaram as perdas potenciais do sistema.

Figura 3.12 – Interação entre os fatores que influenciam as perdas potenciais do processo de projeção.

O aumento do teor de água reduziu significativamente as perdas potenciais para todas as composições de argamassa, sendo a argamassa X a que apresentou a maior redução. As composições de argamassa também foram sensíveis à pressão de operação, apresentando redução das perdas com o aumento da pressão. Nesse caso, a argamassa Z foi a mais sensível, reduzindo as perdas potenciais em 50%. O teor de água também sofreu influência da pressão: quanto maior o valor da pressão de operação, menores as perdas potenciais para o mesmo teor de água, chegando a uma redução de até 50%. Os equipamentos mais sensíveis à composição

da argamassa foram o A e o B, apresentando variação em seu comportamento para as diferentes argamassas. Os equipamentos também apresentaram sensibilidade à variação do teor de água, sendo o equipamento A o mais sensível.

3.3.4 Inter-relação das variáveis estudadas

O gráfico da Figura 3.13 apresenta a relação entre a energia específica de lançamento e o tempo para projeção para todas as combinações.

Figura 3.13 – Energia específica de lançamento x Tempo para projeção.

O tempo para projeção não está significativamente correlacionado com a energia específica. Isto significa que é possível obter elevada energia específica com tempo para projeção longo e vice-versa. Portanto, o tempo para projeção não é um bom estimador da energia.

A Figura 3.14 mostra a correlação entre as perdas potenciais do sistema e o tempo para projeção. Observa-se que de forma geral uma diminuição do tempo para projeção significa uma redução das perdas. No entanto o coeficiente de correlação é relativamente baixo: a variação do tempo para projeção explica apenas 42% da variação das perdas.

Figura 3.14 – Perdas potenciais x Tempo para projeção.

É interessante observar que as combinações mais produtivas, ou seja, as que levam menos tempo para esvaziar o recipiente de projeção (entre 5 e 8 s), são aquelas que apresentam as

menores perdas potenciais (< 5%). As combinações menos produtivas, por sua vez, são aquelas que apresentam também as maiores perdas potenciais.

A Figura 3.15 mostra a correlação entre as perdas potenciais e a energia específica de lançamento.

Figura 3.15 – Perdas potenciais x Energia específica de lançamento.

Como era esperado, o aumento da energia específica de lançamento reduz as perdas potenciais do sistema, já que a energia é estimada a partir da distribuição de massas durante a projeção. Porém para o mesmo valor de energia há uma grande variação de massa recolhida até 0,50 m, indicando que algumas combinações de argamassa-água-pressão-equipamento, apesar de gerarem a mesma energia, apresentam perdas potenciais maiores que outras, chegando a uma diferença de até 4 vezes. No entanto, para valores de energia de lançamento maiores que aproximadamente 11 J/kg, as perdas potenciais não ultrapassam 5%. Já para energias baixas (menores que 7 J/kg), as perdas potenciais variam bastante e podem chegar a valores elevados de até 25%.

3.4 Considerações sobre o capítulo

A argamassa influenciou significativamente o tempo para projeção e a energia. No entanto não exerceu influência significativa nas perdas potenciais do sistema.

O teor de água influenciou decisivamente o tempo para projeção e as perdas. Parece, portanto, ser um fator crítico de controle em obra.

Observou-se também uma grande diferença entre o equipamento A e os demais. Embora com a correta combinação de argamassa, água e pressão de operação este equipamento possa operar com perdas baixas, sua energia de lançamento é cerca da metade da proporcionada pelos demais equipamentos, que apresentaram comportamento bastante similar entre si. Esta diferença está provavelmente relacionada à geometria do equipamento.

Observou-se a existência de um valor de pressão de operação a partir do qual não há aumento da energia de lançamento da argamassa, nem melhoras quanto à produtividade ou redução das perdas potenciais, e esse valor encontra-se dentro da faixa de pressão de operação recomendada pelos fabricantes dos equipamentos. Alguns equipamentos apresentam esse valor “ótimo” de pressão de maneira mais evidente do que outros.

4 Caracterização do comportamento reológico das argamassas e seu efeito no sistema de projeção a ar comprimido

4.1 Introdução

No Capítulo 3 verificou-se que a composição da argamassa exerce influência na energia de lançamento e no tempo para projeção em todos os modelos de equipamento estudados e que o aumento do teor de água aumenta a produtividade e reduz as perdas potenciais do sistema. Não foram, porém, discutidas quais as causas da influência destas variáveis no processo de projeção. Neste capítulo é discutida a influência das características físicas e reológicas das argamassas e os mecanismos que influenciam a energia de lançamento, o tempo para projeção e as perdas potenciais do sistema em estudo.

O objetivo deste capítulo é estudar a influência do comportamento reológico e de outras propriedades das argamassas no desempenho dos sistemas de projeção a ar comprimido.

Não faz parte do escopo deste trabalho, no entanto, estudar a influência da composição das argamassas (distribuição granulométrica, proporção volumétrica dos componentes, etc.) no seu comportamento reológico. Tais parâmetros, contudo, poderão servir de complemento para justificar o comportamento das argamassas quanto à sua energia de lançamento, quanto ao tempo que levam para esvaziar o projetor e quanto às perdas potenciais do sistema de projeção.

4.2 Revisão bibliográfica

4.2.1 Conceitos de reologia

Reologia é a ciência que estuda as deformações e fluxos da matéria quando submetida a uma determinada tensão ou solicitação mecânica externa (WATANABE *et al.*, 1989) e seu estudo contribui para o entendimento do comportamento de materiais sob fluxo, sendo muito utilizada na elucidação de sistemas coloidais e poliméricos. Os principais parâmetros para estudo da reologia são: tensão, cisalhamento, taxa de cisalhamento e tempo (BANFILL, 2005).

São basicamente duas as grandezas que determinam o comportamento reológico dos materiais: a *viscosidade* e a *tensão de escoamento*. Viscosidade é a constante de proporcionalidade que relaciona a tensão de cisalhamento com a taxa de cisalhamento aplicada ao material. A viscosidade é uma expressão da resistência de um fluido ao escoamento; sendo assim, quanto maior a viscosidade, mais difícil é o seu escoamento. Já a tensão de escoamento é a tensão mínima que precisa ser aplicada a um sistema para que ele comece a fluir. Esta propriedade é consequência da existência de ligações entre partículas devido às forças de interação, que podem ser quebradas por cisalhamento do material.

Diversos fatores podem influenciar a viscosidade e a tensão de escoamento de uma suspensão e para Pileggi (2001) os principais são:

- Concentração volumétrica: quanto maior a concentração de sólidos em suspensão em um determinado material, mais difícil é o escoamento;
- Características físicas das partículas: densidade, formato, tamanho, distribuição granulométrica, rugosidade superficial, área superficial específica, etc.;
- Características do meio líquido: densidade, viscosidade, etc.;
- Tipo de interação entre as partículas: as forças atrativas que causam a aglomeração das partículas podem influenciar essas propriedades; e
- Temperatura.

O comportamento reológico dos materiais pode ser expresso em curvas que relacionam a *tensão de cisalhamento* com a *taxa de cisalhamento*, que é a forma de apresentação mais comum, ou em curvas de variação da *viscosidade* em função da *taxa de cisalhamento* ou do *tempo*.

4.2.2 Importância da reologia na projeção de argamassas

A argamassa em seu estado fresco pode ser considerada como uma suspensão bifásica (Figura 4.1), sendo uma das fases constituída de partículas grossas (agregados) imersas em uma matriz de partículas finas, composta por água, cimento, material inerte, ar incorporado, etc. (HU *et al.*, 1995).

Figura 4.1 – Constituição da argamassa no estado fresco.

Por se tratar de um material de base cimentícia, sofre endurecimento ao longo do tempo devido à hidratação do cimento. Sendo assim, seu comportamento reológico no estado fresco, que compreende desde a etapa de mistura até o acabamento final do revestimento, é de grande importância tanto para a eficiência de sua aplicação, garantindo adequado recobrimento da superfície, quanto para o desempenho do revestimento endurecido.

Para Kim *et al.* (2004) o comportamento de uma argamassa de projeção no estado fresco é tão importante quanto sua resistência mecânica no estado endurecido. Para Austin *et al.* (1999) as propriedades da argamassa no estado endurecido serão prejudicadas se o comportamento reológico da mesma não permitir sua adequada aplicação. As propriedades no estado fresco da argamassa (ou concreto) projetada, tais como rebote¹² e aplicabilidade¹³, são influenciadas pelas características físicas dos componentes da mistura, enquanto as propriedades no estado endurecido sofrem influência tanto das características físicas quanto das características químicas dos materiais que a compõem (BINDIGANAVILE; BANTHIA, 2001).

Para John (2003), uma das propriedades influenciadas pelo comportamento reológico da argamassa é a aderência, já que a eliminação do ar incorporado da camada de revestimento e da interface revestimento-base depende das deformações visco-plásticas que a argamassa sofre ao atingir a parede com a energia com a qual foi lançada, fato esse comprovado por Antunes (2005). No entanto, argamassas que tiverem seu comportamento reológico modificado pelo acréscimo de água para se tornarem mais fluidas e facilitarem a eliminação do ar aprisionado na interface argamassa-base para o mesmo nível de energia aplicado no lançamento, quando endurecidas podem apresentar um excesso de poros pela evaporação da água de amassamento, reduzindo a resistência mecânica do revestimento.

¹² Entende-se como rebote a porção de argamassa que não aderiu ao substrato logo após seu lançamento, sofrendo reflexão (PFEUFFER; KUSTERLE, 2001).

¹³ O termo aplicabilidade será considerado neste trabalho como a capacidade da argamassa, ao ser projetada, manter-se fixa ao substrato, sem apresentar rebote excessivo ou escorrimento.

Austin e Robins (1999) estudaram diversas formulações de argamassas aplicadas por projeção mecânica através de bombas convencionais quanto ao comportamento no estado fresco (produtividade, rebote, espessura máxima da camada aplicada) e quanto ao comportamento mecânico no estado endurecido. Estes autores demonstraram que argamassas de projeção necessitam ter formulação diferente das convencionais para projeção manual.

Deve-se levar em consideração que o comportamento reológico apresentado pela argamassa após sua projeção pode ser diferente do seu comportamento antes da aplicação, já que durante a projeção acredita-se que haja perda de água e do ar incorporado pela formação do spray, o que modifica a composição e a viscosidade da pasta. Portanto, o material que chega à base pode ser diferente do que estava dentro do projetor. Sendo assim, argamassas de mesma composição apresentarão arranjos internos diferentes depois de aplicadas devido à solicitação a que foram submetidas dependendo do tipo de aplicação (manual ou mecânica) (BANTHIA *et al*, 1999 apud AUSTIN *et al*, 2000). É importante salientar que a argamassa ao ser projetada é solicitada a uma taxa de cisalhamento muito superior à que é solicitada quando já aplicada no substrato e sofre desaceleração brusca ao atingir a base.

4.2.2.1 Características das argamassas de projeção

Na aplicação manual, grandes porções de argamassa (Antunes (2005), por exemplo, mediu 850 g de argamassa em uma colher de pedreiro típica) são lançadas contra a base com o auxílio de uma colher de pedreiro (Figura 4.2 a). Na projeção mecânica por bombas de projeção convencionais a argamassa fresca é bombeada através de uma tubulação e lançada contra o substrato pela injeção de ar comprimido no bico projetor. Já na aplicação por projeção a ar comprimido, a argamassa também é lançada contra a base na forma de um spray gerado pela introdução de ar no equipamento projetor (Figura 4.2 b), porém a mesma é inserida fresca diretamente no recipiente de projeção, não passando pela etapa de bombeamento.

Figura 4.2 – Aplicação de argamassas de revestimento por (a) projeção manual e (b) projeção por spray a ar comprimido.

As características dos grânulos (tamanho, comportamento elástico ou plástico, etc.) formados no spray são muito importantes para garantia do desempenho da projeção das argamassas por ar comprimido. Não foi encontrada literatura sobre projeção de argamassas e, portanto, a discussão a seguir é feita por analogia ao concreto projetado. Para Marques *et al.* (2004) a adequada formação do spray depende dos seguintes fatores:

- Comportamento reológico do material e composição da matriz;
- Equipamento: tipo de bocal de projeção, bomba e tubulação; e
- Procedimentos operacionais: direção de projeção, pressão do ar comprimido, ângulo de abertura do jato de spray.

Quanto maior a viscosidade do material, maior o tamanho dos grânulos obtidos pela introdução de ar comprimido para formação do spray, já que é mais difícil separar (pulverizar) o material devido à alta viscosidade (CARMI; GHASSEMZADEH, 1981; MENDES; GOMES, 2003; RIBEIRO *et al.*, 2005). **Com isso, quanto mais viscoso o material, menos eficiente é o spray formado, ou seja, maior o tamanho dos grânulos formados e menor a velocidade de projeção.**

Na projeção mecânica das argamassas, o ar comprimido deve ser inserido em quantidade (vazão e pressão) suficiente para separar a massa em pequenos grânulos e formar o spray. É desejável que este spray apresente um ângulo de abertura pequeno, para que os grânulos sejam projetados o mais próximo possível da direção ortogonal (BRIDGER, 2006). Para Ribeiro *et al.* (2005) quanto menor a pressão do ar (P) aplicada em orifícios de mesma área, maior o ângulo de abertura (α) do spray e menor o alcance (L), ou seja, menor a velocidade com que os grânulos são lançados (Figura 4.3). **Sendo assim, quanto maior a pressão (ou vazão) do ar injetado, mais eficiente é o spray formado, ou seja, menor o tamanho dos grânulos lançados.**

Figura 4.3 – Influência da pressão aplicada pelo ar comprimido no ângulo de abertura e no alcance do spray formado na projeção (RIBEIRO *et al.*, 2005).

