



PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS ARGAMASSAS SOB COMPRESSÃO TRIAXIAL-ANÁLISE E PREVISÃO

G. Mohamad⁽¹⁾, P. B. Lourenço⁽²⁾, H. R. Roman⁽³⁾

⁽¹⁾ UMINHO - Departamento de Engenharia Civil, CAPES-MEC, Azurém, Cx. Postal 4800-058, Guimarães-Portugal- gihad@civil.uminho.pt

⁽²⁾ UMINHO - Departamento de Engenharia Civil, Azurém, Cx. Postal 4800-058, Guimarães-Portugal- pbl@civil.uminho.pt

⁽³⁾ UFSC - Departamento de Engenharia Civil, Cx. Postal 88049-900, Florianópolis - Brasil- humbertol@ecv.ufsc.br

RESUMO

O mecanismo de ruptura das alvenarias considera o bloco e a argamassa sob um estado de tensão biaxial e triaxial, respectivamente. Tentativas de simular computacionalmente o conjunto bloco/argamassa, esbarram no fato das propriedades mecânicas (módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson) não reproduzirem o complexo estado de tensões existente. Por isso, generalizações são adotadas a partir de testes uniaxiais. Este trabalho pretende discutir, comparativamente, os resultados experimentais do comportamento mecânico das argamassas obtidas por KHOO [1], ATKINSON [2] e MOHAMAD [3]. Nota-se, nos estudos analisados, que a relação entre a tensão e deformação da argamassa triaxial é fortemente não linear, cujo comportamento é caracterizado pelos seguintes modos: frágil, dúctil e bilinear. A proporção entre a tensão lateral e a resistência à compressão da argamassa confinada mostrou ser fortemente linear e os coeficientes angulares foram semelhantes. Nos estudos formulados por KHOO [1] e MOHAMAD [3], o módulo de elasticidade da argamassa confinada diminuiu com o aumento da tensão lateral, para o traço de argamassa 1:1:6, contrastando com os testes realizados por ATKINSON [2] que obteve um aumento do módulo de elasticidade tangente inicial. Estas evidências podem indicar rearranjos na configuração estável entre partículas que compõem a argamassa devido à porosidade, gerando um modo de ruptura por poro-colapso. Também, foi observado uma redução do coeficiente de Poisson das argamassas com o aumento das tensões laterais. Com isso, é proposto um modelo para a determinação da variação do Poisson, em função do aumento da proporção tensão/resistência.

Palavras-chave: Triaxial, Argamassa, Alvenaria Estrutural, compressão.

1 INTRODUÇÃO

As alvenarias quando submetidas a um carregamento vertical fazem surgir, na argamassa de assentamento, tensões horizontais devido a aderência existente entre a unidade e a junta, por consequência das deformações laterais impedidas (HAMID [4], CHEEMA [5] e AFSHARI [6]). Poucos estudos foram realizados para caracterizar o comportamento mecânico das argamassas à compressão triaxial juntamente com o modo de ruptura. Normalmente, nas simulações numéricas, as propriedades mecânicas, tais como módulo de elasticidade e Poisson, são considerados constantes ou se corrigem no intuito de retratar as não-linearidades do conjunto. Estudar o comportamento da argamassa é de fundamental importância para compreender os modos de ruptura das paredes (se por indução de tração no bloco ou por esmagamento da junta horizontal). Este trabalho pretende discutir os resultados experimentais de estudos mecânicos em argamassas confinadas, com vistas a uma descrição futura de um modelo comportamental para a alvenaria.

2 ESTUDOS DESENVOLVIDOS POR KHOO [1]

O primeiro pesquisador a verificar o comportamento triaxial de argamassas foi KHOO [1]. O autor estudou dois traços designados pelas seguintes proporções em volume: 1:1/4:3 e 1:1:6 (Cimento:Cal:Areia). Os fatores água/cimento eram 0,64 e 1,29 respectivamente. As argamassas foram confeccionadas em moldes cilíndricos e tinham um diâmetro de 3,8 centímetros e uma altura de 10,2 centímetros. A figura 1 mostra os resultados entre a resistência à compressão pela tensão confinante, juntamente com a equação da reta que representa a envoltória de ruptura.

