

Comportamento experimental do concreto simples sob fluência de curto prazo em compressão uniaxial e sua relação com a mudança de rigidez.

B. T. Terán-Torres¹ , C. A. Juárez-Alvarado¹ , J. M. Mendoza-Rangel¹ ,
I. Flores-Vivian¹ , D. Cavazos-de Lira¹ , R. Hermosillo-Mendoza¹ ,
M. D. Bojórquez-Calles¹, L. G. López-Yépez^{1*} 

* Autor de Contato: llopezy@uanl.edu.mx

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v15i3.836>

Recebido: 05/06/2025 | Correções recebidas: 07/08/2025 | Aceito: 13/08/2025 | Publicado: 01/09/2025

RESUMO

Nesta investigação, foram testadas amostras sob carga mantida de compressão axial para obter o comportamento por fluxo plástico a curto prazo, ou seja, com duração de uma hora. As amostras foram submetidas a diversas cargas (20%, 50% e 80% da sua capacidade) em diversas idades (7, 28 e 90 dias), registrando-se a deformação longitudinal e transversal ao longo do tempo. Posteriormente, as amostras foram testadas até a falha, obtendo-se o gráfico tensão-deformação, a resistência à compressão e o módulo de elasticidade. Verificou-se que nas amostras submetidas a 20%, a resistência e o módulo de elasticidade aumentam ligeiramente, enquanto nas amostras submetidas a 50% e 80%, a capacidade e o módulo de elasticidade diminuem, para todas as idades.

Palavras-chave: fluxo de plástico não linear; concreto simples; mudança de rigidez; carga sustentada.

Citar como: Terán-Torres, B. T., Juárez-Alvarado, C. A., Mendoza-Rangel, J. M., Flores-Vivian, I., Cavazos-de Lira, D., Hermosillo-Mendoza, R., Bojórquez-Calles, M. D., López-Yépez, L. G. (2025), “Comportamento experimental do concreto simples sob fluência de curto prazo em compressão uniaxial e sua relação com a mudança de rigidez.”, Revista ALCONPAT, 15 (3), pp. 315 – 334, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v15i3.836>

¹ Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Civil, Av. Universidad S/N, Cd. Universitaria, San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México.

Contribuição de cada autor

Neste trabalho, os autores C. A. Juárez-Alvarado e B. T. Terán-Torres contribuíram com a ideia original e o planejamento da experimentação, 50% cada. L. G. López-Yépez, J. M. Mendoza-Rangel, I. Flores-Vivian e R. Hermosillo-Mendoza contribuíram igualmente para a redação, preparação das tabelas e figuras, bem como a discussão dos resultados, 25% cada. M. D. Bojórquez-Calles e D. Cavazos-de Lira realizaram a experimentação e a coleta de dados, 50% cada.

Licença Creative Commons

Copyright (2025) é propriedade dos autores. Este trabalho é um artigo de acesso aberto publicado sob os termos e condições de uma Licença Internacional Creative Commons Atribuição 4.0 ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discussões e correções pós-publicação

Qualquer disputa, incluindo as respostas dos autores, será publicada na segunda edição de 2026, desde que a informação seja recebida antes do fechamento da primeira edição de 2026.

Experimental behavior of plain concrete under short-term creep in uniaxial compression and its relation to stiffness change.

ABSTRACT

In this study, specimens were tested under sustained axial compression loads to obtain their short-term creep behavior, i.e., over a period of one hour. The specimens were subjected to various loads (20%, 50%, and 80% of their capacity) at various ages (7, 28, and 90 days), recording the longitudinal and transverse strain over time. Subsequently, the specimens were tested to failure, obtaining the stress-strain curve, compressive strength, and modulus of elasticity. It was found that the specimens subjected to 20% load showed a slight increase in capacity and modulus of elasticity, while those subjected to 50% and 80% loads showed a decrease in capacity and modulus of elasticity for all ages.

Keywords: nonlinear creep; plain concrete; stiffness change; sustained load.

Comportamiento experimental del concreto simple bajo flujo plástico a corto plazo en compresión uniaxial y su relación con el cambio de rigidez.

RESUMEN

En esta investigación se ensayaron especímenes bajo carga sostenida a compresión axial para obtener el comportamiento por flujo plástico a corto plazo, esto es, duración de una hora. Los especímenes fueron sometidos a diversas cargas (20%, 50% y 80% de su capacidad) a diversas edades (7, 28 y 90 días), registrándose la deformación longitudinal y transversal en el tiempo. Posteriormente, los especímenes fueron ensayados a la falla, obteniéndose la gráfica esfuerzo-deformación, la capacidad a compresión y módulo de elasticidad. Se encontró que los especímenes sometidos al 20%, la capacidad y el módulo de elasticidad se incrementan ligeramente, mientras que en especímenes sometidos al 50% y 80%, su capacidad y módulo de elasticidad decrecen, para todas las edades.

Palabras clave: flujo plástico no lineal; concreto simple; cambio de rigidez; carga sostenida.

Informações legais

Revista ALCONPAT é uma publicação trimestral da Associação Latino-Americana de Controle de Qualidade, Patologia e Recuperação de Construção, Internacional, A.C., Km. 6, antiga estrada para Progreso, Merida, Yucatán, C.P. 97310, Tel. +52 1 983 419 8241, alconpat.int@gmail.com, Website: www.alconpat.org

Reserva de direitos de uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos concedidos pelo Instituto Nacional de Direitos Autorais. Editor responsável: Dr. Pedro Castro Borges. Responsável pela última atualização deste número, Unidade de Informática ALCONPAT, Eng. Elizabeth Sabido Maldonado.

As opiniões expressas pelos autores não refletem necessariamente a posição do editor.

A reprodução total ou parcial do conteúdo e das imagens da publicação é realizada de acordo com o código COPE e a licença CC BY 4.0 da Revista ALCONPAT.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, o concreto é um material fundamental na indústria da construção, graças à sua facilidade de fabricação, viabilidade e adaptabilidade a múltiplas aplicações. Por isso, tem sido amplamente utilizado na construção de diversas estruturas, incluindo edifícios, pontes, barragens e outras obras de engenharia civil. No entanto, sua natureza composta e comportamento quase frágil complicam a previsão precisa de sua resposta mecânica a diferentes tensões.