Além disso, quanto maior a área do orifício de projeção do material, maiores os tamanhos dos grânulos formados no spray (SILVA *et al.*, 2002; RIBEIRO *et al.*, 2005) e, com isso, menor a

velocidade dos mesmos (ARMELIN *et al.*, 1999). **Assim, quanto menor a área do orifício de projeção, mais eficiente é o spray.** Porém a dimensão dessa área deve ser adequada ao tamanho dos grânulos do material a ser projetado para que não prejudique a projeção, evitando entupimento ou efeito de parede.

Um dos problemas em projeção é a reflexão de grânulos, que causa perdas. Portanto, a projeção de grânulos grandes não é interessante para a aplicação em questão, já que quanto maior o grânulo, menor a velocidade de lançamento e com isso maior o coeficiente de restituição, ou seja, menor a dissipação de energia cinética por deformação plástica do grânulo quando o mesmo atinge o substrato, aumentando a reflexão e o rebote (ARMELIN; BANTHIA, 1998; FU *et al.*, 2004).

Armelin *et al.* (1996) ao medir a velocidade de lançamento dos grânulos de concreto projetado por via seca perceberam que quanto maior o tamanho dos mesmos, menor a velocidade com que são lançados durante a projeção e, conseqüentemente maior o rebote.

Em seu trabalho, Bindiganavile e Banthia (2001) utilizaram sílica ativa, cinza volante, metacaulim de alta reatividade e carbono preto em substituição ao cimento em concretos projetados e concluíram que quanto mais fina a adição, menor é o rebote. Estas adições certamente alteraram o comportamento reológico do material.

Sendo assim, a formação do spray com grânulos pequenos e características reológicas adequadas é essencial para o desempenho da argamassa aplicada por projeção a ar comprimido. A formulação da argamassa deve oferecer comportamento mecânico adequado, apresentar rebote e desperdício mínimos durante a projeção e recobrir adequadamente a superfície de forma a diminuir os defeitos na interface.

Tomando como base esses parâmetros e levando em consideração todo o processo de aplicação por projeção a ar comprimido, para que a argamassa tenha desempenho adequado no equipamento em estudo é necessário que a mesma apresente as seguintes características:

- Não escorrer pelos orifícios do projetor antes da injeção do ar comprimido;
- Ser projetada com facilidade e sem entupimento dos orifícios;
- Formar um spray eficiente, onde não haja projeção de grânulos grandes;
- Não apresentar segregação dos agregados quando em repouso antes da projeção;
- Não permitir a separação entre a pasta (suspensão finos + água) e os agregados (sólidos) durante a formação do spray;

- Garantir adesão inicial à base;
- Não escorrer na parede após sua aplicação; e
- Não causar reflexão/rebote ao atingir a base.

4.2.2.2 Propriedades reológicas das argamassas para projeção a ar comprimido

Cada uma das características apresentadas anteriormente está relacionada a uma propriedade reológica da argamassa que pode ser obtida a partir da formulação adequada de sua composição. Como o foco do trabalho se concentra na estimativa da energia de lançamento, as considerações e discussões feitas a seguir estão relacionadas ao comportamento das argamassas apenas durante a etapa de lançamento através do projetor a ar comprimido.

➤ Tensão de escoamento

A tensão de escoamento da argamassa, que é a tensão mínima necessária para que a mesma comece a fluir, deve ser tal que suporte o peso próprio da camada aplicada no substrato, evitando que ela escorra na base depois de aplicada (PFEUFFER; KUSTERLE, 2001). Porém, para o projetor em estudo, a argamassa deve fluir sob ação de seu próprio peso dentro do recipiente de projeção para que nova porção de argamassa ocupe a região onde instantes antes havia a argamassa já projetada (Figura 4.4).

Figura 4.4 – Projeção de argamassa: (a) equipamento cheio antes da projeção, (b) projeção da argamassa formando espaço vazio e (c) preenchimento do espaço vazio por ação do peso próprio (desenhos esquemáticos e sem escala).

Sendo assim, a tensão de escoamento deve ter magnitude superior à da tensão gerada pelo peso próprio de uma camada com espessura desejada de aplicação, que no caso de argamassas de revestimento é de aproximadamente 3 cm. Já dentro do projetor, a altura da coluna de argamassa deve ser suficiente para gerar uma tensão superior à tensão de escoamento, permitindo que a mesma ocupe o espaço vazio da camada projetada. Além disso, a forma de tronco de pirâmide do recipiente do projetor permite que a argamassa escoe com maior facilidade, criando na região superior tensões maiores, por conter maior quantidade de argamassa, empurrando a camada inferior para baixo, ocupando o espaço vazio. Portanto,

argamassas mais densas devem preencher com maior facilidade o espaço vazio causado pela projeção, já que apresentam maior peso próprio para superar a tensão de escoamento.

O material que compõe o recipiente de projeção também pode exercer influência nesse fenômeno, pois quanto maior o atrito entre a argamassa e as paredes do projetor, maior a quantidade de material que fica aderida ao equipamento e menos material preenche o espaço vazio (Figura 4.5). Com isso, o abastecimento da região inferior do projetor é dificultado, o que prejudica o lançamento da argamassa, já que a pouca quantidade de material facilita a perda de coesão durante a passagem do ar comprimido.

Figura 4.5 – Efeito do atrito entre a parede do projetor e a argamassa: (a) maior e (b) menor atrito (desenhos esquemáticos e sem escala).

A formação do spray não é eficiente quando há pouco material a ser projetado ou quando o mesmo é pouco coeso, pois se o ar injetado não encontrar grande resistência para sair do projetor, não transfere sua energia cinética, e com isso não arrasta argamassa consigo.

✿ Viscosidade

A viscosidade da argamassa é outra propriedade que exerce grande influência sobre a projeção. A argamassa deve apresentar uma viscosidade tal que facilite seu escoamento pelos orifícios do equipamento ao ser projetada pelo ar comprimido, sem que haja entupimento, e promova a separação da massa em pequenos grânulos quando da formação do spray. Essa viscosidade pode ser garantida por uma pasta com características que permitam adequada separação e lubrificação entre os grãos de agregado, aumentando a mobilidade dos mesmos e facilitando o escoamento, ou pela adequada distribuição granulométrica dos agregados, podendo facilitar ou prejudicar o movimento entre os mesmos durante o escoamento da argamassa.

Outra característica influenciada pela viscosidade é a tendência de separação de fases da argamassa, tanto dentro do projetor quanto na formação do spray. A pasta deve apresentar uma viscosidade que impeça a segregação dos agregados dentro do recipiente de projeção, ou seja, não pode ser fluida a ponto de permitir que os agregados sedimentem. Durante a

projeção também não deve haver separação entre pasta/agregado, de forma que os agregados cheguem à parede recobertos por uma camada de pasta. Além disso, essa pasta deve apresentar comportamento plástico, sendo capaz de dissipar a energia cinética acumulada durante a projeção e absorver a deformação imposta pela energia, diminuindo a componente elástica do sistema e mantendo o material aderido à base (PFEUFFER; KUSTERLE, 2001; PILEGGI *et al.*, 2003).

De acordo com Pileggi e Pandolfelli (2002) a viscosidade da pasta deve ser adequada à taxa de cisalhamento e à diferença de velocidade a que as fases, no caso pasta e agregados, podem estar submetidas durante a projeção dependendo, entre outros fatores, da viscosidade e da densidade da pasta e do tamanho dos agregados. A pasta não pode ter viscosidade baixa a ponto de ser cisalhada a uma taxa maior do que a dos agregados, provocando a separação dos mesmos.

Essa propriedade é muito importante também nas etapas de manuseio e acabamento do revestimento, pois deve permitir o corte da argamassa para regularização da espessura da camada (sarrafeamento), sem que haja descolamento na interface argamassa-base durante a realização dessa etapa, e permitir que a argamassa seja espalhada com facilidade durante a etapa de acabamento (desempenamento), sem aparecimento de fissuras.

Após a projeção a viscosidade da argamassa aumenta linearmente com o aumento da compacidade do material *in situ*, devido às perdas de água e do ar incorporado presentes na pasta antes de ser projetada (BEAUPRÉ; MINDESS, 1996). Como o efeito lubrificante do ar incorporado pode se perder durante a projeção devido à formação do spray, a pasta da argamassa já aplicada deve apresentar uma viscosidade que garanta mobilidade aos agregados durante a etapa de acabamento.

✿ Perfil reológico x Taxa de cisalhamento

Como a argamassa de projeção é submetida a altos valores de taxa de cisalhamento durante sua aplicação¹⁴, o perfil reológico mais indicado para esse nível de solicitação é o *pseudoplástico*, ou seja, o material sofre redução de sua viscosidade aparente¹⁵ com o aumento da taxa de cisalhamento. Além disso, como a argamassa deve apresentar tensão de escoamento suficiente para suportar o peso próprio da camada aplicada logo após a projeção,

¹⁴ A taxa de cisalhamento à qual o material é submetido na formação do spray apresenta valores da ordem de 10^5 s^{-1} (PILEGGI; JOHN, 2006 – notas de aula de disciplina).

¹⁵ A viscosidade aparente de um fluido é a razão entre a tensão de cisalhamento aplicada, em N/m^2 , e a taxa de cisalhamento a que está sendo solicitado, em s^{-1} .

conforme discutido anteriormente, essa tensão de escoamento deve ser rapidamente recuperada quando a mesma chega ao substrato. Pode-se concluir então que o perfil reológico ideal de uma argamassa de projeção é o *pseudoplástico com tensão de escoamento*.

4.2.2.3 Técnicas de caracterização reológica

Para que se faça a correta caracterização do comportamento reológico de um material, o ensaio deve simular as solicitações sofridas pelo mesmo durante sua aplicação, visto que ele pode apresentar comportamentos distintos dependendo da taxa de cisalhamento a que é solicitado. Assim como no caso do concreto projetado, a técnica mais indicada para caracterizar corretamente a projeção em estudo é a de *reometria rotacional*, pois nesse caso é possível simular as altas taxas de cisalhamento a que a argamassa é submetida durante sua projeção e sua desaceleração quando a mesma chega à base (PILEGGI *et al*, 2003).

Além disso, para que a caracterização seja a melhor possível, devem-se reproduzir as etapas de mistura e transporte do material (ou solicitações às quais foi submetido) para que o mesmo seja caracterizado sob as mesmas condições em que foi utilizado.

4.3 Metodologia experimental

Buscando entender o efeito das diferentes composições de argamassa no sistema de projeção a ar comprimido, estudado no Capítulo 3, fez-se o estudo das características físicas e reológicas das argamassas utilizadas naqueles experimentos.

As argamassas foram caracterizadas fisicamente quanto à distribuição granulométrica e proporção volumétrica de seus componentes. A caracterização reológica foi feita a partir de ensaios de reometria rotacional.

4.3.1 Materiais

Das quatro argamassas estudadas duas são indicadas para revestimento (W e Z), uma é do tipo múltiplo uso (Y) e outra indicada para execução de contra pisos (X). A escolha desses tipos de argamassas se deu em função de criar uma gama de comportamentos reológicos distintos a partir da variação entre as composições.

A distribuição granulométrica das argamassas foi realizada por granulometria a laser, sendo os agregados ensaiados a seco e o material fino em álcool isopropílico (Figura 4.6).

Figura 4.6 – Distribuição granulométrica das argamassas estudadas.

A Figura 4.7 apresenta a proporção volumétrica dos componentes de cada argamassa incluindo os teores de água e ar na mistura.

Figura 4.7 – Proporção volumétrica percentual dos constituintes das argamassas.

4.3.2 Equipamentos

O comportamento reológico das argamassas foi caracterizado por ensaios de reometria rotacional (Figura 4.8), onde se mede a tensão (torque) gerada por um valor de solicitação controlada (rotação).

Figura 4.8 – Reômetro rotacional utilizado para caracterização reológica das argamassas estudadas: vista frontal (A) com a cuba, (B) raquete e (C) posicionamento da mesa.

4.3.3 Procedimento experimental

4.3.3.1 Estudo da mistura

O teor de ar das argamassas ensaiadas se mostrou sensível ao processo de mistura. Para que a caracterização reológica de cada argamassa fosse realizada corretamente, desenvolveu-se um procedimento de mistura no reômetro (tempo e velocidade de rotação) que resultasse em um teor de ar incorporado similar ao obtido no misturador mecânico. A forma de colocação de água foi realizada de acordo com o procedimento executado para o ensaio de distribuição de massa do Capítulo 3, que consiste em adicionar toda a água à massa anidra e iniciar a mistura logo em seguida.

Em estudos exploratórios, as argamassas foram misturadas no reômetro com rotação constante de 500 rpm e o teor de ar incorporado foi medido a cada minuto. Nesses ensaios, com apenas um minuto de mistura as argamassas W, Y e Z já haviam incorporado mais ar do que quando preparadas no misturador mecânico. Com isso, tornou-se necessário elaborar um programa de ensaio para especificação do tempo e da rotação necessária para que as argamassas incorporassem o mesmo teor de ar de quando preparadas no misturador mecânico.