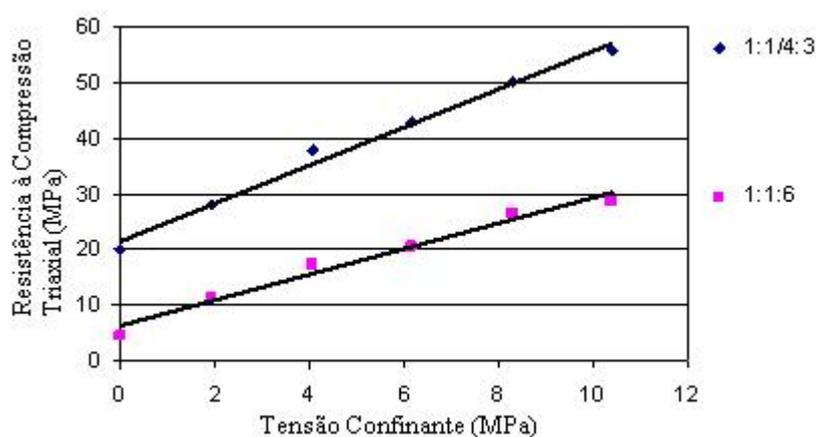


Figura 1 – Comportamento da argamassa sob tensões de confinamento.

KHOO [1] citou que, durante os testes, existiram dificuldades em se manter as pressões laterais constantes, devido às mudanças no volume das amostras, principalmente próximo à ruptura. Nota-se, um bom acordo entre a reta e os resultados experimentais obtidos por KHOO [1]. O módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson diminuíram de valor com o aumento da tensão confinante. Esta diminuição é mais sensível para o traço de argamassa 1:1:6, como pode ser visualizado na figura 2.