Ao focar a atenção nas estruturas, todas estão sujeitas a demandas semelhantes, ou seja, cargas cíclicas e cargas mantidas. Por exemplo, no caso de edifícios, as cargas mantidas são resultado de cargas permanentes, enquanto as cargas cíclicas podem ser resultado de forças acidentais como vento e terremotos, ou mesmo a variabilidade de cargas vivas, embora em menor grau. No caso específico de terremotos, essas cargas podem gerar ciclos com uma alta faixa de tensões (fadiga de alto ciclo) (Zhongs and Deierlein, 2019). Por outro lado, as pontes são submetidas a cargas mantidas de longa duração resultantes da carga permanente, enquanto a carga viva gera ciclos de tensão (Zhou and Chen, 2024). Finalmente, no caso de barragens, as cargas mantidas são resultado do seu próprio peso e da pressão hidrostática, enquanto as cargas cíclicas são resultado de ondas causadas por terremotos ou vento (Ouzandja et al., 2023). Portanto, para analisar essas e outras estruturas, é possível propor modelos constitutivos que possam prever os efeitos de cargas mantidas e cíclicas simultaneamente. Infelizmente, a maioria dos modelos constitutivos atuais quantifica apenas o comportamento desacoplado de cargas cíclicas e mantidas (Terán-Torres et al., 2024). Isso pode ser uma desvantagem, pois pode levar a erros na estimativa da vida residual de uma estrutura existente ou causar erros de projeto em sua fase inicial.

No caso específico de pontes, pesquisas anteriores (Bazant et al., 2010; Bazant et al., 2011) mostraram que modelos existentes que consideram apenas a ação de cargas mantidas (fluência) tendem a subestimar as deformações a longo prazo, especialmente em estruturas com grandes vãos. Essa discrepância tem sido associada à interação entre cargas mantidas e repetidas, um fenômeno identificado como fluência cíclica. Para abordar esta questão, Bazant e Hubler (2014) propuseram uma teoria de fluência cíclica baseada nos princípios da mecânica da fratura elástica linear. Os resultados obtidos com esta formulação revelaram que este efeito combinado influencia negativamente as deformações a longo prazo de pontes com vãos intermediários entre 40 e 80 m. No entanto, esta teoria assume que o concreto se comporta como um material elástico linear e não é baseada em uma abordagem constitutiva termodinâmica rigorosa, o que poderia levar a inconsistências físicas durante a fase de análise estrutural. Consequentemente, há uma clara necessidade de desenvolver modelos constitutivos mais avançados e representativos para melhorar a previsão destes efeitos.

Por essa razão, em pesquisas anteriores (Terán-Torres et al., 2024), foi desenvolvido um modelo constitutivo para prever a fluência cíclica, baseado na teoria termodinâmica constitutiva, na mecânica do dano contínuo (Murakami e Kamiya, 1997) e na teoria da solidificação para materiais envelhecidos (Bazant e Prasannan, 1989; Bazant e Heut, 1999). Este modelo quantifica a mudança nas propriedades mecânicas com a idade e considera os efeitos da fluência de curto e longo prazo separadamente, dividindo a deformação em dois termos: um viscoelástico e o outro como um fluido viscoso, respectivamente. O modelo teórico demonstrou potencial durante sua aplicação teórica, pois é baseado em conceitos fundamentais da física. Da mesma forma, a teoria do dano contínuo permite que a fissuração seja caracterizada de forma muito mais próxima da realidade do concreto, e com a viabilidade de ser implementada em aplicações de carga cíclica. Além disso, é baseado em uma sólida teoria matemática, ou seja, equações integrais de Volterra, que tem a vantagem de ser facilmente implementada numericamente (Linz, 1985). No entanto, para definir os parâmetros dos modelos constitutivos, são necessários ensaios em concreto-simples sob várias condições de carga. Especificamente, para o modelo constitutivo considerado (Terán-Torres et al., 2024), para a

fluência de curto prazo, são necessários ensaios de tração, compressão e cisalhamento puro sob carga mantida de curto prazo.

Para o fluxo de longo prazo, ensaios semelhantes são necessários em um período prolongado. Por fim, são necessários ensaios adaptados aos parâmetros associados à fluência cíclica. Em estudos anteriores, sob cargas de compressão mantidas, verificou-se que a deformação por fluência aumenta diretamente com o aumento do nível de tensão aplicado e que o uso de aditivos redutores de água não teve um efeito significativo nas deformações (Collins, 1989; Neville, 2011). Foi encontrada uma aceleração marcante na microfissuração quando o concreto é submetido a uma tensão superior a 50% de f'_c (Loo, 1992; Tang et al., 2020). O efeito da umidade relativa nas deformações por fluência e retração em misturas de concreto foi considerado insignificante. No entanto, a influência da umidade relativa na retração por secagem é definitiva (Vandewalle, 2000). Da mesma forma, foi constatado que corpos de prova completamente secos exibem uma fluência maior do que os corpos de prova de referência saturados (Tamtsia et al., 2000). Mazzotti e Savoia (2001, 2002) provaram que, em níveis de tensão médios, a tensão necessária para gerar deformação por fluência é menor do que o limite previsto. Eles também demonstraram que o coeficiente de Poisson na fluência depende do nível de tensão. Rossi et al. (2012) demonstraram que a deformação por fluência é proporcional ao número total de microfissuras criadas no material. Da mesma forma, quanto maior o nível de carga, maior a densidade de microfissuras criadas. Essa criação de microfissuras durante o carregamento estático é a origem da fluência. Mei *et al.* (2017) descobriram que, quando a idade ou a duração da carga é mantida constante, sua aplicação reduzirá a proporção de fluência recuperável. Esse efeito na resistência do concreto se torna maior com o aumento da idade da carga e diminui gradualmente com o aumento da duração da carga. Foi constatado que a fluência do concreto não depende apenas de cargas constantes ou mantidas. A deformação durante o processo de carregamento também contém um componente de deformação dependente do tempo, que não pode ser tratado como uma deformação instantânea ou inicial, e que a idade da carga, a duração da carga e a resistência do concreto na idade da carga não têm uma influência óbvia no coeficiente de recuperação inicial. Além disso, o coeficiente de recuperação inicial diminui quando a razão entre a tensão-resistência e o tempo de carga é aumentada (Su et al., 2017; Chen et al., 2019).

De acordo com a norma ASTM C512 (2002), as idades recomendadas para ensaios de fluência são 2, 7, 28 e 90 dias. Outros estudos utilizaram idades variadas, a saber: Iravani e MacGregor (1998) e Zhaozia (1994): 28 dias; Mazzotti e Savoia (2002): 7, 28 e 60 dias; Anker *et al.* (1998): 1, 3, 7, 28, 90 dias, 1 ano e 3 anos; Pan et al. (2022): 7, 28, 90 e 360 dias.

Similarmente, os ensaios de fluência são recomendados para serem realizados em diferentes níveis de tensão (ou seja, baixo, médio e alto). O nível de tensão baixo, limitado a tensões abaixo de 40% da resistência à compressão (Mazzotti e Savoia, 2002), gera deformações que não causam danos significativos (fissuração). Em níveis de tensão médios (ou seja, 50% da capacidade), o número de fissuras aumenta, fazendo com que a deformação perca sua proporcionalidade. Pan et al. (2022) conduziram ensaios em vários níveis de tensão, incluindo aqueles no nível médio. Finalmente, para níveis de tensão altos, Zhaozia (1994) usou tensões de 83, 85, 90 e 95%, e Shah e Chandra (1970) usaram tensões de cerca de 60, 70, 80 e 90% da capacidade.