Para definir o tempo de mistura, as argamassas foram misturadas no reômetro rotacional com rotação controlada e o teor de ar foi medido em função do tempo a cada um minuto. A rotação de 500 rpm foi mantida para a argamassa X, enquanto as outras argamassas foram misturadas a 350 rpm. A Figura 4.9 apresenta os resultados. Os valores entre parênteses correspondem ao teor de ar das mesmas argamassas preparadas no misturador mecânico utilizado no programa experimental do Capítulo 3.

Figura 4.9 – Variação do teor de ar incorporado em função do tempo de mistura (os valores entre parênteses correspondem ao teor de ar incorporado pelas argamassas quando preparadas no misturador mecânico).

Adotou-se, então, como rotação e tempo de mistura, respectivamente, 500 rpm e 60 s para a argamassa X e 350 rpm e 60 s para as outras três argamassas.

4.3.3.2 Programa de ensaio para caracterização do comportamento reológico

O programa de ensaio proposto consiste em um ciclo de mistura e desaceleração seguido por um ciclo de cisalhamento, iniciado em altas rotações para simulação do spray formado pelo projetor a ar comprimido, e desaceleração, para simular a chegada da argamassa à base.

Os ciclos de ensaio desenvolvidos (*mistura e desaceleração* e *cisalhamento e desaceleração*) encontram-se esquematizados na Figura 4.10. Para simplificar, os ciclos serão chamados de *mistura* e *cisalhamento*.

Figura 4.10 – Ciclos de ensaio: (a) argamassa X e (b) argamassas Y, Z e W. As principais diferenças são a rotação durante o período de mistura e a duração dos períodos de desaceleração.

4.4 Resultados obtidos e discussões

4.4.1 Teor de ar incorporado

Na Tabela 3.2 encontram-se os valores de massa específica das argamassas frescas e dos teores de ar incorporado determinados imediatamente após cada ciclo de ensaio. Os resultados correspondem à média de 3 determinações seguida do desvio padrão.

Tabela 4.1 – Teor de ar incorporado das argamassas após os ciclos de ensaio (média $\pm$ desvio padrão).

Argamassa	Teor de água (%)	Mistura		Cisalhamento	
		Massa específica fresca (kg/m ³)	Teor de ar incorporado (%)	Massa específica fresca (kg/m ³)	Teor de ar incorporado (%)
W	15	1744	21 $\pm$ 0,46	1726	22 $\pm$ 0,63
	17	1670	23 $\pm$ 0,39	1642	24 $\pm$ 0,95
X	15	2203	2,8 $\pm$ 0,15	2219	2,1 $\pm$ 0,28
	17	2220	0,2 $\pm$ 0,15	2220	0,0
Y	15	1635	27 $\pm$ 0,65	1578	30 $\pm$ 0,55
	17	1710	22 $\pm$ 0,33	1680	23 $\pm$ 0,51
Z	15	1764	22 $\pm$ 0,04	1677	26 $\pm$ 0,63
	17	1820	18 $\pm$ 0,33	1790	19 $\pm$ 0,12

4.4.2 Comportamento reológico das argamassas

A Figura 4.11 apresenta os resultados de torque equivalente¹⁶ em função da rotação do ciclo de cisalhamento das argamassas estudadas. A Figura 4.12 mostra os resultados de viscosidade equivalente¹⁷ das argamassas estudadas, obtidos pela razão entre o torque e a rotação.

Figura 4.11 – Torque equivalente x rotação no ciclo de cisalhamento e desaceleração.

Figura 4.12 – Viscosidade equivalente x rotação no ciclo de cisalhamento e desaceleração.

As argamassas preparadas com 15% de água apresentam comportamentos distintos entre si. As argamassas W e Y têm o mesmo comportamento *dilatante*, ou seja, apresentam maior resistência ao cisalhamento (torque) para o mesmo nível de solicitação (rotação). Estas argamassas apresentam distribuições granulométricas bastante semelhantes, com uma distribuição estreita dos agregados, que tem tendência a este tipo de comportamento (OLIVEIRA *et al.*, 2000). A diferença de magnitude entre os valores de torque equivalente

¹⁶ Os valores de torque fornecidos pelo reômetro são equivalentes ao esforço realizado em N.m.

¹⁷ Os valores de viscosidade equivalente calculados pela razão entre o torque equivalente e a rotação, dada em rpm, representam a tendência de comportamento do material, não sendo considerados valores absolutos e sim qualitativos.

das duas pode estar relacionada ao fato de a pasta da argamassa W apresentar maior quantidade de material fino do que a da argamassa Y, apesar de as duas composições serem constituídas pela mesma quantidade de pasta. Essa maior quantidade de finos na pasta da argamassa W aumenta sua viscosidade e acentua o comportamento dilatante. A argamassa X apresenta um comportamento *dilatante* a baixas rotações, que pode estar relacionado à menor quantidade de pasta na composição, o que dificulta a movimentação dos agregados, levando a uma maior resistência ao cisalhamento. No entanto, ocorre uma inversão de seu comportamento para *pseudoplástico* em aproximadamente 600 rpm, ou seja, a resistência ao cisalhamento passa a diminuir com o aumento da taxa de cisalhamento. A argamassa Z, por sua vez, apresenta comportamento *pseudoplástico* em todas as faixas de cisalhamento estudadas.

As argamassas preparadas com 17% de água apresentam comportamentos mais parecidos entre si, com as argamassas W e Y apresentando apenas moderada dilatação. O aumento do teor de água reduz a viscosidade da pasta e promove uma maior separação entre as partículas de agregados, diminuindo a resistência ao fluxo levando ao conseqüente aumento da fluidez das argamassas.

4.4.3 Energia de lançamento das argamassas

Os resultados obtidos no Capítulo 3 mostraram que a faixa de pressão de operação que proporciona os maiores valores de energia com os menores tempos para projeção e as menores perdas potenciais encontra-se entre 0,77 e 0,91 N/mm². Naquele capítulo observou-se também que o equipamento C, provavelmente devido ao tipo de mecanismo de liberação do ar comprimido, apresenta comportamento um pouco diferente dos outros três equipamentos, incluindo o modelo de mesma geometria com diferente acionamento (equipamento D). Sendo assim, optou-se por eliminar este equipamento desta discussão e os valores exibidos nos gráficos a seguir correspondem às médias das determinações de distribuição de massa e tempo para projeção apenas para os equipamentos A, B e D operando a 0,77 e 0,91 N/mm² de pressão. Os valores de viscosidade equivalente correspondem à rotação de 1000 rpm – pois a projeção ocorre a alta taxa de cisalhamento, embora não se conheça ao certo a taxa de cisalhamento imposta pelo equipamento a este valor de rotação – e foram obtidos a partir dos dados consolidados na Figura 4.12.

A Figura 4.13 apresenta o efeito da viscosidade nos valores médios de energia específica de lançamento das argamassas estimados no Capítulo 3. Observa-se que a influência da

viscosidade, embora estatisticamente significativa, não é a determinante. A variação da viscosidade equivalente na faixa estudada (4×10^{-5} a 2×10^{-4}) altera a energia em apenas 2 J/kg.

Figura 4.13 – Efeito da viscosidade na energia específica de lançamento média das argamassas preparadas com 15% e 17% de água e projetadas pelos equipamentos A, B e D a 0,77 e 0,91 N/mm² de pressão.

Nota-se que as argamassas com maior viscosidade (W e X) apresentam os maiores valores médios de energia de lançamento, ao contrário do que era esperado a partir das discussões feitas anteriormente. Porém, mais do que a viscosidade equivalente, o *comportamento reológico* de cada composição foi o fator de maior efeito na energia de lançamento das argamassas. Apesar de o teor de água ter reduzido a viscosidade de cada composição, a energia de lançamento não foi significativamente influenciada, apresentando o mesmo comportamento para cada composição independentemente do teor de água utilizado (Figura 4.14).

Figura 4.14 – Efeito da viscosidade na energia específica média de lançamento das argamassas projetadas pelos equipamentos A, B e D a 0,77 e 0,91 N/mm² de pressão.

Uma possível explicação para esse efeito é o resultado da combinação entre o formato do orifício de projeção, o perfil reológico das argamassas e sua composição. Isso porque em orifícios de formato cilíndrico situados em uma chapa de espessura pequena (< 2 mm), como no caso dos equipamentos estudados, as argamassas não sofrem grande atrito das paredes e,

portanto, apresentam menor perda de carga, ao contrário do que ocorre em bicos de projeção de formato tronco cônico. Além disso, para essa configuração de orifício as argamassas menos viscosas não apresentam muita resistência à passagem do ar e podem não acumular energia cinética suficiente para serem lançadas com alta velocidade durante a projeção (Figura 4.15).

Figura 4.15 – Formação de spray para argamassas com (a) matriz de alta viscosidade e (b) matriz de baixa viscosidade, projetadas através de orifício cilíndrico (desenhos esquemáticos e sem escala).

Especula-se que nesse tipo de orifício as argamassas mais viscosas e com comportamento dilatante, apesar de formarem grânulos de maior dimensão no spray que seriam lançados com baixa velocidade, apresentam maior resistência à passagem do ar, acumulando mais energia cinética e podendo gerar um grande número de grânulos lançados com alta velocidade. As argamassas com baixa viscosidade não impõem grande resistência à passagem do ar nesse tipo de orifício e, apesar de possibilitarem a formação de grânulos pequenos no spray, não acumulam energia cinética suficiente, gerando uma menor quantidade de grânulos projetados em alta velocidade.

No entanto, a argamassa W, apesar de apresentar a maior viscosidade e ser dilatante, apresenta energia média de lançamento pouco menor que a argamassa X quando ambas são preparadas com 17% de água. Isso pode estar relacionado ao fato de que a argamassa X possui menor quantidade de pasta que a W para separar os agregados, o que dificulta sua saída pelos orifícios de projeção, permitindo que maior quantidade de energia cinética seja transferida a ela pelo ar comprimido. Outra explicação seria o fato de a argamassa X ter maior massa específica do que a W, facilitando seu escoamento dentro do projetor e evitando perda de coesão durante a passagem do ar comprimido (Figura 4.4). Isso ocorre principalmente no equipamento D, que, por possuir recipiente plástico, provavelmente exerce menor atrito entre a argamassa e a parede do projetor, facilitando ainda mais o escoamento (Figura 4.5). A argamassa Y, apesar de apresentar a menor viscosidade, tem comportamento dilatante, o que pode explicar seus maiores valores de energia de lançamento em alguns casos, principalmente

nos equipamentos B e D que, por proporcionarem os maiores valores de energia, são os que provavelmente apresentam as maiores taxas de cisalhamento, evidenciando ainda mais o comportamento dilatante dessa argamassa.

Como discutido anteriormente, a geometria do equipamento exerce influência na eficiência do spray gerado: especula-se que quanto maior a área do orifício de projeção maior o tamanho dos grânulos formados no spray e menor a velocidade com que são projetados. Além disso, o aumento da área de projeção leva à redução da velocidade do ar, o que também pode diminuir a velocidade dos grânulos de argamassa. Esse fato está comprovado na Figura 4.16, que mostra o efeito da área de projeção dos equipamentos estudados na energia específica de lançamento das argamassas.

Figura 4.16 – Influência da área do orifício de projeção na energia específica de lançamento das argamassas.

4.4.4 Tempo para projeção das argamassas

A Figura 4.17 apresenta o efeito da viscosidade equivalente nos tempos médios para projeção das argamassas medidos no Capítulo 3.

Figura 4.17 – Efeito da viscosidade no tempo médio para projeção das argamassas projetadas pelos equipamentos A, B e D a 0,77 e 0,91 N/mm² de pressão.

De uma forma geral, o tempo para projeção de uma argamassa é tanto menor quanto menor for sua viscosidade, como era esperado, embora esta correlação não seja linear. Esse efeito é mais evidente para as argamassas preparadas com 15% de água, que apresentam valores de viscosidade diferentes em até uma ordem de grandeza (argamassa W e argamassa Y). Como as argamassas preparadas com 17% de água apresentam valores de viscosidade bastante próximos, o que diminui a sensibilidade da regressão, a influência da viscosidade no tempo para projeção mostrou-se menos significativa. No entanto, a argamassa X, apesar de ser menos viscosa que a W, apresenta maior tempo médio para projeção para os dois teores de água (Figura 4.17). Isso pode ser explicado pela menor quantidade de pasta presente na argamassa X (aproximadamente 50% contra 63% da argamassa W), o que provavelmente diminui a distância de separação entre os agregados e aumenta a probabilidade de se chocarem durante o escoamento, dificultando conseqüentemente a movimentação dos mesmos durante sua saída pelo orifício de projeção.

O aumento do teor de água aumentou a fluidez de todas as argamassas e diminuiu o tempo para projeção das mesmas, confirmando o que havia sido especulado no Capítulo 3. A argamassa Z, apesar de apresentar viscosidade aparente pouco maior que a da argamassa Y, é composta por uma pasta com menor viscosidade quando preparada com 17% de água (Figura 4.7), o que explica seu comportamento com o aumento do teor de água.

4.4.5 Perdas potenciais das argamassas

Na Figura 4.18 estão apresentados os resultados das perdas potenciais médias das argamassas para os três equipamentos discutidos estimadas pela quantidade de massa recolhida nos primeiros 0,50 m de distância do projetor.