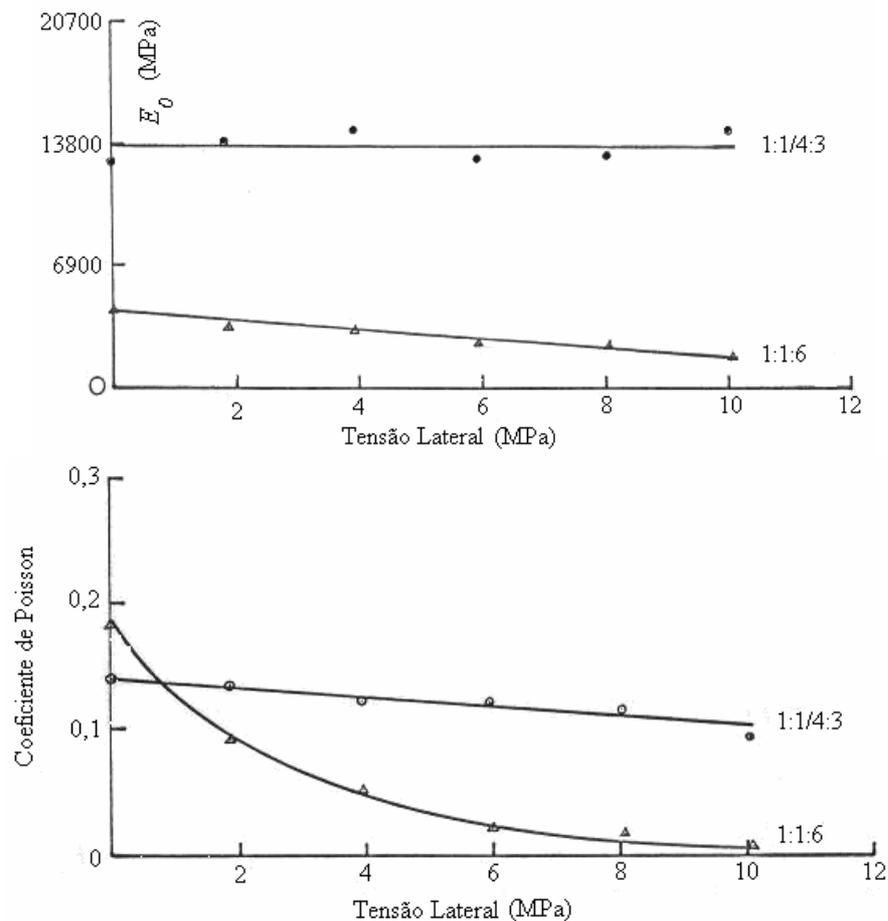


Figura 2 – Variação do módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson.

3 ESTUDOS DESENVOLVIDOS POR ATKINSON [2]

ATKINSON [2] realizou testes de compressão triaxial para quatro tipos de argamassas com seis diferentes níveis de tensões de confinamento. Na tabela 1, se pode observar as características dos traços de argamassas.

TABELA 1 – Traços experimentais de argamassas usados no estudo triaxial.

Traço	Resist. à comp. Uniaxial (MPa)	a/c	Tensões de confinamento aplicadas (MPa)
1:1/4:3	32,6	0,55	0,21; 0,69; 1,72; 3,44; 6,88; 10,31
1:1/2:4,5	26,4	0,85	“
1:1:6	13,7	1,19	“
1:2:9	3,4	1,96	“

A figura 3 mostra a envoltória de ruptura da argamassa confinada triaxialmente, juntamente com a equação que melhor representa os pontos.

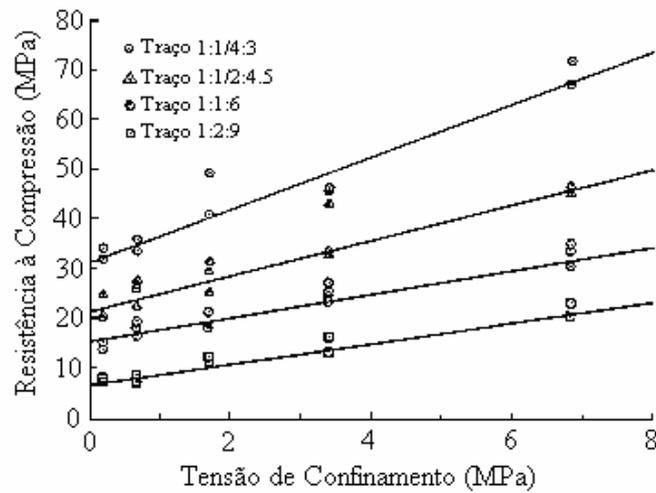


Figura 3 – Envoltória de ruptura da argamassa confinada.

De acordo com os resultados de ATKINSON [2], existe uma relação linear entre a resistência da argamassa e as tensões de confinamento. ATKINSON [2] analisou a curva tensão-deformação das argamassas para diferentes tensões laterais e concluiu que a mesma mostrava a transição do comportamento frágil para dúctil com o aumento da pressão confinante. As argamassas apresentaram um comportamento não-linear, para níveis de carregamento superior a 50% da carga última, como pode ser visto na figura 4.