Esta pesquisa foca na primeira etapa em ensaios de corpos de prova cilíndricos sob carga mantida, em compressão uniaxial, para obter o comportamento do material sob fluência de curto prazo, ou seja, com duração de uma hora. Com base nisso, os corpos de prova cilíndricos foram submetidos a diversas cargas (20%, 50% e 80% de sua capacidade final) em diferentes idades (7, 28 e 90 dias) para obter a relação de deformação vs. tempo para a deformação longitudinal e transversal. Após o intervalo de 1h, os corpos de prova foram ensaiados até a ruptura para determinar a curva tensão-deformação, sua resistência à compressão e seu respectivo módulo de elasticidade. A pesquisa se concentra nos ensaios necessários para se obter os parâmetros experimentais do modelo

constitutivo mencionado para a fluência associada à deformação viscoelástica-viscoplástica e danos de curto prazo, ou seja, as funções de relaxamento do material para vários níveis de tensão e idades.

2. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

2.1 Materiais

Foram utilizados cimento Portland Tipo CPC 30R, agregado graúdo com tamanho máximo de 19 mm e areia N4, de acordo com a norma ASTM C33 (2018). Os agregados são de calcário, típicos da região de Monterrey, com densidade relativa de 2,59 g/cm³ e 2,71 g/cm³, e uma porcentagem de absorção de 0,72 e 1,82, para agregados graúdos e miúdos, respectivamente. A mistura de concreto foi dosada usando o ACI-211 (2022), visando uma resistência de projeto de $f'_c = 25$ MPa, que é uma resistência comumente utilizada para estruturas convencionais na área de Monterrey, N.L. A dosagem em massa seca da mistura utilizada para os ensaios de fluência por metro cúbico consistiu em 302 kg de cimento, 227 kg de água, 945 kg de agregado graúdo e 820 kg de agregado miúdo.

2.2 Moldagem e ensaios em corpos de prova

Foram moldados 36 (trinta e seis) corpos de prova cilindros com 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura para ensaios de resistência à compressão, em conformidade com as normas ASTM C192 (2024), ASTM C143 (2020), ASTM C39 (2021) e ASTM C617 (2009). Destes, 9 (nove) corpos de prova foram ensaiados nas idades de 7, 28 e 90 dias, para determinação e controle da resistência à compressão nessas idades. Os 27 (vinte e sete) restantes foram ensaiados para fluência sob tensão mantida. Destes 27 (vinte e sete) corpos de prova, 9 (nove) foram ensaiados aos 7 dias com uma tensão mantida de 20%, 50% e 80% [ou seja, 3 (três) para cada nível de tensão], 9 (nove) corpos de prova foram ensaiados aos 28 dias e 9 (nove) aos 90 dias, sob os mesmos níveis de tensão. A Figura 1 evidencia alguns dos corpos de prova cilíndricos moldados.



Figura 1. Moldagem e preparação de corpos de prova cilíndricos com 150 mm de diâmetro x 300 mm de altura.

A tensão foi aplicada nos corpos de prova por meio de uma estrutura de carga e um macaco hidráulico Enerpac, operado manualmente com capacidade de 100 t. A carga de compressão foi sustentada por 1 hora (Mazzotti e Savoia, 2002), mantida constante pela operação contínua do macaco hidráulico ao longo do ensaio, garantindo que a variação não excedesse os limites estabelecidos na norma ASTM C512 (2002) e em (Iravani e MacGregor, 1998), por ser um mecanismo manual. As deformações longitudinais e transversais foram medidas usando quatro transdutores de diferença variável linear (LVDTs) de 100 mm de curso, baseados no princípio de ponte de Wheatstone (dois LVDTs Novotechnik modelo TRS para deformações longitudinais e

dois LVDTs Tokyo Sokki Kenkyujo modelo CDP-10 para deformações transversais). É importante notar que, antes do ensaio, foi realizada uma análise comparativa entre extensômetros e LVDTs, com estes últimos proporcionando melhores resultados de medição. Uma célula de carga modelo PT HCC-180 com capacidade de 180 t foi utilizada para registrar a carga. Os dados de deformação e carga foram coletados usando um sistema de aquisição de dados National Instruments PXIe-1065. A Figura 2 mostra a instrumentação dos corpos de prova cilíndricos para a execução dos ensaios de fluência.

Após ensaiar os corpos de prova nas condições de carga mantida para determinar a fluência de curto prazo (ou seja, 1 h), os corpos de prova foram imediatamente ensaiados até a falha (ruptura) usando uma máquina de ensaio universal Instron modelo 600DX com capacidade de 60 t, onde as deformações foram medidas usando um par de LVDTs. Isso foi feito para medir a degradação da rigidez das amostras, ou seja, através da alteração no módulo de elasticidade e na resistência à compressão. O módulo de elasticidade foi calculado de acordo com a norma ASTM C469 (2014).



Figura 3. Configuração da instrumentação para ensaios de fluência de curto prazo por compressão mantida

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Resultados experimentais de fluência sob compressão mantida

Com base na metodologia experimental descrita, foram obtidos resultados para as diferentes idades e níveis de tensão considerados. Primeiramente, a Figura 3 mostra as porcentagens médias de tensão aplicadas nos corpos de prova em várias idades. Da mesma forma, para os corpos de prova ensaiados aos 7 dias de idade, sob níveis de tensão de 20% de sua resistência à compressão, foi obtida uma deformação longitudinal média de $1,2 \times 10^{-4}$, que foi a deformação obtida até que o nível de tensão exigido fosse alcançado. Após uma hora, a deformação longitudinal foi medida em $1,42 \times 10^{-4}$. De forma similar, a deformação transversal média foi de $3,2 \times 10^{-5}$ e $3,5 \times 10^{-5}$ quando o nível de tensão foi atingido e após uma hora, respectivamente. Analogamente, para o nível de tensão de 50% da resistência à compressão, as deformações longitudinais e transversais registradas no início e no final do ensaio foram da ordem de $2,24 \times 10^{-4}$, $3,84 \times 10^{-4}$, $9,9 \times 10^{-5}$ e $1,09 \times 10^{-4}$ respectivamente.