Figura 4.18 – Efeito da viscosidade nas perdas potenciais médias das argamassas projetadas pelos equipamentos A, B e D a 0,77 e 0,91 N/mm² de pressão.

De forma geral, o aumento da viscosidade prejudica as perdas potenciais do sistema, já que maior quantidade de massa é recolhida nos primeiros 0,50 m de distância do projetor para as argamassas mais viscosas. Isso está coerente com a literatura. Nota-se claramente que a argamassa W preparada com 15% de água (ponto em destaque na Figura 4.18), a mais dilatante entre as formulações ensaiadas, não acompanhou essa tendência. A explicação para este comportamento não é imediata. A Figura 4.19 apresenta a influência da viscosidade nas perdas potenciais, descartando esta argamassa. A relação entre as perdas potenciais e a viscosidade passa, então, a ser linear.

Figura 4.19 – Efeito da viscosidade nas perdas potenciais médias das argamassas projetadas pelos equipamentos A, B e D a 0,77 e 0,91 N/mm² de pressão, desconsiderando a argamassa W preparada com 15% de água.

Assim como na energia de lançamento, a área de projeção dos orifícios dos equipamentos também deve influenciar as perdas potenciais (Figura 4.20).

Figura 4.20 – Influência da área do orifício de projeção nas perdas potenciais do sistema.

Quanto maior a área de projeção do orifício, maior a perda potencial do sistema, o que era esperado já que orifícios de maior dimensão geram grânulos maiores na formação do spray ou os lança com menor velocidade devido à redução da velocidade do ar comprimido decorrente do aumento da área de projeção. Sendo assim, os equipamentos com maior área de projeção geram mais perdas e proporcionam menor energia para o lançamento das argamassas.

Tendo em vista todas as considerações, a combinação das argamassas menos viscosas, no caso Y e Z preparadas com 17% de água, com equipamentos de menor área de orifício de projeção apresentam menos desperdício e possuem menor tempo para projeção.

4.5 Considerações sobre o capítulo

A influência do comportamento reológico das argamassas e de suas características físicas (distribuição granulométrica dos componentes, composição volumétrica da mistura) influenciou o comportamento na projeção. Maiores viscosidades tendem a aumentar as perdas potenciais e o tempo para projeção. No entanto, a influência da viscosidade na energia de lançamento, embora estatisticamente significativa, é pequena. Mais do que isto, neste experimento um aumento da viscosidade provocou um pequeno aumento na energia de lançamento, efeito contrário ao relatado na bibliografia. Esta contradição pode ser explicada pelas características dos equipamentos empregados, principalmente no que se refere à dimensão e ao formato dos orifícios de projeção, e precisa ser objeto de investigações futuras. O estudo de tamanho de grânulos projetados e sua distribuição em função da distância são fundamentais para esclarecimento das dúvidas que permanecem.

5 Conclusões e sugestões

A energia de lançamento empregada pelos equipamentos de projeção a ar comprimido é muito variável (de 2,1 a 15,7 J/kg para as argamassas e equipamentos estudados) e, na média, não é superior à energia empregada pelo pedreiro na aplicação manual (18 J/kg). Portanto, ao contrário do que se imaginava, não é a energia de lançamento que aumenta a aderência dos revestimentos de argamassa produzidos pela projeção a ar comprimido. Acredita-se que, entre outros, o tamanho dos grânulos projetados seja o fator determinante.

Os fatores que exerceram maior influência na energia de lançamento dos projetores estudados foram a pressão de operação do compressor de ar e as diferenças na geometria dos equipamentos, principalmente a área dos orifícios de projeção. No entanto, para os equipamentos ensaiados, pressões de ar superiores a 0,70 N/mm² não resultaram em ganhos proporcionais de energia, redução de tempo para projeção ou de perdas potenciais. Portanto, acima desta pressão se desperdiça ar comprimido sem aumentar a eficiência do sistema de projeção.

A composição (ou formulação) da argamassa e o teor de água são muito importantes para a produtividade (estimada pelo tempo para projeção) e para as perdas potenciais do sistema, que variaram de 1% a 25%. Em obras, portanto, recomenda-se o controle estrito destas variáveis. Para o caso das argamassas e equipamentos aqui estudados a energia de lançamento não sofreu influência significativa desses dois fatores.

A geometria dos equipamentos também influenciou as perdas potenciais. A seleção de equipamentos é também relevante para a eficiência do sistema.

A metodologia para estimativa da energia de lançamento do projetor a ar comprimido baseada na distribuição de massa por lançamento horizontal, desenvolvida neste trabalho, mostrou-se adequada, já que apresentou resultados consistentes com os da literatura para aplicação manual de argamassas e para projeção de concreto e permitiu diferenciar equipamentos e pressões de operação. Essa metodologia, além de apresentar baixo custo e ser de fácil execução, quando aliada à medição do tempo para projeção, permite estimar também as

perdas potenciais e a produtividade do processo de projeção de maneira simples, e pode servir também para estimar a energia empregada por bombas de projeção convencionais.

O tempo para projeção (que variou de 5 a 20 s), assim como a massa recolhida a 0,50 m do projetor, não serviram como parâmetros adequados para uma boa estimativa da energia de lançamento. No entanto, as combinações de argamassa, teor de água, equipamento e pressão mais produtivas (com menor tempo para projeção), geralmente são as que também apresentam as menores perdas potenciais.

O comportamento reológico das argamassas exerceu grande influência no sistema de projeção, sendo as argamassas com menor viscosidade as que apresentaram menores perdas potenciais, sem prejuízos para a energia de lançamento. Não se sabe, porém, qual o desempenho dessas argamassas quando projetadas contra uma base, pois não foram medidas a resistência de aderência e o rebote, que pode ser diferente das perdas potenciais.

A viscosidade das argamassas apresentou efeito pequeno na energia de lançamento. Adicionalmente, o comportamento observado foi contraditório ao relatado na literatura quanto à energia de lançamento. É necessário que se investiguem os fatores que possam ter ocasionado esse comportamento.

Sugestões para futuros trabalhos

Como o assunto tratado nesse trabalho se encontra pouco explorado, existem diversos aspectos relacionados a ele que podem ser estudados. Dentre eles, os de maior relevância são:

- a. Estudo da distribuição do tamanho dos grânulos projetados em função da distância e sua influência na aderência do revestimento produzido por projeção a ar comprimido;
- b. Desenvolvimento de um método eficiente de dimensionamento de um sistema projetor-ar comprimido;
- c. Determinação da vazão e velocidade de ar durante a projeção a ar comprimido;
- d. Desenvolvimento de novas geometrias de equipamentos de projeção a ar comprimido para aumento da eficiência do spray;
- e. Estudo da aplicabilidade das argamassas através de projeção a ar comprimido e verificação dos fatores que podem influenciar a resistência de aderência (pressão de operação, distância de projeção, comportamento reológico);

- f. Caracterização do comportamento mecânico (módulo de elasticidade e resistência de aderência) dos revestimentos de argamassa produzidos por projeção a ar comprimido, em função da pressão de operação;
- g. Formulação de composições de argamassa para projeção a ar comprimido que garantam adequadas aplicabilidade e resistência de aderência;
- h. Aperfeiçoamento dos métodos de medição reológica para simulação da projeção por spray a ar comprimido;
- i. Estudo da energia de lançamento de argamassas com fibra projetadas a ar comprimido.

6 Referências

ANTUNES, R. P. N. **Influência da reologia e da energia de impacto na resistência de aderência de revestimentos de argamassa**. 2005. 163 f. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, 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: ACI/SCA INTERNATIONAL CONFERENCE ON SPRAYED CONCRETE/SHOTCRETE, "SPRAYED CONCRETE TECHNOLOGY FOR THE 21ST CENTURY", 1996, Edinburgh. Proceedings... London; New York: E & FN Spon, 1996. p. 243-251.

_____.; _____. **Development of a general model of aggregate rebound for dry-mix shotcrete (Part II)**. Materials and Structures, London, v. 31, p. 195-202, 1998.

_____.; _____.; MINDESS, S. **Kinematics of dry-mix shotcrete**. ACI Materials Journal, v. 96, p. 283-290, 1999.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13278: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado**. Rio de Janeiro, 2005. 4 p.

AUSTIN, S. A.; ROBINS, P. J. **Wet process sprayed concrete technology for repair**. Loughborough, UK: Department of Civil & Building Engineering, Loughborough University, 1999. 20 p. (EPSRC Grant Final Report, GR/K52829).

_____.; _____.; GOODIER, C. I. **The rheological performance of wet-process sprayed mortars**. Magazine of Concrete Research, London, v. 51, n. 5, p. 341-352, 1999.

_____.; _____.; _____. **The performance of hardened wet-process sprayed mortars**. Magazine of Concrete Research, London, v. 52, n. 3, p. 195-208, 2000.

BAÍÁ, L. L. M.; SABBATINI, F. H. **Projeto e execução de revestimento de argamassa**. 3ª ed. São Paulo: O Nome da Rosa, 2004. 82 p. (Primeiros passos da qualidade no canteiro de

obras).

BANFILL, P. F. G. **The rheology of fresh mortar: a review.** In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 6., 2005, Florianópolis. Anais... Florianópolis, SC, 2005. p. 73-82.

BINDIGANAVILE, V.; BANTHIA, N. **Fiber reinforced dry-mix shotcrete with metakaolin.** Cement and Concrete Composites, Essex, v. 23, p. 503-514, 2001.

BRIDGER, P. **Wet-mix shotcrete nozzles.** Shotcrete, p. 32, 2006.

CANDIA, M. C.; FRANCO, L. S. **Contribuição ao estudo das técnicas de preparo da base no desempenho dos revestimentos de argamassa.** São Paulo: EPUSP, 1999. 13 p. (Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP. Departamento de Engenharia de Construção Civil, BT/PCC/223).

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.** 1996. 285 f. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996.

CARMI, S., GHASSEMZADEH, M. R. **Viscosity and spray formation studies of coal-oil mixtures.** Fuel, IBC Business Press, v. 60, p. 529-533, 1981.

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, Elmsford, n. 34, p. 1357-1364, 2004.

CRESCÊNCIO, R. M., PARSEKIAN, G. A., BARROS, M. M. S. B., SABBATINI, F. H. **Execução de revestimentos com argamassa projetada.** In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 7., 2000, Salvador, BA. Modernidade e sustentabilidade: anais. Salvador: ANTAC, 2000. v. 2, p. 1067-1074.

DUAILIBE, 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: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 6., Florianópolis, SC. Anais... Florianópolis, SC: ABAI/ANTAC, 2005. p. 508-517.

FERNANDES, H. C., ANTUNES, R. P. N.; BARROS, M. M. S. B.; JOHN, V. M. **Energia de**

lançamento da argamassa na projeção por spray a ar comprimido. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 11., Florianópolis, SC. Anais... Florianópolis, SC: ANTAC, 2006. p. 4093-4108.

FU, J., ADAMS, M. J., REYNOLDS, G. K., SALMAN, A. D., HOUNSLOW, M. J. **Impact deformation and rebound of wet granules.** Powder Technology, Elsevier, n. 140, p. 248-257, 2004.

GLASSGOLD, L. L. **Shotcrete standards: an American perspective.** In: ACI/SCA INTERNATIONAL CONFERENCE ON SPRAYED CONCRETE/SHOTCRETE, "SPRAYED CONCRETE TECHNOLOGY FOR THE 21ST CENTURY", 1996, Edinburgh. Proceedings... London; New York: E & FN Spon, 1996. p. 217-225.

GOODIER, C. I.; AUSTIN, S. A. **Construction and repair with wet-process sprayed concrete and mortar.** Camberley: Concrete Society, 2002. 3 p. (Technical Report 56).

HU, C.; LARRARD, F.; GJØRV, O. E. **Rheological testing and modelling of fresh high performance concrete.** Materials and Structures, London, v. 28, p. 1-7, 1995.

JOHN, V. M. **Repensando o papel da cal hidratada nas argamassas.** In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 5., 2003, São Paulo. Anais... São Paulo: EPUSP/ANTAC, 2003. p. 47-62.

JOLIN, M.; BEAUPRÉ, D.; MINDESS, S. **Tests to characterize properties of fresh dry-mix shotcrete.** Cement and Concrete Research, Elmsford, n. 29, p. 753-760, 1999.

JUST, A., FRANCO, L. S. **Descolamentos dos revestimentos cerâmicos de fachada na cidade do Recife.** São Paulo: EPUSP, 2001. 25 p. (Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil, BT/PCC/285).

KIM, Y. Y., FISCHER, G., LIM, Y. M., LI, V. C. **Mechanical performance of sprayed engineered cementitious composite using wet-mix shotcreting process for repair applications.** ACI Materials Journal, Detroit, MICH, v. 101, n. 1, p. 42-49, Jan-Feb 2004.

MALMGREN, L.; NORDLUND, E.; ROLUND, S. **Adhesion strength and shrinkage of shotcrete.** Tunnelling and Underground Space Technology, Oxford, n. 20, p. 33-48, 2005.

MARQUES, Y. A., VASQUES FILHO, A., PILEGGI, R. G., PANDOLFELLI, V. C. **Influência dos aditivos de consolidação sobre as propriedades termomecânicas da matriz**

de concretos de projeção. Cerâmica, São Paulo, v. 50, p. 231-238, 2004.