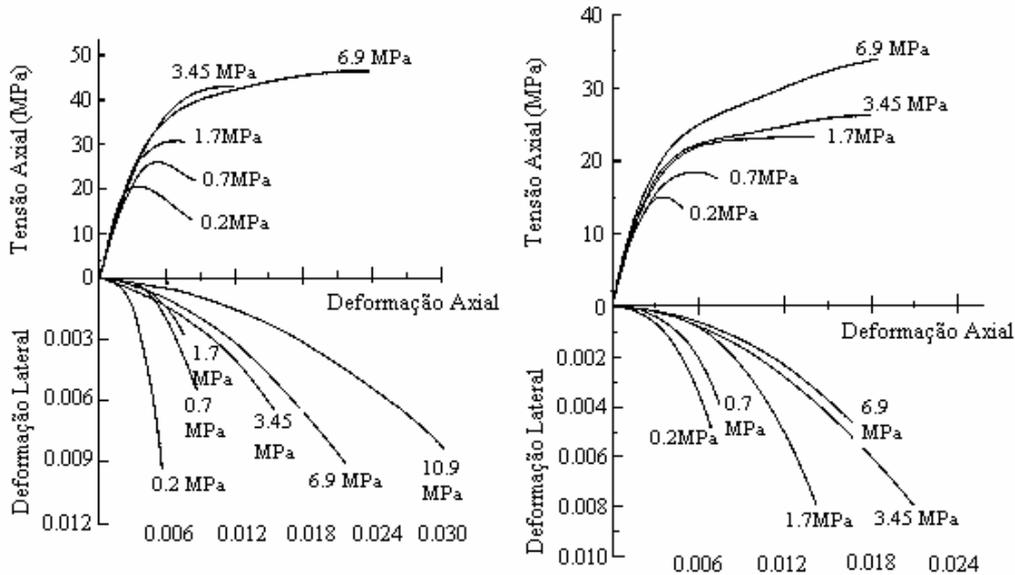


Figura 4 – Tensão-deformação axial e lateral para argamassas de traço 1:1/2:4.5 e 1:1:6.

ATKINSON [2] especificou três tipos de comportamento para a curva tensão-deformação: frágil, dúctil e bilinear. O caráter frágil é designado pela ruptura abrupta, ou seja, o material perde a capacidade resistente sem aviso. O caráter dúctil é especificado pelo desproporcional aumento das deformações. O caráter bilinear é caracterizado por uma mudança de direção da curva tensão-deformação. A argamassa

de traço 1:1/2:4,5 mostrou ter um comportamento frágil, para níveis de tensões laterais de: 0,2, 0,7 e 1,7 MPa. Nas demais tensões laterais (3,45, 6,9 e 10,9) apresentou características dúcteis. O traço 1:1:6 mostrou características frágeis para níveis de tensões de 0,2 e 0,7 MPa. Para o nível de tensão de 1,7 MPa, o caráter foi dúctil, sendo que nas demais tensões confinantes (3,45, 6,9 e 10,9 MPa) tiveram um caráter bilinear. A figura 5 mostra a variação do módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson confinado da argamassa.

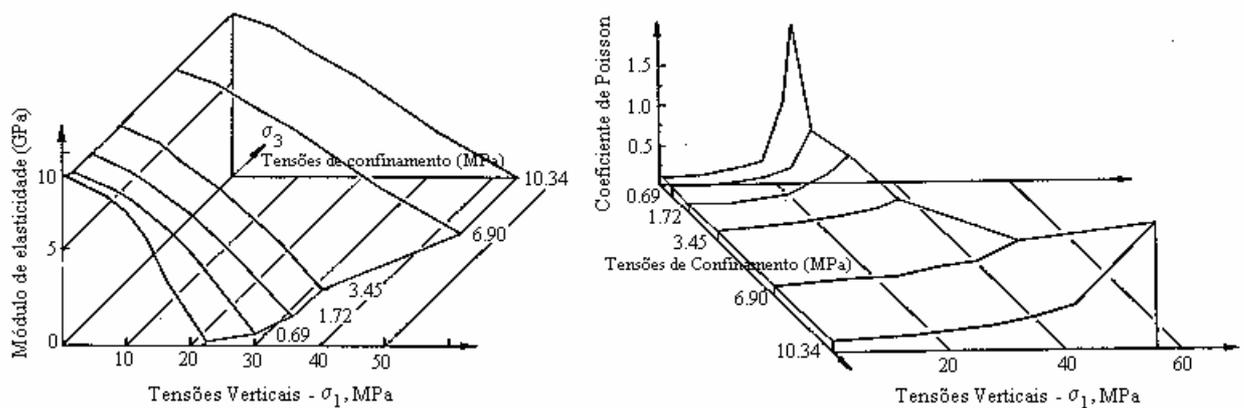


Figura 5 – Módulo de elasticidade e Poisson confinado para argamassa 1:1/2:4,5.