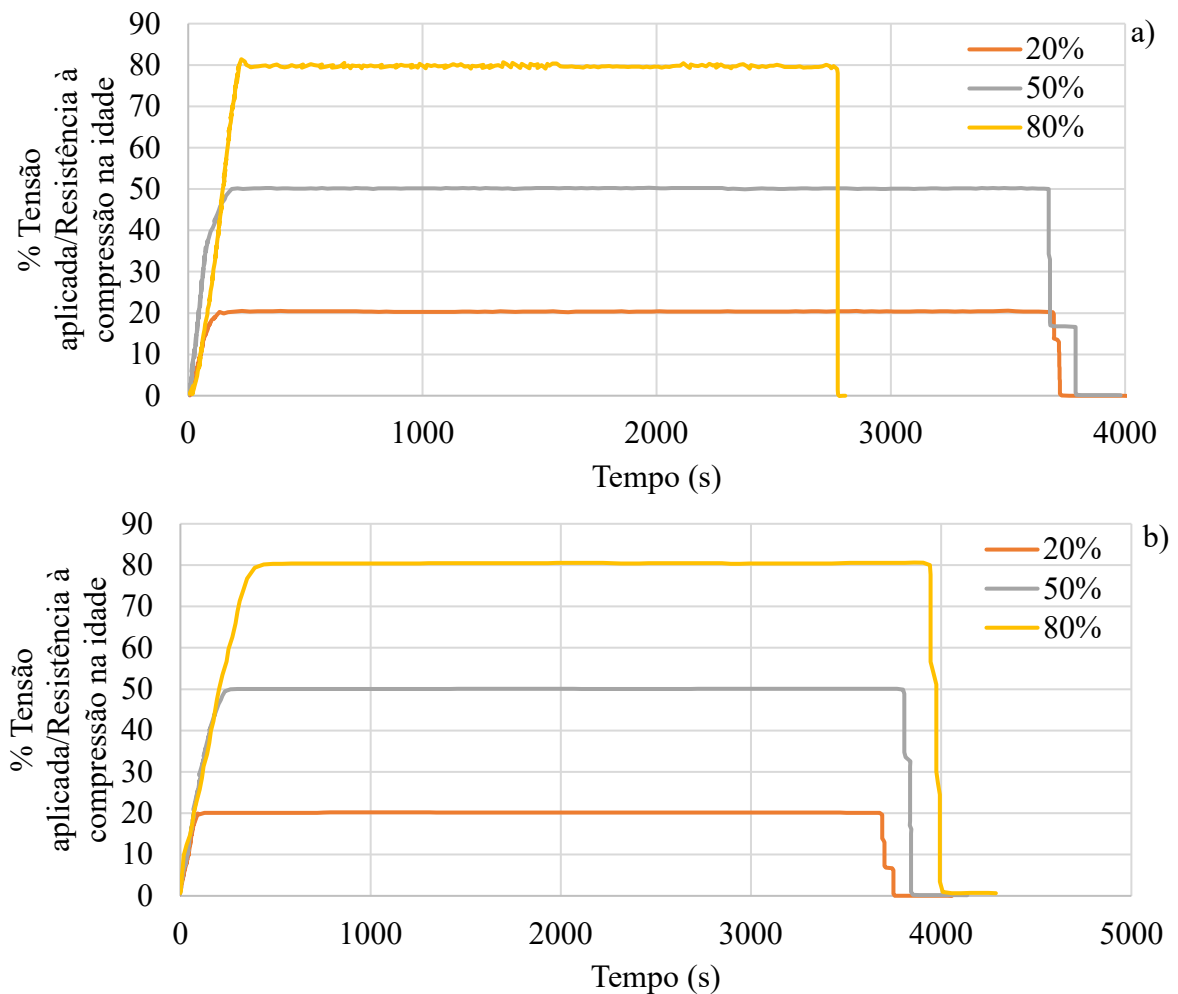


Figura 3. Porcentagem de tensão aplicada vs. resistência à compressão em várias idades, a) 7 dias, b) 28 e 90 dias.

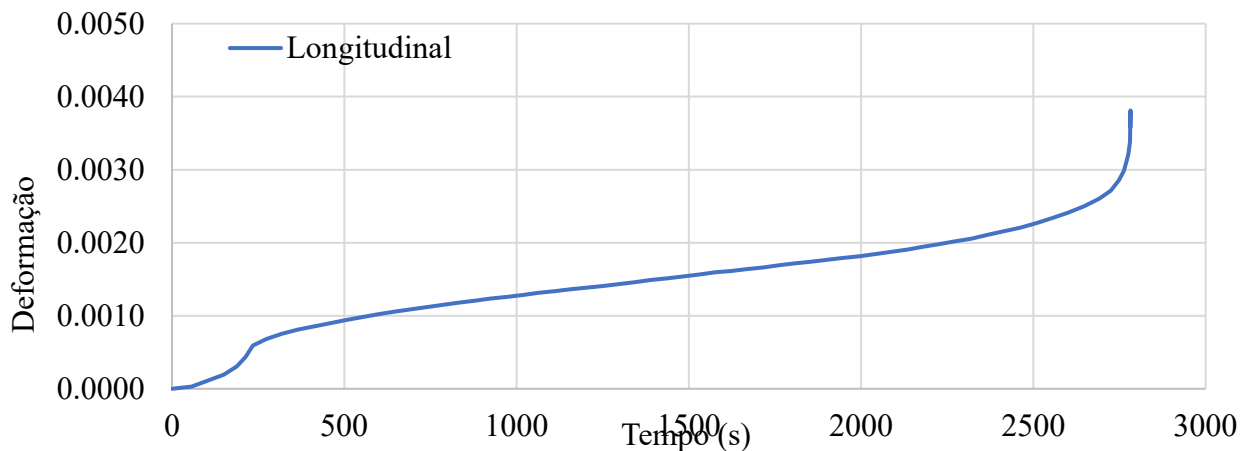


Figura 4. Deformação longitudinal ao longo do tempo em corpos de prova com idade de 7 dias, submetidos a uma carga de compressão mantida de 80% de sua capacidade.

Para a idade de 7 dias e compressão mantida a 80% da capacidade, a Figura 4 mostra a deformação longitudinal média. Como se observa na figura, os corpos de prova falharam sob fluência terciária durante o tempo de ensaio, o que está de acordo com (Shah e Chandra, 1970), onde se verificou que, em idades precoces, os corpos de prova falham devido à fluência terciária quando submetidos

a níveis de tensão elevados. O gráfico é consistente com os de fluência terciária (Shah e Chandra, 1970). O gráfico mostra uma aceleração na taxa de deformação assim que o corpo de prova atinge uma deformação de aproximadamente 2×10^{-3} , devido ao acúmulo interno de fissuras no corpo de prova. O corpo de prova falha em aproximadamente 2750 segundos, ou seja, aproximadamente 45 minutos após o início do ensaio. É importante mencionar que não foi possível determinar a deformação transversal, uma vez que a instrumentação falhou durante o ensaio implicando em elevada variabilidade nas leituras. A Figura 5 mostra o comportamento das deformações longitudinal e transversal para tensões baixas e médias aos 7 dias de idade.