MENDES, A., GOMES, M. S. P. **Investigação experimental sobre o processo de atomização de líquidos.** In: METROLOGIA-2003, 2003, Recife, PE. Anais... SOCIEDADE BRASILEIRA DE METROLOGIA, 2003. p. 1-7.

OLIVEIRA, I. R. STUDART, A. R., PILEGGI, R. G., PANDOLFELLI, V.C. **Dispersão e empacotamento de partículas: princípios e aplicações em processamento cerâmico.** São Paulo: Fazendo Arte, 2000. 195 p.

PFEUFFER, M.; KUSTERLE, W. **Rheology and rebound behavior of dry-mix shotcrete.** Cement and Concrete Research, Elmsford, n. 31, p. 1619-1625, 2001.

PILEGGI, R. G. **Ferramentas para o estudo e desenvolvimento de concretos refratários.** 2001. 204 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2001.

_____.; PANDOLFELLI, V. C. **Reologia e distribuição granulométrica de concretos refratários bombeáveis.** Cerâmica, São Paulo, v. 48, n. 305, p. 11-16, 2002.

_____.; MARQUES, Y. A., VASQUES FILHO, A., PANDOLFELLI, V. C. **Shotcrete performance of refractory castables.** Refractories Applications and News, v. 8, n. 5, p. 15-20, May/June 2003.

_____. JOHN, V. M. **Reologia de suspensões reativas aplicadas à construção civil.** Notas de aula da disciplina de pós-graduação PCC 5101 – Reologia de suspensões reativas aplicadas à construção civil. Departamento de Engenharia de Construção Civil da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo: EPUSP, 2006. (anotações pessoais).

RIBEIRO, J. M., VENTURA, J. M., LABRINCHA, J. A. **A atomização como processo de obtenção de pós para a indústria cerâmica.** Cerâmica Industrial, v. 6, n. 5, p. 34-40, Setembro/Outubro 2005.

SANTOS, C. C. N. **Critérios de projetabilidade para as argamassas industrializadas de revestimento utilizando bomba de argamassa com eixo helicoidal.** 2003. 138 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Brasília, Brasília, 2003.

_____.; BAUER, E. **A influência do tempo de mistura e do teor de água na projetabilidade das argamassas industrializadas.** In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 5., 2003, São Paulo. Anais... São Paulo:

EPUSP/ANTAC, 2003. p. 339-351.

SILVA, V. S.; LIBORIO, J. B. L. **Estudo da aderência de argamassas de revestimento e chapiscos em estruturas de concreto armado.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 44., 2002, Belo Horizonte, MG. Anais... São Paulo: IBRACON, 2002. 15p.

SILVA, A. C. S. B., CUNHA NETO, J. A. B., LAMBERTS, R. **Modelo de evaporação de sprays em escoamento livre.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIAS TÉRMICAS, 9., 2002, Caxambu, MG. Anais... p. 1-12.

WATANABE, K., ISHIKAWA, M., WAKAMATSU, M. **Rheology of castable refractories.** Taikabutsu Overseas, v. 9, n. 1, p. 41-53, 1989.

Características geométricas dos equipamentos de projeção a ar comprimido

Dados do equipamento A		
Volume do recipiente	3,55E-03	m ³
Diâmetro do orifício	1,98E-02	m
Área do orifício	3,08E-04	m ²
Diâmetro do orifício de ar	1,90E-03	m
Área do orifício do ar	2,83E-08	m ²
Distância percorrida	5,40E-02	m
Altura de queda	0,97	m

Dados do equipamento B		
Volume do recipiente	3,80E-03	m ³
Diâmetro do orifício	1,95E-02	m
Área do orifício	2,98E-04	m ²
Diâmetro do orifício de ar	2,90E-03	m
Área do orifício do ar	6,60E-08	m ²
Distância percorrida	4,80E-02	m
Altura de queda	0,97	m

Dados do equipamento C		
Volume do recipiente	3,80E-03	m ³
Diâmetro do orifício	1,94E-02	m
Área do orifício	2,95E-04	m ²
Diâmetro do orifício de ar	3,00E-03	m
Área do orifício do ar	7,07E-08	m ²
Distância percorrida	5,50E-02	m
Altura de queda	0,97	m

Dados do equipamento D		
Volume do recipiente	3,80E-03	m ³
Diâmetro do orifício	1,94E-02	m
Área do orifício	2,95E-04	m ²
Diâmetro do orifício de ar	3,00E-03	m
Área do orifício do ar	7,07E-08	m ²
Distância percorrida	5,50E-02	m
Altura de queda	0,97	m

Resultados experimentais de distribuição de massa e tempo para projeção

➤ Argamassa W – 15% de água – Compressor 34 m³/h

Pressão de operação (N/mm²)	Distância média de queda (m)	Equipamento A			Equipamento B			Equipamento C			Equipamento D		
		% Massa distribuída	% Massa acumulada	Tempo para projeção (s)	% Massa distribuída	% Massa acumulada	Tempo para projeção (s)	% Massa distribuída	% Massa acumulada	Tempo para projeção (s)	% Massa distribuída	% Massa acumulada	Tempo para projeção (s)
0,50	0	0	0,00	13,7	0	0,00	9,6	0	0,00	9,0	0	0,00	8,5
	0,25	17,24	17,24		0,87	0,87		2,80	2,80		4,90	4,90	
	0,75	25,86	43,10		4,35	5,22		15,89	18,69		8,82	13,73	
	1,5	43,10	86,21		46,96	52,17		33,64	52,34		41,18	54,90	
	2,5	12,07	98,28		38,26	90,43		31,78	84,11		34,31	89,22	
	3,5	1,72	100,00		9,57	100,00		15,89	100,00		10,78	100,00	
0,63	0	0	0,00	11,8	0	0,00	9,2	0	0,00	9,4	0	0,00	8,3
	0,25	11,86	11,86		0,98	0,98		5,00	5,00		4,76	4,76	
	0,75	16,10	27,97		3,92	4,90		15,00	20,00		5,95	10,71	
	1,5	48,31	76,27		36,27	41,18		30,00	50,00		23,81	34,52	
	2,5	19,49	95,76		45,10	86,27		25,00	75,00		44,05	78,57	
	3,5	4,24	100,00		13,73	100,00		25,00	100,00		21,43	100,00	
0,77	0	0	0,00	15,7	0	0,00	11,3	0	0,00	9,3	0	0,00	11,1
	0,25	10,62	10,62		2,17	2,17		5,68	5,68		5,56	5,56	
	0,75	13,27	23,89		4,35	6,52		17,05	22,73		7,78	13,33	
	1,5	38,05	61,95		23,91	30,43		30,68	53,41		20,00	33,33	
	2,5	29,20	91,15		39,13	69,57		21,59	75,00		41,11	74,44	
	3,5	8,85	100,00		30,43	100,00		25,00	100,00		25,56	100,00	
0,91	0	0	0,00	10,9	0	0,00	11,3	0	0,00	9,6	0	0,00	7,4
	0,25	6,96	6,96		1,90	1,90		6,10	6,10		4,17	4,17	
	0,75	10,43	17,39		4,76	6,67		7,32	13,41		8,33	12,50	
	1,5	42,61	60,00		25,71	32,38		19,51	32,93		23,96	36,46	
	2,5	30,43	90,43		39,05	71,43		35,37	68,29		43,75	80,21	
	3,5	9,57	100,00		28,57	100,00		31,71	100,00		19,79	100,00	

➤ Argamassa W – 17% de água – Compressor 34 m³/h

Pressão de operação (N/mm²)	Distância média de queda (m)	Equipamento A			Equipamento B			Equipamento C			Equipamento D		
		% Massa distribuída	% Massa acumulada	Tempo para projeção (s)	% Massa distribuída	% Massa acumulada	Tempo para projeção (s)	% Massa distribuída	% Massa acumulada	Tempo para projeção (s)	% Massa distribuída	% Massa acumulada	Tempo para projeção (s)
0,50	0	0	0,00	9,2	0	0,00	7,9	0	0,00	7,8	0	0,00	6,4
	0,25	13,82	13,82		1,63	1,63		3,48	3,48		2,70	2,70	
	0,75	33,33	47,15		5,69	7,32		16,52	20,00		9,91	12,61	
	1,5	43,09	90,24		65,85	73,17		38,26	58,26		51,35	63,96	
	2,5	8,94	99,19		22,76	95,93		31,30	89,57		29,73	93,69	
	3,5	0,81	100,00		4,07	100,00		10,43	100,00		6,31	100,00	
0,63	0	0	0,00	8,6	0	0,00	8,0	0	0,00	8,1	0	0,00	6,9
	0,25	11,20	11,20		2,46	2,46		5,31	5,31		2,75	2,75	
	0,75	20,80	32,00		4,10	6,56		15,93	21,24		8,26	11,01	
	1,5	49,60	81,60		40,16	46,72		34,51	55,75		33,94	44,95	
	2,5	15,20	96,80		40,98	87,70		29,20	84,96		42,20	87,16	
	3,5	3,20	100,00		12,30	100,00		15,04	100,00		12,84	100,00	
0,77	0	0	0,00	7,0	0	0,00	7,8	0	0,00	7,5	0	0,00	6,3
	0,25	2,00	2,00		2,54	2,54		5,10	5,10		3,03	3,03	
	0,75	4,00	6,00		4,24	6,78		14,29	19,39		7,07	10,10	
	1,5	36,00	42,00		28,81	35,59		33,67	53,06		24,24	34,34	
	2,5	44,00	86,00		45,76	81,36		23,47	76,53		41,41	75,76	
	3,5	14,00	100,00		18,64	100,00		23,47	100,00		24,24	100,00	
0,91	0	0	0,00	8,4	0	0,00	8,4	0	0,00	7,6	0	0,00	6,7
	0,25	8,73	8,73		2,54	2,54		6,73	6,73		4,67	4,67	
	0,75	13,49	22,22		4,24	6,78		14,42	21,15		8,41	13,08	
	1,5	42,06	64,29		26,27	33,05		29,81	50,96		28,97	42,06	
	2,5	27,78	92,06		45,76	78,81		25,96	76,92		39,25	81,31	
	3,5	7,94	100,00		21,19	100,00		23,08	100,00		18,69	100,00	

➤ Argamassa X – 15% de água – Compressor 34 m³/h

Pressão de operação (N/mm²)	Distância média de queda (m)	Equipamento A			Equipamento B			Equipamento C			Equipamento D		
		% Massa distribuída	% Massa acumulada	Tempo para projeção (s)	% Massa distribuída	% Massa acumulada	Tempo para projeção (s)	% Massa distribuída	% Massa acumulada	Tempo para projeção (s)	% Massa distribuída	% Massa acumulada	Tempo para projeção (s)
0,50	0	0	0,00	19,7	0	0,00	12,4	0	0,00	12,8	0	0,00	10,0
	0,25	23,38	23,38		8,76	8,76		6,67	6,67		7,87	7,87	
	0,75	19,26	42,63		14,14	22,90		14,07	20,74		10,24	18,11	
	1,5	40,83	83,46		41,08	63,98		29,63	50,37		47,24	65,35	
	2,5	12,87	96,33		28,28	92,26		33,33	83,70		27,56	92,91	
	3,5	3,67	100,00		7,74	100,00		16,30	100,00		7,09	100,00	
0,63	0	0	0,00	12,2	0	0,00	12,0	0	0,00	12,4	0	0,00	8,7
	0,25	20,45	20,45		11,12	11,12		13,39	13,39		9,82	9,82	
	0,75	16,60	37,05		13,34	24,46		14,17	27,56		8,04	17,86	
	1,5	35,06	72,12		30,35	54,81		27,56	55,12		33,93	51,79	
	2,5	18,01	90,13		32,95	87,76		31,50	86,61		36,61	88,39	
	3,5	9,87	100,00		12,24	100,00		13,39	100,00		11,61	100,00	
0,77	0	0	0,00	13,5	0	0,00	11,9	0	0,00	10,0	0	0,00	9,0
	0,25	13,61	13,61		2,99	2,99		4,72	4,72		4,31	4,31	
	0,75	13,61	27,21		3,73	6,72		14,15	18,87		7,76	12,07	
	1,5	42,86	70,07		27,61	34,33		33,96	52,83		29,31	41,38	
	2,5	22,45	92,52		44,78	79,10		24,53	77,36		40,52	81,90	
	3,5	7,48	100,00		20,90	100,00		22,64	100,00		18,10	100,00	
0,91	0	0	0,00	15,2	0	0,00	12,0	0	0,00	9,0	0	0,00	9,0
	0,25	17,01	17,01		3,85	3,85		5,61	5,61		4,42	4,42	
	0,75	10,88	27,89		3,85	7,69		13,08	18,69		7,96	12,39	
	1,5	37,41	65,31		25,38	33,08		35,51	54,21		25,66	38,05	
	2,5	25,17	90,48		43,85	76,92		23,36	77,57		39,82	77,88	
	3,5	9,52	100,00		23,08	100,00		22,43	100,00		22,12	100,00	