mostra a variação do módulo de elasticidade com o aumento das tensões de confinamento. Os resultados permitem concluir que, para o traço de argamassa 1:1/4:3 e 1:1/2:4,5, houve um aumento no módulo de elasticidade, em função da tensão confinante. Para os traços 1:1:6 houve uma diminuição no valor do módulo de elasticidade.

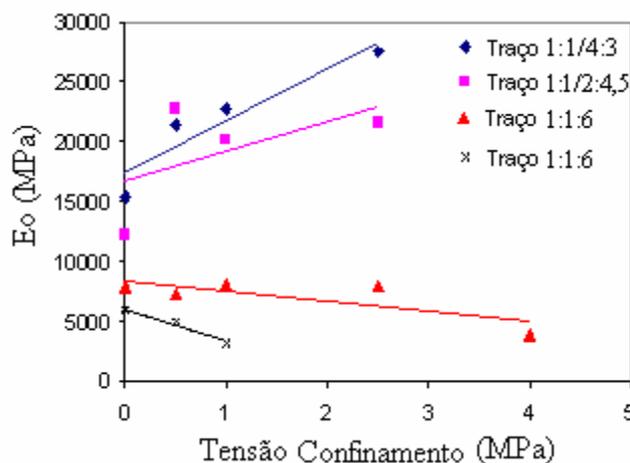


Figura 7 – Relação entre o módulo de elasticidade e as tensões de confinamento.

A tabela 2 mostra os resultados experimentais do Poisson em função das tensões laterais. Nota-se pelos resultados uma tendência do Poisson diminuir de valor em função da pressão confinante para níveis de tensões iniciais e finais.

TABELA 2 – Coeficiente de Poisson das argamassas confinadas.

Traço	Tensões laterais (MPa)	Coeficiente de Poisson	
		Nível de tensões iniciais	Nível de tensões finais
1:1/4:3	0; 0,5; 1	0,20	0,20
	2,5	0,10	0,10