De forma similar, aos 28 dias de idade, particularmente em baixos níveis de tensão, foram observadas deformações da ordem de $8,3 \times 10^{-5}$ e $8,8 \times 10^{-5}$ para a deformação longitudinal no início e no fim do ensaio, respectivamente, enquanto, na direção transversal, as deformações medidas foram da ordem de $1,7 \times 10^{-5}$ e $2,0 \times 10^{-5}$ para o início e o fim do ensaio, respectivamente. Para tensão média, a deformação longitudinal foi da ordem de $1,97 \times 10^{-4}$ e $2,33 \times 10^{-4}$, enquanto a deformação transversal foi da ordem de $6,7 \times 10^{-5}$ a $7,5 \times 10^{-5}$ para o início e o fim do ensaio, respectivamente. A Figura 6 mostra o comportamento das deformações longitudinal e transversal para tensões baixas e médias, para a idade de 28 dias.

Por outro lado, a Figura 6a mostra o comportamento da deformação longitudinal média para a idade de 28 dias e altos níveis de tensão. Ela mostra que a deformação inicial é da ordem de $1,16 \times 10^{-3}$, enquanto no final do ensaio uma deformação longitudinal da ordem de $2,61 \times 10^{-3}$ foi alcançada. Pode-se ver também que a taxa de deformação aumenta ligeiramente quando uma deformação de $2,43 \times 10^{-3}$ é atingida. Essa tendência é semelhante à da Figura 4, indicando que os corpos de prova podem ter atingido um estágio inicial de fluência terciária. Assim como na idade de 7 dias, a deformação transversal média não pôde ser determinada devido a uma falha na instrumentação durante o ensaio e de alta variabilidade das leituras obtidas.

Por fim, para os corpos de prova com idade de 90 dias, para baixas tensões (20% da capacidade), foram encontradas deformações longitudinais na faixa de $5,2 \times 10^{-5}$ e $5,9 \times 10^{-5}$ para o início e o fim do ensaio, transversalmente foram encontradas deformações na faixa de $1,3 \times 10^{-5}$ a $1,4 \times 10^{-5}$. Para tensão média, ou seja, 50% de sua capacidade, foram encontradas deformações longitudinais de $1,69 \times 10^{-4}$ e $2,03 \times 10^{-4}$; transversalmente foram encontradas deformações de $5,4 \times 10^{-5}$ a $6,4 \times 10^{-5}$. Para essa idade e para níveis de tensão em torno de 80% de sua capacidade, as deformações longitudinais registradas foram na faixa de $7,88 \times 10^{-4}$ a $1,22 \times 10^{-3}$, transversalmente foram encontradas deformações com valores entre $5,04 \times 10^{-4}$ e $6,06 \times 10^{-4}$. A Figura 7 mostra as deformações longitudinais e transversais em função do tempo para a idade de 90 dias e para os três níveis de tensão.

3.2 Comparação de resultados experimentais sob fluência por compressão mantida

Com a finalidade de compreender melhor o comportamento das deformações longitudinal e transversal ao longo do tempo para as diferentes idades e níveis de tensão, optou-se por apresentar uma análise comparativa dos resultados, primeiro fixando a idade e variando os níveis de tensão e, em seguida, fixando os níveis de tensão e variando a idade. Nas figuras a seguir, ε_i representa a deformação inicial ao atingir o nível de tensão desejado, ε_f indica a deformação ao final do ensaio, e ε_p representa a deformação residual ao descarregar o corpo de prova.

A Figura 5a mostra uma comparação da deformação longitudinal média, para a idade de 7 dias e os níveis de tensão de 20% e 50% de sua resistência à compressão, enquanto a Figura 5b mostra a comparação para a deformação transversal. É importante mencionar que a comparação com os altos níveis de tensão (80% de sua capacidade) foi omitida, uma vez que os corpos de prova falharam durante o ensaio devido à fluência terciária. Na Figura 5a, observa-se que a deformação longitudinal ao atingir a carga de ensaio para o nível de tensão médio é 1,86 vezes maior do que a registrada para o nível de 20% de sua capacidade; da mesma forma, a deformação longitudinal no

final do ensaio, para o nível de tensão médio, é 2,70 vezes maior do que a registrada para o nível baixo, o que indica um aumento de 45,16% devido ao aumento na taxa de deformação. Além disso, é visível que a taxa de deformação é maior para o nível médio do que para o nível baixo. Isso se deve à falta de proporcionalidade (não linearidade) na fluência quando o limite de 40% da capacidade é excedido, tensão para a qual microfissuras no concreto começam a surgir internamente. Isso tem sido reconhecido por muitos pesquisadores na área de fluência (Pan *et al.*, 2022). No entanto, esse fenômeno não se reflete na deformação transversal, onde a razão da deformação transversal, ou seja, $\varepsilon_{50\%}/\varepsilon_{20\%}$, tanto para o início quanto para o fim do ensaio, é da ordem de 3,10, mantendo a proporcionalidade mencionada. Por fim, é importante notar que ambas as figuras mostram deformação permanente, que está presente independentemente de estar abaixo de 40% da magnitude da tensão. Isso foi previamente observado em outras investigações (Mazzotti e Savoia, 2002; Pan *et al.*, 2022). É importante notar que, uma vez que esse limite foi excedido para os níveis médios, a deformação permanente deve ser associada ao nível de fissuração do material (Rossi *et al.*, 2012).