➤ Argamassa X – 17% de água – Compressor 34 m³/h

Pressão de operação (N/mm²)	Distância média de queda (m)	Equipamento A			Equipamento B			Equipamento C			Equipamento D		
		% Massa distribuída	% Massa acumulada	Tempo para projeção (s)	% Massa distribuída	% Massa acumulada	Tempo para projeção (s)	% Massa distribuída	% Massa acumulada	Tempo para projeção (s)	% Massa distribuída	% Massa acumulada	Tempo para projeção (s)
0,50	0	0	0,00	11,9	0	0,00	10,0	0	0,00	9,5	0	0,00	7,3
	0,25	13,42	13,42		2,96	2,96		2,16	2,16		2,14	2,14	
	0,75	33,87	47,28		14,14	17,10		14,39	16,55		8,57	10,71	
	1,5	41,53	88,82		50,32	67,43		39,57	56,12		55,71	66,43	
	2,5	9,26	98,08		25,99	93,42		31,65	87,77		26,43	92,86	
	3,5	1,92	100,00		6,58	100,00		12,23	100,00		7,14	100,00	
0,63	0	0	0,00	10,2	0	0,00	9,6	0	0,00	9,6	0	0,00	7,1
	0,25	8,28	8,28		2,36	2,36		1,61	1,61		1,85	1,85	
	0,75	20,38	28,66		12,50	14,86		12,10	13,71		5,56	7,41	
	1,5	52,23	80,89		37,16	52,03		37,10	50,81		22,22	29,63	
	2,5	14,97	95,86		35,47	87,50		28,23	79,03		50,93	80,56	
	3,5	4,14	100,00		12,50	100,00		20,97	100,00		19,44	100,00	
0,77	0	0	0,00	9,9	0	0,00	9,1	0	0,00	10,4	0	0,00	7,0
	0,25	4,55	4,55		1,46	1,46		1,82	1,82		1,64	1,64	
	0,75	12,34	16,88		10,92	12,37		11,82	13,64		5,74	7,38	
	1,5	56,49	73,38		33,08	45,46		27,27	40,91		27,87	35,25	
	2,5	20,13	93,51		34,88	80,33		34,55	75,45		45,90	81,15	
	3,5	6,49	100,00		19,67	100,00		24,55	100,00		18,85	100,00	
0,91	0	0	0,00	10,5	0	0,00	9,2	0	0,00	9,2	0	0,00	7,4
	0,25	5,33	5,33		1,44	1,44		1,80	1,80		1,75	1,75	
	0,75	10,67	16,00		12,23	13,67		10,81	12,61		5,26	7,02	
	1,5	51,33	67,33		33,81	47,48		37,84	50,45		23,68	30,70	
	2,5	24,67	92,00		33,09	80,58		27,03	77,48		45,61	76,32	
	3,5	8,00	100,00		19,42	100,00		22,52	100,00		23,68	100,00	

➤ Argamassa Y – 15% de água – Compressor 34 m³/h

Pressão de operação (N/mm²)	Distância média de queda (m)	Equipamento A			Equipamento B			Equipamento C			Equipamento D		
		% Massa distribuída	% Massa acumulada	Tempo para projeção (s)	% Massa distribuída	% Massa acumulada	Tempo para projeção (s)	% Massa distribuída	% Massa acumulada	Tempo para projeção (s)	% Massa distribuída	% Massa acumulada	Tempo para projeção (s)
0,50	0	0	0,00	9,1	0	0,00	7,8	0	0,00	5,5	0	0,00	5,8
	0,25	20,10	20,10		5,53	5,53		4,08	4,08		3,00	3,00	
	0,75	29,68	49,78		19,36	24,89		18,37	22,45		11,00	14,00	
	1,5	39,31	89,09		38,70	63,59		38,78	61,22		52,00	66,00	
	2,5	9,17	98,25		28,58	92,17		27,55	88,78		27,00	93,00	
	3,5	1,75	100,00		7,83	100,00		11,22	100,00		7,00	100,00	
0,63	0	0	0,00	7,3	0	0,00	6,6	0	0,00	6,0	0	0,00	5,9
	0,25	12,34	12,34		6,06	6,06		4,81	4,81		3,13	3,13	
	0,75	23,80	36,14		20,45	26,52		21,15	25,96		8,33	11,46	
	1,5	48,07	84,22		33,94	60,45		31,73	57,69		26,04	37,50	
	2,5	10,97	95,18		30,87	91,33		26,92	84,62		42,71	80,21	
	3,5	4,82	100,00		8,67	100,00		15,38	100,00		19,79	100,00	
0,77	0	0	0,00	6,5	0	0,00	6,8	0	0,00	6,6	0	0,00	6,0
	0,25	9,01	9,01		4,63	4,63		4,49	4,49		3,37	3,37	
	0,75	16,74	25,75		17,47	22,10		16,85	21,35		8,99	12,36	
	1,5	44,21	69,96		33,22	55,32		35,96	57,30		22,47	34,83	
	2,5	23,17	93,13		26,86	82,18		21,35	78,65		42,70	77,53	
	3,5	6,87	100,00		17,82	100,00		21,35	100,00		22,47	100,00	
0,91	0	0	0,00	7,8	0	0,00	7,3	0	0,00	7,1	0	0,00	5,6
	0,25	7,27	7,27		6,36	6,36		2,41	2,41		3,61	3,61	
	0,75	13,64	20,91		20,91	27,27		19,28	21,69		8,43	12,05	
	1,5	39,09	60,00		30,91	58,18		34,94	56,63		21,69	33,73	
	2,5	29,09	89,09		31,82	90,00		19,28	75,90		36,14	69,88	
	3,5	10,91	100,00		10,00	100,00		24,10	100,00		30,12	100,00	

➤ Argamassa Y – 17% de água – Compressor 34 m³/h

Pressão de operação (N/mm²)	Distância média de queda (m)	Equipamento A			Equipamento B			Equipamento C			Equipamento D		
		% Massa distribuída	% Massa acumulada	Tempo para projeção (s)	% Massa distribuída	% Massa acumulada	Tempo para projeção (s)	% Massa distribuída	% Massa acumulada	Tempo para projeção (s)	% Massa distribuída	% Massa acumulada	Tempo para projeção (s)
0,50	0	0	0,00	8,0	0	0,00	7,4	0	0,00	6,8	0	0,00	5,3
	0,25	9,71	9,71		3,63	3,63		2,65	2,65		1,80	1,80	
	0,75	29,96	39,67		4,47	8,09		15,04	17,70		6,31	8,11	
	1,5	48,18	87,85		51,62	59,71		43,36	61,06		53,15	61,26	
	2,5	10,12	97,97		32,97	92,68		30,09	91,15		32,43	93,69	
	3,5	2,03	100,00		7,32	100,00		8,85	100,00		6,31	100,00	
0,63	0	0	0,00	7,3	0	0,00	7,5	0	0,00	7,0	0	0,00	5,5
	0,25	6,98	6,98		1,26	1,26		2,63	2,63		1,85	1,85	
	0,75	22,11	29,09		3,39	4,65		14,04	16,67		7,41	9,26	
	1,5	52,06	81,14		34,70	39,36		38,60	55,26		30,56	39,81	
	2,5	15,16	96,30		48,29	87,65		28,95	84,21		47,22	87,04	
	3,5	3,70	100,00		12,35	100,00		15,79	100,00		12,96	100,00	
0,77	0	0	0,00	6,9	0	0,00	8,8	0	0,00	6,8	0	0,00	5,1
	0,25	4,80	4,80		1,77	1,77		2,00	2,00		3,00	3,00	
	0,75	16,00	20,80		3,54	5,31		13,00	15,00		5,00	8,00	
	1,5	50,40	71,20		31,86	37,17		41,00	56,00		25,00	33,00	
	2,5	23,20	94,40		49,56	86,73		23,00	79,00		47,00	80,00	
	3,5	5,60	100,00		13,27	100,00		21,00	100,00		20,00	100,00	
0,91	0	0	0,00	6,5	0	0,00	7,4	0	0,00	6,5	0	0,00	5,3
	0,25	4,96	4,96		0,90	0,90		2,17	2,17		2,11	2,11	
	0,75	14,88	19,83		2,70	3,60		13,04	15,22		4,21	6,32	
	1,5	48,76	68,60		24,32	27,93		40,22	55,43		23,16	29,47	
	2,5	24,79	93,39		53,15	81,08		21,74	77,17		44,21	73,68	
	3,5	6,61	100,00		18,92	100,00		22,83	100,00		26,32	100,00	

➤ Argamassa Z – 15% de água – Compressor 34 m³/h

Pressão de operação (N/mm²)	Distância média de queda (m)	Equipamento A			Equipamento B			Equipamento C			Equipamento D		
		% Massa distribuída	% Massa acumulada	Tempo para projeção (s)	% Massa distribuída	% Massa acumulada	Tempo para projeção (s)	% Massa distribuída	% Massa acumulada	Tempo para projeção (s)	% Massa distribuída	% Massa acumulada	Tempo para projeção (s)
0,50	0	0	0,00	17,5	0	0,00	15,2	0	0,00	7,9	0	0,00	6,1
	0,25	34,41	34,41		21,36	21,36		5,08	5,08		3,57	3,57	
	0,75	30,76	65,17		20,14	41,50		22,03	27,12		13,39	16,96	
	1,5	28,69	93,86		33,39	74,89		41,53	68,64		50,89	67,86	
	2,5	4,91	98,77		18,32	93,20		22,03	90,68		25,89	93,75	
	3,5	1,23	100,00		6,80	100,00		9,32	100,00		6,25	100,00	
0,63	0	0	0,00	12,7	0	0,00	7,2	0	0,00	11,1	0	0,00	5,8
	0,25	15,02	15,02		3,31	3,31		8,33	8,33		2,02	2,02	
	0,75	30,22	45,24		18,18	21,49		18,52	26,85		9,09	11,11	
	1,5	40,13	85,37		43,80	65,29		34,26	61,11		36,36	47,47	
	2,5	11,72	97,09		26,86	92,15		25,00	86,11		38,38	85,86	
	3,5	2,91	100,00		7,85	100,00		13,89	100,00		14,14	100,00	
0,77	0	0	0,00	11,1	0	0,00	6,6	0	0,00	7,2	0	0,00	5,7
	0,25	12,50	12,50		3,43	3,43		2,75	2,75		1,94	1,94	
	0,75	22,66	35,16		17,19	20,61		16,51	19,27		9,71	11,65	
	1,5	42,97	78,13		38,42	59,04		37,61	56,88		33,98	45,63	
	2,5	17,19	95,31		30,19	89,23		24,77	81,65		39,81	85,44	
	3,5	4,69	100,00		10,77	100,00		18,35	100,00		14,56	100,00	
0,91	0	0	0,00	17,3	0	0,00	9,3	0	0,00	7,1	0	0,00	5,9
	0,25	15,08	15,08		7,76	7,76		1,89	1,89		2,13	2,13	
	0,75	25,40	40,48		17,24	25,00		16,04	17,92		7,45	9,57	
	1,5	36,51	76,98		32,76	57,76		39,62	57,55		28,72	38,30	
	2,5	17,46	94,44		29,31	87,07		23,58	81,13		39,36	77,66	
	3,5	5,56	100,00		12,93	100,00		18,87	100,00		22,34	100,00	

➤ Argamassa Z – 17% de água – Compressor 34 m³/h

Pressão de operação (N/mm²)	Distância média de queda (m)	Equipamento A			Equipamento B			Equipamento C			Equipamento D		
		% Massa distribuída	% Massa acumulada	Tempo para projeção (s)	% Massa distribuída	% Massa acumulada	Tempo para projeção (s)	% Massa distribuída	% Massa acumulada	Tempo para projeção (s)	% Massa distribuída	% Massa acumulada	Tempo para projeção (s)
0,50	0	0	0,00	7,0	0	0,00	6,8	0	0,00	6,1	0	0,00	5,1
	0,25	6,89	6,89		3,33	3,33		2,48	2,48		7,14	7,14	
	0,75	34,41	41,30		3,70	7,04		9,09	11,57		7,14	14,29	
	1,5	51,45	92,75		60,74	67,78		47,11	58,68		65,87	80,16	
	2,5	5,80	98,55		27,41	95,19		33,06	91,74		17,46	97,62	
	3,5	1,45	100,00		4,81	100,00		8,26	100,00		2,38	100,00	
0,63	0	0	0,00	6,5	0	0,00	6,5	0	0,00	6,6	0	0,00	5,4
	0,25	6,38	6,38		5,95	5,95		4,13	4,13		4,96	4,96	
	0,75	24,11	30,49		3,72	9,66		7,44	11,57		5,79	10,74	
	1,5	55,32	85,81		58,75	68,41		42,15	53,72		46,28	57,02	
	2,5	12,41	98,22		27,13	95,54		30,58	84,30		35,54	92,56	
	3,5	1,78	100,00		4,46	100,00		15,70	100,00		7,44	100,00	
0,77	0	0	0,00	6,2	0	0,00	7,2	0	0,00	6,5	0	0,00	5,5
	0,25	3,93	3,93		2,88	2,88		3,54	3,54		3,57	3,57	
	0,75	16,43	20,37		2,16	5,04		9,73	13,27		5,36	8,93	
	1,5	56,43	76,79		46,43	51,47		42,48	55,75		28,57	37,50	
	2,5	19,28	96,07		39,57	91,04		23,89	79,65		46,43	83,93	
	3,5	3,93	100,00		8,96	100,00		20,35	100,00		16,07	100,00	
0,91	0	0	0,00	6,3	0	0,00	7,7	0	0,00	6,4	0	0,00	5,2
	0,25	2,88	2,88		5,26	5,26		1,89	1,89		2,94	2,94	
	0,75	16,55	19,42		2,26	7,52		16,04	17,92		3,92	6,86	
	1,5	55,40	74,82		36,09	43,61		39,62	57,55		27,45	34,31	
	2,5	20,86	95,68		46,62	90,23		23,58	81,13		46,08	80,39	
	3,5	4,32	100,00		9,77	100,00		18,87	100,00		19,61	100,00	