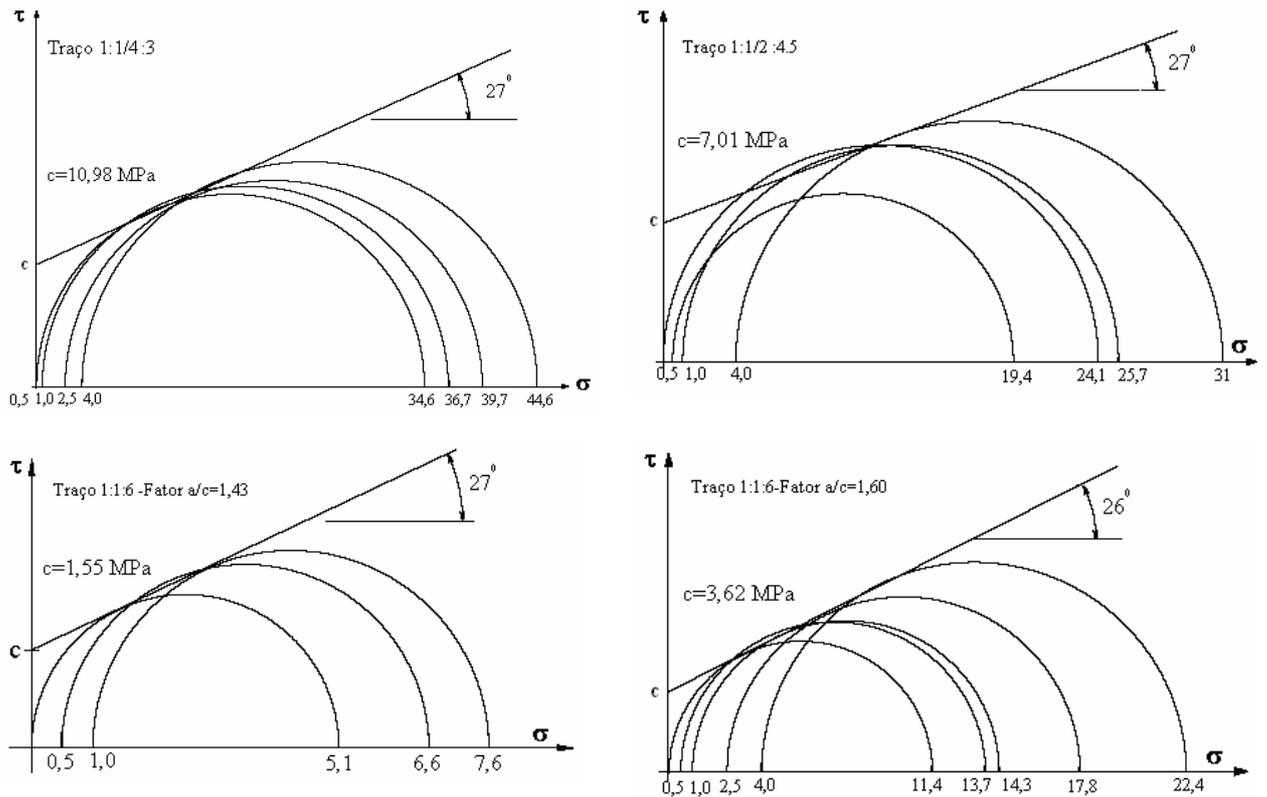


Figura 8 – Determinação do ângulo de atrito interno de argamassas confinadas.

Com os resultados da figura 8 se pode determinar a relação entre coesão e resistência da argamassa como mostra a figura 9.

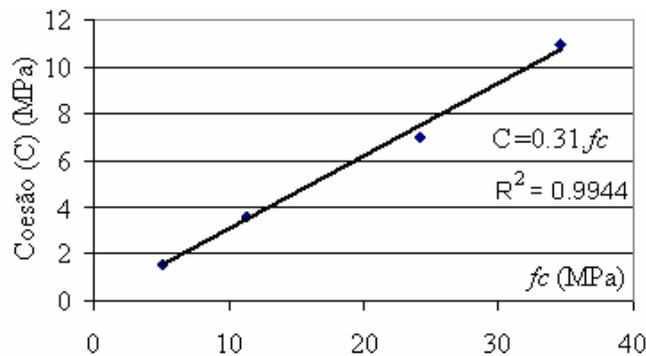


Figura 9 – Relação entre a coesão e a resistência à compressão das argamassas.

5 PREVISÃO DO POISSON EM FUNÇÃO DA TENSÃO CONFINANTE

5.1 Introdução

Descrever uma hipótese de comportamento para a variação do coeficiente de Poisson de argamassas sob compressão triaxial é uma tarefa bastante difícil, devido a variabilidade nos resultados. Por isso, é necessário compreender que, durante um ciclo de carga, acontece a transmissão das ações verticais para a junta de assentamento, onde

o efeito de aderência, nas interfaces, produz um aumento nas tensões horizontais internas até a perda da coesão material. A coesão da argamassa é uma variável que relaciona a capacidade máxima de alongamento ou encurtamento que uma partícula de agregado e seus ligantes podem suportar. Normalmente, nas simulações computacionais, o valor da coesão é designado a partir de testes experimentais sob combinação de tensões de tração e compressão em várias direções e o posterior traçado do círculo de Mohr com a correspondente envoltória de Coulomb. No caso de alvenarias, a perda de coesão deve ser analisada de duas maneiras: na interface dos materiais devido à aderência, por atingir a tensão limite de cisalhamento e, por consequência, do poro-colapso da estrutura interna da argamassa. O pouco conhecimento de critérios relativos à distribuição e configuração da micro-estrutura dos materiais que compõem a junta de assentamento, se deve pela dificuldade em compreender e provar experimentalmente estes fenômenos.