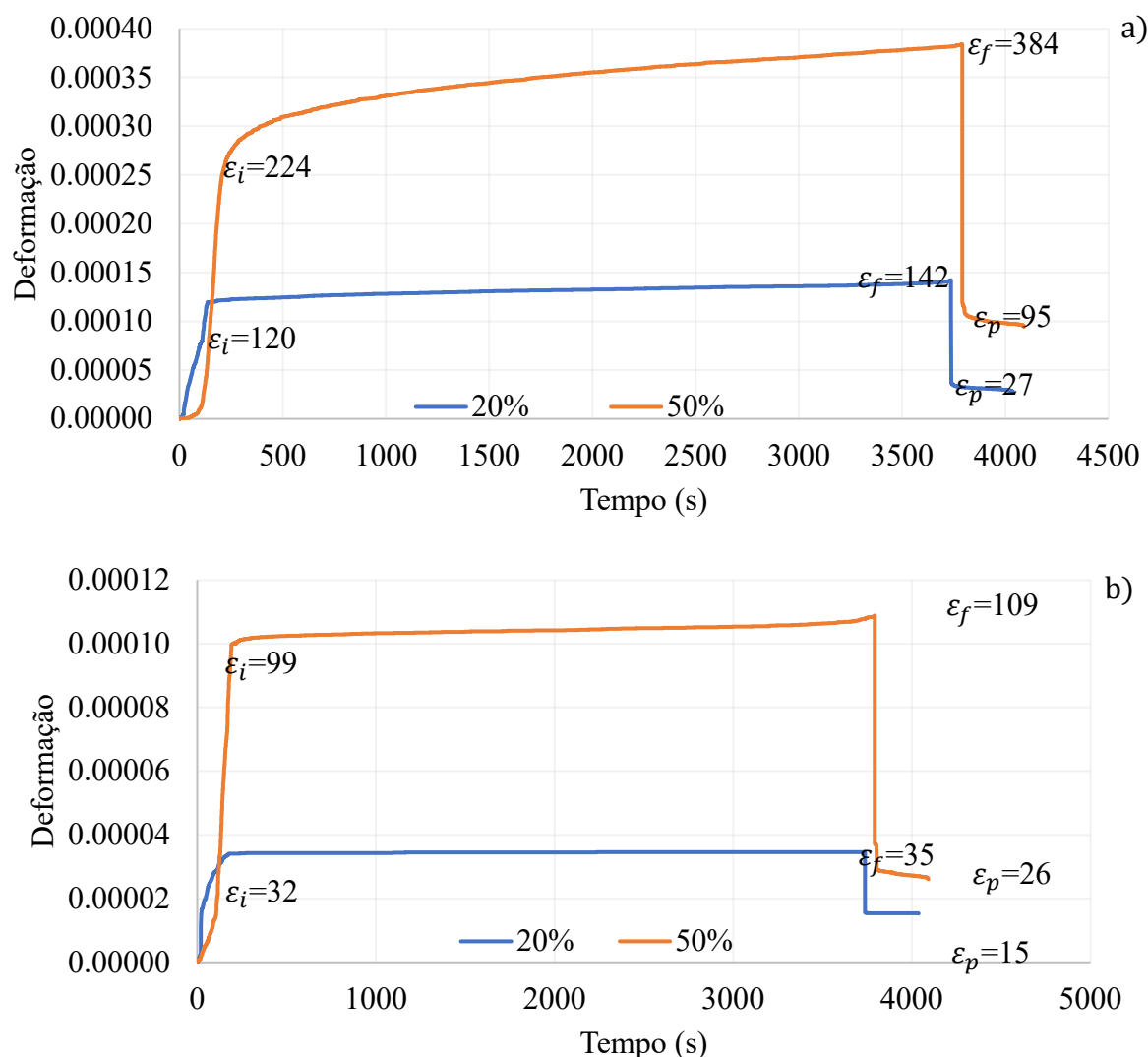


Figura 5. Comparação entre a deformação ao longo do tempo para a idade de 7 dias e as tensões de 20% e 50% da capacidade, a) deformação longitudinal, b) deformação transversal.

A Figura 6a mostra as deformações longitudinais comparativas para níveis de tensão baixo, médio e alto (20%, 50% e 80%, respectivamente), enquanto a Figura 6b mostra as deformações transversais para tensões baixas e médias, para corpos de prova com 28 dias de idade. De forma semelhante, verificou-se que a deformação longitudinal inicial para o nível médio é 2,37 vezes a registrada para o nível baixo, enquanto a deformação final é 2,65 vezes, o que representa um aumento de 11,81%, devido ao aumento na taxa de deformação que ocorre para tensões superiores a 40% da capacidade. É importante notar que este aumento é menor em comparação com os corpos de prova com 7 dias de idade. Isso se deve principalmente às alterações das propriedades mecânicas do concreto ao longo do tempo, uma vez que é sabido que, à medida que o concreto envelhece, ele se torna menos suscetível à fluência (Bazant e Prasannan, 1989). Da mesma forma, compara-se o nível alto com o nível médio, onde no início, a deformação para o nível alto é 5,89 vezes maior e no final é 11,22 vezes maior, o que representa uma diferença de 90,5% do início ao fim, devido ao aumento na taxa de deformação.