➤ Argamassa W – 15% de água – Compressor 68 m³/h

Pressão de operação (N/mm²)	Distância média de queda (m)	Equipamento A			Equipamento B			Equipamento C			Equipamento D		
		% Massa distribuída	% Massa acumulada	Tempo para projeção (s)	% Massa distribuída	% Massa acumulada	Tempo para projeção (s)	% Massa distribuída	% Massa acumulada	Tempo para projeção (s)	% Massa distribuída	% Massa acumulada	Tempo para projeção (s)
0,50	0	0	0,00	19,4	0	0,00	12,3	0	0,00	11,3	0	0,00	9,0
	0,25	19,44	19,44		3,33	3,33		5,71	5,71		6,93	6,93	
	0,75	24,07	43,52		5,83	9,17		14,29	20,00		7,92	14,85	
	1,5	40,74	84,26		44,17	53,33		29,52	49,52		34,65	49,50	
	2,5	13,89	98,15		36,67	90,00		30,48	80,00		36,63	86,14	
	3,5	1,85	100,00		10,00	100,00		20,00	100,00		13,86	100,00	
0,63	0	0	0,00	13,5	0	0,00	9,4	0	0,00	9,8	0	0,00	9,6
	0,25	14,16	14,16		1,79	1,79		4,21	4,21		5,49	5,49	
	0,75	16,81	30,97		4,46	6,25		14,74	18,95		7,69	13,19	
	1,5	45,13	76,11		30,36	36,61		32,63	51,58		25,27	38,46	
	2,5	19,47	95,58		45,54	82,14		23,16	74,74		41,76	80,22	
	3,5	4,42	100,00		17,86	100,00		25,26	100,00		19,78	100,00	
0,77	0	0	0,00	13,8	0	0,00	10,5	0	0,00	10,1	0	0,00	8,1
	0,25	16,81	16,81		2,80	2,80		6,59	6,59		4,26	4,26	
	0,75	10,92	27,73		5,61	8,41		16,48	23,08		7,45	11,70	
	1,5	35,29	63,03		28,97	37,38		29,67	52,75		21,28	32,98	
	2,5	29,41	92,44		46,73	84,11		19,78	72,53		43,62	76,60	
	3,5	7,56	100,00		15,89	100,00		27,47	100,00		23,40	100,00	
0,91	0	0	0,00	13,1	0	0,00	9,1	0	0,00	8,9	0	0,00	8,9
	0,25	8,74	8,74		1,03	1,03		4,71	4,71		4,65	4,65	
	0,75	11,65	20,39		3,09	4,12		15,29	20,00		8,14	12,79	
	1,5	36,89	57,28		21,65	25,77		30,59	50,59		19,77	32,56	
	2,5	32,04	89,32		45,36	71,13		23,53	74,12		43,02	75,58	
	3,5	10,68	100,00		28,87	100,00		25,88	100,00		24,42	100,00	

➤ Argamassa W – 17% de água – Compressor 68 m³/h

Pressão de operação (N/mm²)	Distância média de queda (m)	Equipamento A			Equipamento B			Equipamento C			Equipamento D		
		% Massa distribuída	% Massa acumulada	Tempo para projeção (s)	% Massa distribuída	% Massa acumulada	Tempo para projeção (s)	% Massa distribuída	% Massa acumulada	Tempo para projeção (s)	% Massa distribuída	% Massa acumulada	Tempo para projeção (s)
0,50	0	0	0,00	9,1	0	0,00	8,2	0	0,00	7,7	0	0,00	6,5
	0,25	13,85	13,85		1,57	1,57		2,61	2,61		1,92	1,92	
	0,75	33,85	47,69		5,51	7,09		14,78	17,39		6,73	8,65	
	1,5	43,08	90,77		55,12	62,20		39,13	56,52		48,08	56,73	
	2,5	7,69	98,46		30,71	92,91		31,30	87,83		34,62	91,35	
	3,5	1,54	100,00		7,09	100,00		12,17	100,00		8,65	100,00	
0,63	0	0	0,00	8,3	0	0,00	8,0	0	0,00	7,7	0	0,00	6,7
	0,25	6,61	6,61		0,85	0,85		1,94	1,94		2,88	2,88	
	0,75	20,66	27,27		3,39	4,24		12,62	14,56		8,65	11,54	
	1,5	50,41	77,69		31,36	35,59		37,86	52,43		32,69	44,23	
	2,5	18,18	95,87		46,61	82,20		27,18	79,61		42,31	86,54	
	3,5	4,13	100,00		17,80	100,00		20,39	100,00		13,46	100,00	
0,77	0	0	0,00	7,9	0	0,00	8,2	0	0,00	8,0	0	0,00	6,3
	0,25	6,61	6,61		0,89	0,89		2,91	2,91		2,00	2,00	
	0,75	15,70	22,31		2,68	3,57		13,59	16,50		7,00	9,00	
	1,5	47,11	69,42		27,68	31,25		33,01	49,51		25,00	34,00	
	2,5	23,97	93,39		50,00	81,25		27,18	76,70		44,00	78,00	
	3,5	6,61	100,00		18,75	100,00		23,30	100,00		22,00	100,00	
0,91	0	0	0,00	7,2	0	0,00	7,5	0	0,00	7,6	0	0,00	6,2
	0,25	6,40	6,40		0,85	0,85		3,37	3,37		2,06	2,06	
	0,75	15,20	21,60		2,56	3,42		12,36	15,73		6,19	8,25	
	1,5	48,00	69,60		29,91	33,33		35,96	51,69		23,71	31,96	
	2,5	23,20	92,80		50,43	83,76		23,60	75,28		44,33	76,29	
	3,5	7,20	100,00		16,24	100,00		24,72	100,00		23,71	100,00	

➤ Argamassa X – 15% de água – Compressor 68 m³/h

Pressão de operação (N/mm²)	Distância média de queda (m)	Equipamento A			Equipamento B			Equipamento C			Equipamento D		
		% Massa distribuída	% Massa acumulada	Tempo para projeção (s)	% Massa distribuída	% Massa acumulada	Tempo para projeção (s)	% Massa distribuída	% Massa acumulada	Tempo para projeção (s)	% Massa distribuída	% Massa acumulada	Tempo para projeção (s)
0,50	0	0	0,00	19,4	0	0,00	13,5	0	0,00	12,9	0	0,00	10,5
	0,25	13,01	13,01		4,23	4,23		7,69	7,69		6,61	6,61	
	0,75	28,77	41,78		5,63	9,86		15,38	23,08		8,26	14,88	
	1,5	41,78	83,56		38,73	48,59		30,00	53,08		33,88	48,76	
	2,5	13,01	96,58		38,03	86,62		30,00	83,08		36,36	85,12	
	3,5	3,42	100,00		13,38	100,00		16,92	100,00		14,88	100,00	
0,63	0	0	0,00	19,6	0	0,00	12,9	0	0,00	11,6	0	0,00	9,6
	0,25	19,33	19,33		3,03	3,03		4,48	4,48		4,27	4,27	
	0,75	16,81	36,13		4,55	7,58		12,69	17,16		7,69	11,97	
	1,5	37,82	73,95		28,79	36,36		29,10	46,27		26,50	38,46	
	2,5	19,33	93,28		43,18	79,55		26,12	72,39		39,32	77,78	
	3,5	6,72	100,00		20,45	100,00		27,61	100,00		22,22	100,00	
0,77	0	0	0,00	12,7	0	0,00	12,2	0	0,00	11,4	0	0,00	9,4
	0,25	15,65	15,65		2,42	2,42		3,54	3,54		4,46	4,46	
	0,75	11,56	27,21		2,42	4,84		14,16	17,70		8,04	12,50	
	1,5	41,50	68,71		25,00	29,84		33,63	51,33		24,11	36,61	
	2,5	23,81	92,52		43,55	73,39		25,66	76,99		36,61	73,21	
	3,5	7,48	100,00		26,61	100,00		23,01	100,00		26,79	100,00	
0,91	0	0	0,00	16,3	0	0,00	11,4	0	0,00	10,3	0	0,00	8,8
	0,25	11,94	11,94		4,00	4,00		3,09	3,09		5,26	5,26	
	0,75	14,93	26,87		2,40	6,40		13,40	16,49		6,32	11,58	
	1,5	34,33	61,19		24,00	30,40		37,11	53,61		23,16	34,74	
	2,5	27,61	88,81		46,40	76,80		23,71	77,32		34,74	69,47	
	3,5	11,19	100,00		23,20	100,00		22,68	100,00		30,53	100,00	

➤ Argamassa X – 17% de água – Compressor 68 m³/h

Pressão de operação (N/mm²)	Distância média de queda (m)	Equipamento A			Equipamento B			Equipamento C			Equipamento D		
		% Massa distribuída	% Massa acumulada	Tempo para projeção (s)	% Massa distribuída	% Massa acumulada	Tempo para projeção (s)	% Massa distribuída	% Massa acumulada	Tempo para projeção (s)	% Massa distribuída	% Massa acumulada	Tempo para projeção (s)
0,50	0	0	0,00	10,4	0	0,00	9,8	0	0,00	8,7	0	0,00	7,3
	0,25	13,94	13,94		2,17	2,17		2,88	2,88		1,49	1,49	
	0,75	40,00	53,94		5,07	7,25		13,67	16,55		6,72	8,21	
	1,5	38,18	92,12		55,07	62,32		40,29	56,83		50,75	58,96	
	2,5	6,06	98,18		28,26	90,58		30,22	87,05		31,34	90,30	
	3,5	1,82	100,00		9,42	100,00		12,95	100,00		9,70	100,00	
0,63	0	0	0,00	8,9	0	0,00	9,2	0	0,00	8,3	0	0,00	7,1
	0,25	5,13	5,13		1,38	1,38		1,65	1,65		2,38	2,38	
	0,75	26,28	31,41		3,45	4,83		10,74	12,40		3,17	5,56	
	1,5	53,85	85,26		40,69	45,52		37,19	49,59		31,75	37,30	
	2,5	12,18	97,44		42,07	87,59		28,93	78,51		45,24	82,54	
	3,5	2,56	100,00		12,41	100,00		21,49	100,00		17,46	100,00	
0,77	0	0	0,00	8,2	0	0,00	9,5	0	0,00	8,4	0	0,00	7,6
	0,25	3,29	3,29		1,55	1,55		2,65	2,65		2,68	2,68	
	0,75	20,39	23,68		2,33	3,88		8,85	11,50		4,46	7,14	
	1,5	55,92	79,61		25,58	29,46		38,94	50,44		24,11	31,25	
	2,5	16,45	96,05		48,84	78,29		27,43	77,88		42,86	74,11	
	3,5	3,95	100,00		21,71	100,00		22,12	100,00		25,89	100,00	
0,91	0	0	0,00	8,9	0	0,00	10,1	0	0,00	8,1	0	0,00	7,0
	0,25	1,97	1,97		1,56	1,56		3,42	3,42		2,38	2,38	
	0,75	12,50	14,47		2,34	3,91		10,26	13,68		4,76	7,14	
	1,5	51,97	66,45		22,66	26,56		36,75	50,43		22,62	29,76	
	2,5	25,66	92,11		50,00	76,56		26,50	76,92		41,67	71,43	
	3,5	7,89	100,00		23,44	100,00		23,08	100,00		28,57	100,00	

➤ Argamassa Y – 15% de água – Compressor 68 m³/h

Pressão de operação (N/mm²)	Distância média de queda (m)	Equipamento A			Equipamento B			Equipamento C			Equipamento D		
		% Massa distribuída	% Massa acumulada	Tempo para projeção (s)	% Massa distribuída	% Massa acumulada	Tempo para projeção (s)	% Massa distribuída	% Massa acumulada	Tempo para projeção (s)	% Massa distribuída	% Massa acumulada	Tempo para projeção (s)
0,50	0	0	0,00	9,0	0	0,00	8,2	0	0,00	7,3	0	0,00	6,5
	0,25	13,01	13,01		2,65	2,65		3,77	3,77		5,15	5,15	
	0,75	30,08	43,09		6,19	8,85		17,92	21,70		11,34	16,49	
	1,5	35,77	78,86		58,41	67,26		35,85	57,55		39,18	55,67	
	2,5	18,70	97,56		27,43	94,69		29,25	86,79		34,02	89,69	
	3,5	2,44	100,00		5,31	100,00		13,21	100,00		10,31	100,00	
0,63	0	0	0,00	8,7	0	0,00	8,2	0	0,00	6,8	0	0,00	6,2
	0,25	11,01	11,01		2,83	2,83		4,26	4,26		3,26	3,26	
	0,75	22,02	33,03		4,72	7,55		17,02	21,28		9,78	13,04	
	1,5	44,04	77,06		29,25	36,79		37,23	58,51		26,09	39,13	
	2,5	18,35	95,41		45,28	82,08		21,28	79,79		40,22	79,35	
	3,5	4,59	100,00		17,92	100,00		20,21	100,00		20,65	100,00	
0,77	0	0	0,00	6,9	0	0,00	6,8	0	0,00	6,4	0	0,00	5,6
	0,25	10,53	10,53		2,80	2,80		5,15	5,15		4,76	4,76	
	0,75	19,30	29,82		3,74	6,54		17,53	22,68		9,52	14,29	
	1,5	43,86	73,68		28,04	34,58		37,11	59,79		21,43	35,71	
	2,5	19,30	92,98		48,60	83,18		20,62	80,41		39,29	75,00	
	3,5	7,02	100,00		16,82	100,00		19,59	100,00		25,00	100,00	
0,91	0	0	0,00	7,7	0	0,00	6,9	0	0,00	6,4	0	0,00	5,7
	0,25	8,85	8,85		2,08	2,08		7,06	7,06		5,06	5,06	
	0,75	15,04	23,89		3,13	5,21		18,82	25,88		8,86	13,92	
	1,5	37,17	61,06		20,83	26,04		34,12	60,00		21,52	35,44	
	2,5	28,32	89,38		48,96	75,00		21,18	81,18		35,44	70,89	
	3,5	10,62	100,00		25,00	100,00		18,82	100,00		29,11	100,00	