Argamassas são composições, onde a porosidade é dependente do fator água/cimento, diâmetro máximo do agregado e distribuição granulométrica dos grãos de areia. Estudos específicos do teor de cimento e cal, porosidade e exsudação nos traços de argamassa, possivelmente ajudariam a compreender o efeito de coesão entre as partículas de areia e os materiais ligantes. Isto, possibilitaria entender o poro-colapso e, portanto, explicar a diminuição no valor do módulo de elasticidade e Poisson das argamassas obtido por KHOO [1] e MOHAMAD [3].

HAYEN [7] submeteu argamassas constituídas de areia e cal, com resistência à compressão uniaxial de aproximadamente 1,85 MPa, a ensaios triaxiais. A proporção das tensões horizontais em relação a tensão vertical aplicada era denominada de k , cujos valores foram de: 0, 0,15 e 1. A análise obtida do material, para um estado de tensões multiaxiais, permitiu as seguintes conclusões: as análises das deformações volumétricas sob carregamento triaxial evidenciaram para $k < 0,25$, a existência de um mecanismo de ruptura por cisalhamento. Inicialmente ocorreu uma diminuição no volume da amostra, provavelmente gerado pelo fechamento de fissuras e defeitos internos na argamassa, passando por um aumento de volume tão logo isto aconteça. Portanto, surge uma rede de micro-fissuras que se propagam desenvolvendo as bandas de cisalhamento; quando a proporção $k \geq 0,25$, a ruptura da argamassa não coincidiu com um aumento no volume, ao contrário, foram verificadas reduções constantes e evidências que indicavam ruptura característica de poro-colapso. HAYEN [7] evidenciou um mecanismo de poro colapso em argamassa de areia e cal através da medição do volume total de poros por submersão em vácuo, da análise da estrutura porosa por intrusão de mercúrio e via microscópio eletrônico de varredura. Os ensaios efetuados por KHOO [1], ATKINSON [2] e MOHAMAD [3] mostraram alterações na estrutura interna da argamassa, sob condições triaxiais, para proporção σ_h/σ_v acima de 0,5.

5.2 Previsão do comportamento do Poisson

OTTOSEN [8] propôs um modelo constitutivo para concretos de alta resistência baseado na elasticidade não-linear. O modelo consiste em estabelecer patamares de variação do coeficiente de Poisson, em função do aumento do índice de não-linearidade- β (proporção entre a tensão aplicada pela resistência última). Quando este atingir o valor β_I , começa a haver um aumento significativo no Poisson. Este modelo apresenta um valor inicial uniaxial (ν_i^a) constante, até uma proporção entre tensão e resistência última (β_I) ser igual 0,8. A partir disto, se tem um aumento significativo até β ser igual a 1, onde atinge o máximo valor para o Poisson (ν_f^a). Para

concretos de alta resistência (60 a 120 MPa), o aumento da tensão lateral não influencia significativamente no valor do Poisson até próximo à ruptura devido a proporção máxima aplicada na tensão lateral, em relação à resistência última do corpo-de-prova, ser de 10 à 20% da resistência última da amostra. As argamassas, ao contrário do concreto, possuem um nível de resistência na faixa dos 2 à 10 MPa, conforme o tipo de unidade utilizado. Para estes casos, o aumento nas tensões laterais confinantes é significativo em relação à resistência última da argamassa, pois chegam a atingir proporções entre 50 à 100 % da resistência última da amostra.