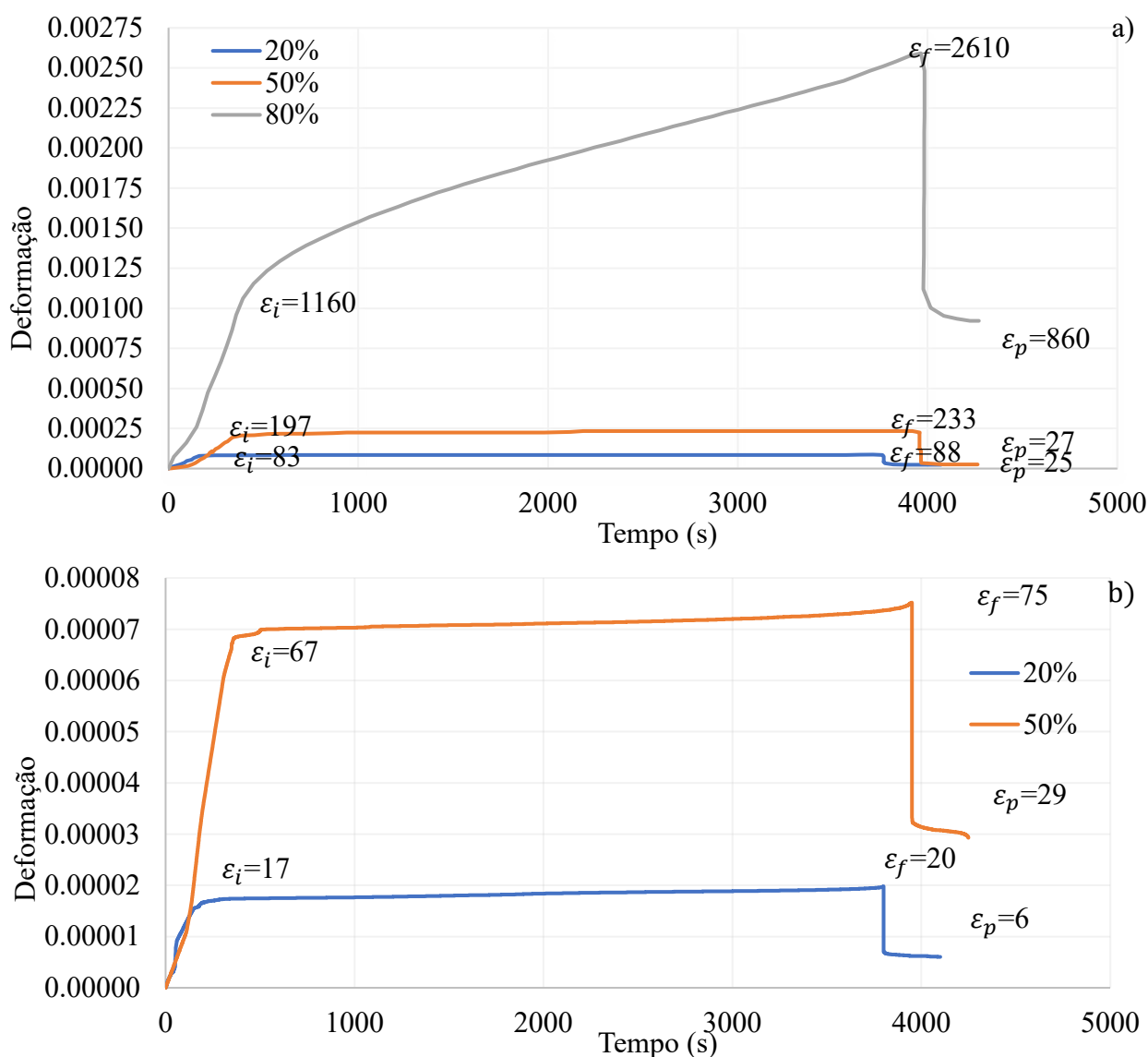


Figura 6. Comparação entre a deformação ao longo do tempo para a idade de 28 dias e as tensões de 20% e 50% da capacidade, a) deformação longitudinal, b) deformação transversal.

A Figura 7 mostra a comparação das deformações longitudinal e transversal para corpos de prova com 90 dias de idade, considerando a variação dos níveis de tensão de compressão mantida, ou seja, 20%, 50% e 80% de sua capacidade. Para a deformação longitudinal inicial, constata-se que a deformação para o nível alto é 4,66 vezes maior que a do nível médio e 15,15 vezes maior que a do nível baixo, enquanto a do nível médio em relação ao nível baixo é da ordem de 3,25 vezes. Para a deformação final, verifica-se que, para níveis altos, a deformação é 6,01 vezes maior que a do nível médio, para tensões de alta a baixa é da ordem de 20,68 vezes, e para tensões de média a baixa é da ordem de 3,44 vezes. O exposto indica que a mudança entre a deformação inicial e a final é de 28,97% de alta para média, 36,5% de alta para baixa, e 5,85% de média para baixa. É importante notar que a diferença entre a taxa de deformação de 28 para 90 dias para a relação de média para alta é 3,12 vezes no final do ensaio (relação percentual, ou seja, $90,5/28,97$). A análise acima pode ser replicada para as deformações transversais mostradas na Figura 7b.

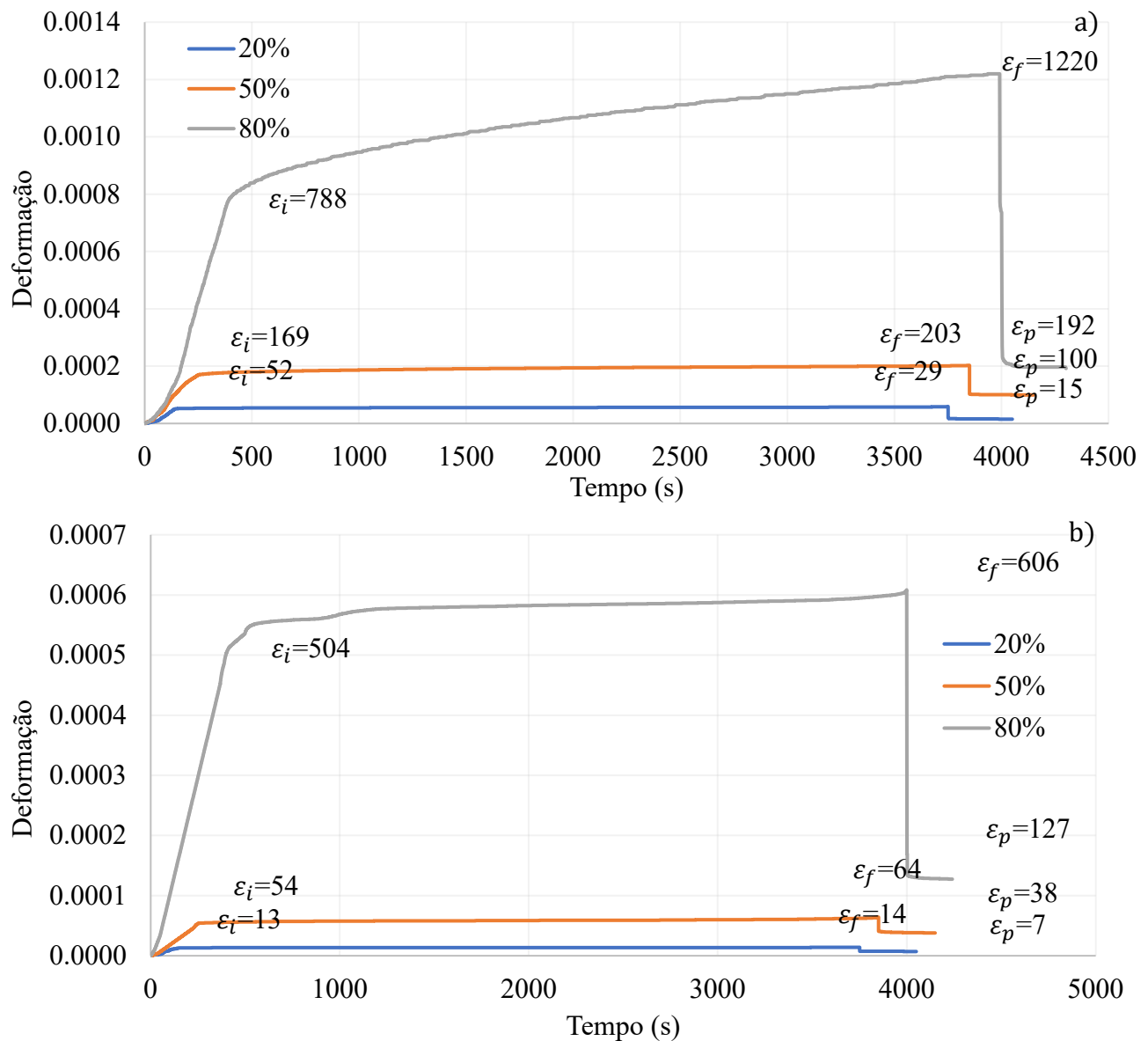


Figura 7. Comparação entre a deformação ao longo do tempo para a idade de 90 dias e os níveis de tensão de 20%, 50% e 80% da capacidade, a) deformação longitudinal, b) deformação transversal.