➤ Argamassa Y – 17% de água – Compressor 68 m³/h

Pressão de operação (N/mm²)	Distância média de queda (m)	Equipamento A			Equipamento B			Equipamento C			Equipamento D		
		% Massa distribuída	% Massa acumulada	Tempo para projeção (s)	% Massa distribuída	% Massa acumulada	Tempo para projeção (s)	% Massa distribuída	% Massa acumulada	Tempo para projeção (s)	% Massa distribuída	% Massa acumulada	Tempo para projeção (s)
0,50	0	0	0,00	8,3	0	0,00	7,9	0	0,00	6,4	0	0,00	6,8
	0,25	13,68	13,68		0,87	0,87		4,81	4,81		4,04	4,04	
	0,75	29,06	42,74		5,22	6,09		18,27	23,08		10,10	14,14	
	1,5	42,74	85,47		53,04	59,13		37,50	60,58		39,39	53,54	
	2,5	11,97	97,44		33,04	92,17		26,92	87,50		35,35	88,89	
	3,5	2,56	100,00		7,83	100,00		12,50	100,00		11,11	100,00	
0,63	0	0	0,00	9,1	0	0,00	8,0	0	0,00	7,6	0	0,00	6,1
	0,25	12,07	12,07		0,95	0,95		3,85	3,85		3,19	3,19	
	0,75	19,83	31,90		4,76	5,71		16,35	20,19		10,64	13,83	
	1,5	43,10	75,00		25,71	31,43		34,62	54,81		28,72	42,55	
	2,5	19,83	94,83		47,62	79,05		25,96	80,77		41,49	84,04	
	3,5	5,17	100,00		20,95	100,00		19,23	100,00		15,96	100,00	
0,77	0	0	0,00	6,5	0	0,00	7,1	0	0,00	6,9	0	0,00	6,0
	0,25	6,54	6,54		3,28	3,28		3,00	3,00		1,92	1,92	
	0,75	20,56	27,10		2,46	5,74		14,00	17,00		6,73	8,65	
	1,5	61,68	88,79		42,62	48,36		41,00	58,00		30,77	39,42	
	2,5	7,48	96,26		41,80	90,16		23,00	81,00		43,27	82,69	
	3,5	3,74	100,00		9,84	100,00		19,00	100,00		17,31	100,00	
0,91	0	0	0,00	5,8	0	0,00	6,5	0	0,00	6,3	0	0,00	5,4
	0,25	5,69	5,69		1,71	1,71		3,16	3,16		3,03	3,03	
	0,75	13,82	19,51		2,56	4,27		15,79	18,95		6,06	9,09	
	1,5	53,66	73,17		27,35	31,62		40,00	58,95		25,25	34,34	
	2,5	21,95	95,12		52,99	84,62		22,11	81,05		46,46	80,81	
	3,5	4,88	100,00		15,38	100,00		18,95	100,00		19,19	100,00	

➤ Argamassa Z – 15% de água – Compressor 68 m³/h

Pressão de operação (N/mm²)	Distância média de queda (m)	Equipamento A			Equipamento B			Equipamento C			Equipamento D		
		% Massa distribuída	% Massa acumulada	Tempo para projeção (s)	% Massa distribuída	% Massa acumulada	Tempo para projeção (s)	% Massa distribuída	% Massa acumulada	Tempo para projeção (s)	% Massa distribuída	% Massa acumulada	Tempo para projeção (s)
0,50	0	0	0,00	8,0	0	0,00	7,5	0	0,00	6,8	0	0,00	5,9
	0,25	14,17	14,17		2,34	2,34		4,27	4,27		3,57	3,57	
	0,75	37,80	51,97		4,69	7,03		15,38	19,66		13,39	16,96	
	1,5	40,94	92,91		54,69	61,72		40,17	59,83		50,89	67,86	
	2,5	6,30	99,21		31,25	92,97		28,21	88,03		25,89	93,75	
	3,5	0,79	100,00		7,03	100,00		11,97	100,00		6,25	100,00	
0,63	0	0	0,00	8,2	0	0,00	7,6	0	0,00	6,8	0	0,00	5,6
	0,25	7,63	7,63		1,61	1,61		2,80	2,80		2,75	2,75	
	0,75	30,53	38,17		4,03	5,65		12,15	14,95		6,42	9,17	
	1,5	45,80	83,97		39,52	45,16		41,12	56,07		41,28	50,46	
	2,5	12,98	96,95		43,55	88,71		25,23	81,31		37,61	88,07	
	3,5	3,05	100,00		11,29	100,00		18,69	100,00		11,93	100,00	
0,77	0	0	0,00	7,1	0	0,00	7,5	0	0,00	6,6	0	0,00	5,6
	0,25	6,45	6,45		1,83	1,83		4,00	4,00		2,94	2,94	
	0,75	22,58	29,03		1,83	3,67		16,00	20,00		5,88	8,82	
	1,5	48,39	77,42		27,52	31,19		40,00	60,00		30,39	39,22	
	2,5	17,74	95,16		51,38	82,57		22,00	82,00		42,16	81,37	
	3,5	4,84	100,00		17,43	100,00		18,00	100,00		18,63	100,00	
0,91	0	0	0,00	6,4	0	0,00	7,3	0	0,00	6,3	0	0,00	5,4
	0,25	4,76	4,76		1,71	1,71		3,85	3,85		3,03	3,03	
	0,75	14,29	19,05		3,42	5,13		13,46	17,31		5,05	8,08	
	1,5	52,38	71,43		26,50	31,62		40,38	57,69		24,24	32,32	
	2,5	23,02	94,44		51,28	82,91		22,12	79,81		44,44	76,77	
	3,5	5,56	100,00		17,09	100,00		20,19	100,00		23,23	100,00	

➤ Argamassa Z – 17% de água – Compressor 68 m³/h

Pressão de operação (N/mm²)	Distância média de queda (m)	Equipamento A			Equipamento B			Equipamento C			Equipamento D		
		% Massa distribuída	% Massa acumulada	Tempo para projeção (s)	% Massa distribuída	% Massa acumulada	Tempo para projeção (s)	% Massa distribuída	% Massa acumulada	Tempo para projeção (s)	% Massa distribuída	% Massa acumulada	Tempo para projeção (s)
0,50	0	0	0,00	7,3	0	0,00	6,6	0	0,00	6,2	0	0,00	5,4
	0,25	7,25	7,25		2,29	2,29		4,80	4,80		2,54	2,54	
	0,75	34,06	41,30		6,87	9,16		16,00	20,80		8,47	11,02	
	1,5	51,45	92,75		63,36	72,52		51,20	72,00		55,93	66,95	
	2,5	6,52	99,28		22,90	95,42		22,40	94,40		26,27	93,22	
	3,5	0,72	100,00		4,58	100,00		5,60	100,00		6,78	100,00	
0,63	0	0	0,00	6,5	0	0,00	6,9	0	0,00	5,7	0	0,00	5,5
	0,25	6,72	6,72		0,79	0,79		4,07	4,07		1,82	1,82	
	0,75	27,61	34,33		3,97	4,76		10,57	14,63		7,27	9,09	
	1,5	50,75	85,07		49,21	53,97		43,09	57,72		40,91	50,00	
	2,5	12,69	97,76		38,89	92,86		30,08	87,80		40,00	90,00	
	3,5	2,24	100,00		7,14	100,00		12,20	100,00		10,00	100,00	
0,77	0	0	0,00	6,2	0	0,00	6,4	0	0,00	6,2	0	0,00	5,1
	0,25	3,57	3,57		3,94	3,94		2,86	2,86		2,61	2,61	
	0,75	12,14	15,71		2,36	6,30		7,62	10,48		5,22	7,83	
	1,5	55,71	71,43		29,13	35,43		44,76	55,24		28,70	36,52	
	2,5	22,86	94,29		51,18	86,61		23,81	79,05		47,83	84,35	
	3,5	5,71	100,00		13,39	100,00		20,95	100,00		15,65	100,00	
0,91	0	0	0,00	5,8	0	0,00	6,6	0	0,00	5,7	0	0,00	5,5
	0,25	4,29	4,29		4,69	4,69		4,85	4,85		5,26	5,26	
	0,75	14,29	18,57		3,13	7,81		6,80	11,65		6,14	11,40	
	1,5	55,00	73,57		37,50	45,31		45,63	57,28		26,32	37,72	
	2,5	21,43	95,00		44,53	89,84		22,33	79,61		45,61	83,33	
	3,5	5,00	100,00		10,16	100,00		20,39	100,00		16,67	100,00	

Análise de Variâncias (ANOVA)

As tabelas a seguir apresentam a análise de variâncias (ANOVA) para verificação da influência dos fatores estudados (composição da argamassa, teor de água, equipamento de projeção e pressão de operação) nas variáveis medidas (tempo para projeção, energia específica de lançamento e perdas potenciais).

Os fatores cujo resultado de P foi maior do que 0,05 (para um intervalo de confiança de 95%) são os que **não** exerceram influência na variável em questão.

➤ Tempo para projeção

Fator	Graus de liberdade	F	P
Composição da argamassa	3	69,69	0,000
Teor de água	1	107,05	0,000
Equipamento de projeção	3	7,29	0,000
Pressão de operação	3	42,67	0,000
Erro	276		
Total	286		

➤ Energia específica de lançamento

Fator	Graus de liberdade	F	P
Composição da argamassa	3	22,65	0,000
Teor de água	1	2,86	0,092
Equipamento de projeção	3	119,07	0,000
Pressão de operação	3	316,68	0,000
Erro	276		
Total	286		

➤ Perdas potenciais

Fator	Graus de liberdade	F	P
Composição da argamassa	3	1,47	0,224
Teor de água	1	73,10	0,000
Equipamento de projeção	3	13,44	0,000
Pressão de operação	3	81,80	0,000
Erro	276		
Total	286		

As tabelas a seguir apresentam os resultados da análise de variância dos fatores estudados (composição da argamassa, teor de água e pressão de operação) para cada equipamento em particular.

➤ **Equipamento A**

Variável	Fator	Graus de liberdade	F	P
Tempo para projeção	Composição da argamassa	3	17,38	0,000
	Teor de água	1	55,00	0,000
	Pressão de operação	3	5,15	0,003
	Erro	70		
	Total	77		
Energia específica de lançamento	Composição da argamassa	3	8,38	0,000
	Teor de água	1	2,83	0,097
	Pressão de operação	3	77,68	0,000
	Erro	70		
	Total	77		
Perdas potenciais	Composição da argamassa	3	1,54	0,211
	Teor de água	1	66,30	0,000
	Pressão de operação	3	18,34	0,000
	Erro	70		
	Total	77		

➤ **Equipamento B**

Variável	Fator	Graus de liberdade	F	P
Tempo para projeção	Composição da argamassa	3	27,33	0,000
	Teor de água	1	28,48	0,000
	Pressão de operação	3	3,40	0,022
	Erro	72		
	Total	79		
Energia específica de lançamento	Composição da argamassa	3	9,66	0,000
	Teor de água	1	1,07	0,304
	Pressão de operação	3	25,85	0,000
	Erro	72		
	Total	79		
Perdas potenciais	Composição da argamassa	3	3,50	0,020
	Teor de água	1	12,48	0,001
	Pressão de operação	3	2,30	0,084
	Erro	72		
	Total	79		

➤ Equipamento C

Variável	Fator	Graus de liberdade	F	P
Tempo para projeção	Composição da argamassa	3	36,67	0,000
	Teor de água	1	26,21	0,000
	Pressão de operação	3	1,31	0,280
	Erro	53		
	Total	60		
Energia específica de lançamento	Composição da argamassa	3	9,84	0,000
	Teor de água	1	1,03	0,314
	Pressão de operação	3	15,05	0,000
	Erro	53		
	Total	60		
Perdas potenciais	Composição da argamassa	3	0,59	0,626
	Teor de água	1	11,56	0,001
	Pressão de operação	3	0,63	0,598
	Erro	53		
	Total	60		

➤ Equipamento D

Variável	Fator	Graus de liberdade	F	P
Tempo para projeção	Composição da argamassa	3	51,94	0,000
	Teor de água	1	42,39	0,000
	Pressão de operação	3	1,54	0,215
	Erro	52		
	Total	59		
Energia específica de lançamento	Composição da argamassa	3	5,46	0,002
	Teor de água	1	0,15	0,696
	Pressão de operação	3	77,17	0,000
	Erro	52		
	Total	59		
Perdas potenciais	Composição da argamassa	3	2,17	0,103
	Teor de água	1	14,18	0,000
	Pressão de operação	3	1,16	0,336
	Erro	52		
	Total	59		