Os testes realizados por KHOO [1], ATKINSON [2], MOHAMAD [3] e HAYEN [7] destacam a modificação gradativa do coeficiente de Poisson com o aumento da tensão lateral. Portanto, uma proposta de modificação, ao longo do carregamento, pode ser visualizada na figura 10. As trajetórias para o Poisson podem ser “a” e “b”. A trajetória “a” é caracterizada pela diminuição gradativa do Poisson até atingir β_l , onde acontece o aumento progressivo do mesmo por razão do desenvolvimento de bandas de cisalhamento na argamassa. A trajetória “b” é caracterizada pela diminuição gradativa do Poisson até atingir β_l , onde acontece o aumento instantâneo do Poisson por razão do esmagamento localizado da junta de assentamento (poro-colapso). A linha pontilhada é a modificação do modelo de OTTOSEN [8].

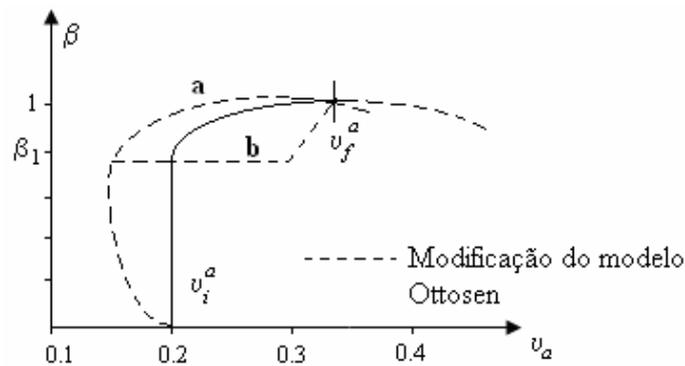


Figura 10 – Modificação do modelo de OTTOSEN [8] para argamassas confinadas.

Então, as expressões que representam o comportamento da trajetória “a” do Poisson são apresentadas nas equações (1) e (2).

$$\nu^a = (\nu_i^a).e^{-\beta} \quad \text{Se, } \beta \leq \beta_l, \quad (1)$$

$$v^a = (v_i^a).e^{-\beta} \quad \text{Se, } \beta \leq \beta_l, \quad (3)$$

$$v^a = (v_i^a).e^{\beta} \quad \text{Se, } \beta > \beta_l \quad (4)$$

6 CONCLUSÃO

- Nos estudos analisados, houve um comportamento linear entre o aumento da resistência à compressão com o incremento da tensão confinante. Esta envoltória foi expressa por uma relação linear de Coulomb com coeficientes angulares próximos.

- Nos estudos formulados por KHOO [1] e MOHAMAD [3], o módulo de elasticidade tangente inicial da argamassa confinada diminuiu com o aumento da tensão lateral, para a argamassa de traço 1:1:6. ATKINSON [2] obteve um aumento no valor do módulo de elasticidade com o incremento da tensão lateral, para os traços de argamassas 1:1/4:3 e 1:1/2:4,5. Para o traço 1:1:6 e 1:2:9, o módulo de elasticidade se manteve constante.

- A pressão de confinamento tem uma forte influência na magnitude e variação do módulo de elasticidade e Poisson.

- Notou-se uma significativa redução do Poisson das argamassas, com o aumento nas tensões laterais nos estudos de KHOO [1], ATKINSON [2] e MOHAMAD [3]. Esta diminuição aparenta ser exponencial para traços de argamassas fracas (1:1:6 e 1:2:9). Já para as argamassas fortes (1:1/4:3 e 1:1/2:4,5) a variação do Poisson, com o aumento da tensão confinante, aparenta ter um comportamento linear. Isto pode ser de significativa importância para a descrição de modelos de ruptura de paredes à compressão.

- As propriedades mecânicas das argamassas de traço 1:2:9 e 1:1:6 mudam, significativamente, sob altas pressões laterais, ou seja, a diminuição do Poisson destas argamassas foram acompanhadas pela diminuição do módulo de elasticidade, sugerindo, como hipótese, uma redistribuição no arranjo estável dos grãos internos da argamassa.