Para verificar a suscetibilidade decrescente do concreto à fluência com o avanço do tempo (Bazant e Prasannan, 1989), as deformações para um nível de tensão fixo são agora comparadas com a variação de idade. Primeiro, a Figura 8 apresenta o comportamento das deformações longitudinal e transversal para o nível de tensão baixo, ou seja, 20% da capacidade, com variação de idade. Se obtivermos as razões de deformação de idades mais baixas para idades mais altas, encontramos a diferença entre elas. Por exemplo, a razão de deformação por idade de 7 para 28 dias, ou seja, $\varepsilon_{7d}/\varepsilon_{28d}$, verificamos que para a deformação longitudinal inicial é de 1,45, enquanto a razão de deformação final é de 1,61, indicando uma mudança de 11,03% do final para o inicial. Da mesma forma, a razão entre as idades de 7 para 90 dias, encontra-se uma deformação inicial aos 7 dias de 2,31 vezes maior que a aos 90 dias, enquanto para a razão final é 2,41 vezes, ou seja, um aumento de 4,33%. Por fim, a deformação inicial aos 28 dias é 1,60 vezes maior que aos 90 dias, enquanto a deformação final é 1,49 vezes maior, mostrando uma diminuição de 6,88%. Ao observar a Figura 8, é evidente que a taxa de deformação diminui à medida que a idade aumenta, o que é consistente com o que foi descrito anteriormente.

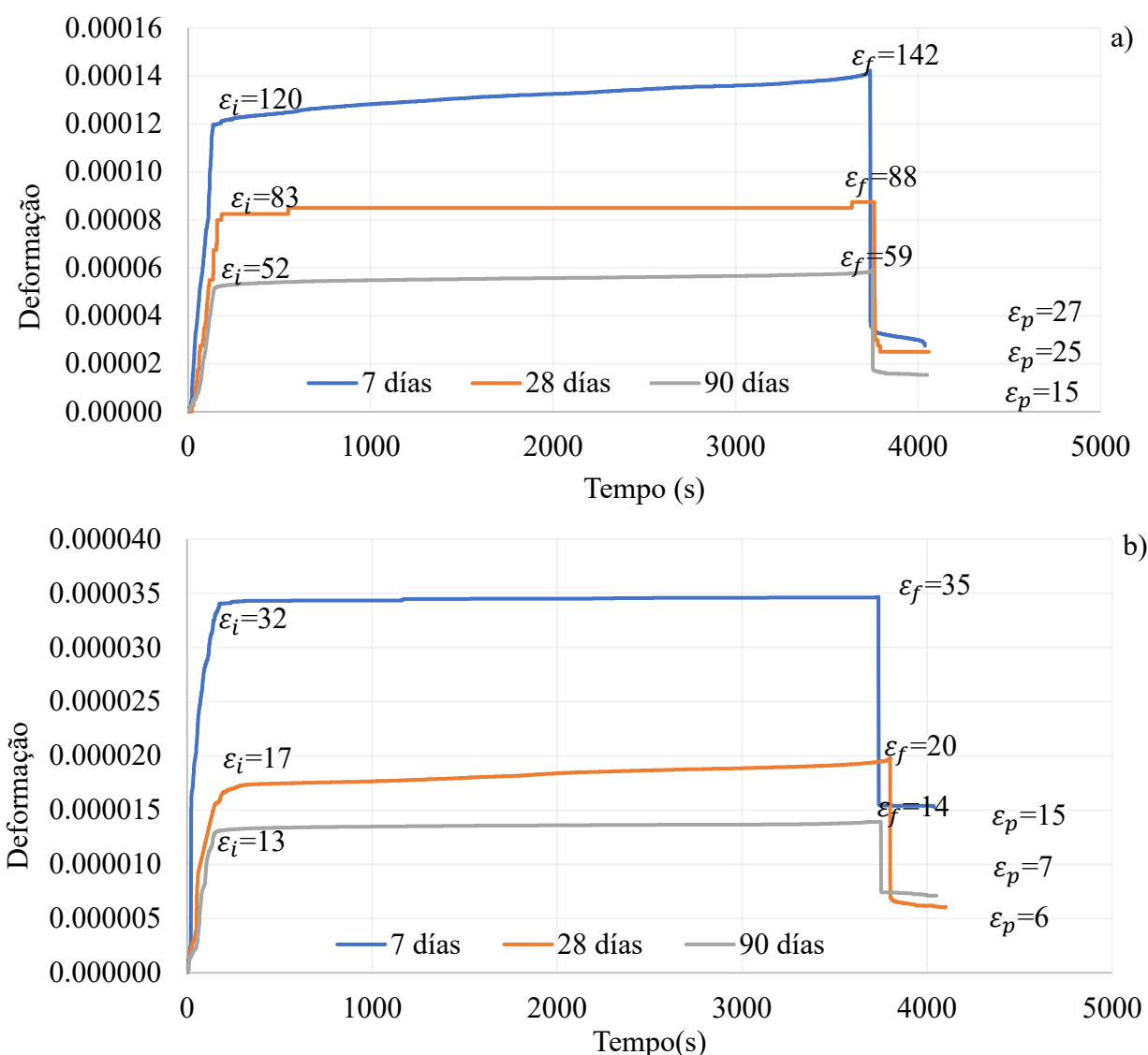


Figura 8. Comparação entre a deformação ao longo do tempo para o nível de tensão baixo (20%), para as idades de 7, 28 e 90 dias, a) deformação longitudinal, b) deformação transversal.

Além disso, a Figura 9 mostra a comparação da deformação longitudinal em função do tempo para o nível de tensão médio, com variação das idades. Observa-se que a deformação longitudinal inicial aos 7 dias é 1,14 vezes maior que a presente aos 28 dias, enquanto para a deformação final é 1,65 vezes maior, indicando um aumento de 44,74%, devido à faixa de fluência não linear mencionada anteriormente. No entanto, se agora compararmos as deformações para 7 e 90 dias, encontramos que a deformação inicial é 1,33 vezes maior, enquanto a deformação final é 1,89 vezes, mostrando um aumento de 42,11%. Por fim, as razões para 28 a 90 dias são 1,17 e 1,15 vezes maiores, para a inicial e a final, respectivamente. É importante mencionar que a comparação dos níveis de tensão altos não pôde ser realizada porque os corpos de prova falharam durante o ensaio de fluência. Por fim, a Figura 10 mostra a comparação para o nível de tensão alto, com variação de idade. Principalmente, é facilmente notável a diferença na taxa de deformação, onde se mostra que a inclinação da curva para a curva de 28 dias é significativamente maior que a da curva de 90 dias. A razão de deformação de idade mais baixa para idade mais alta, ou seja, para este caso $\varepsilon_{28d}/\varepsilon_{90d}$, é de 1,42 no início, enquanto no final é de 2,14. Essa análise indica a não linearidade ou não proporcionalidade do concreto, mas desta vez sob a mudança ao longo do tempo.

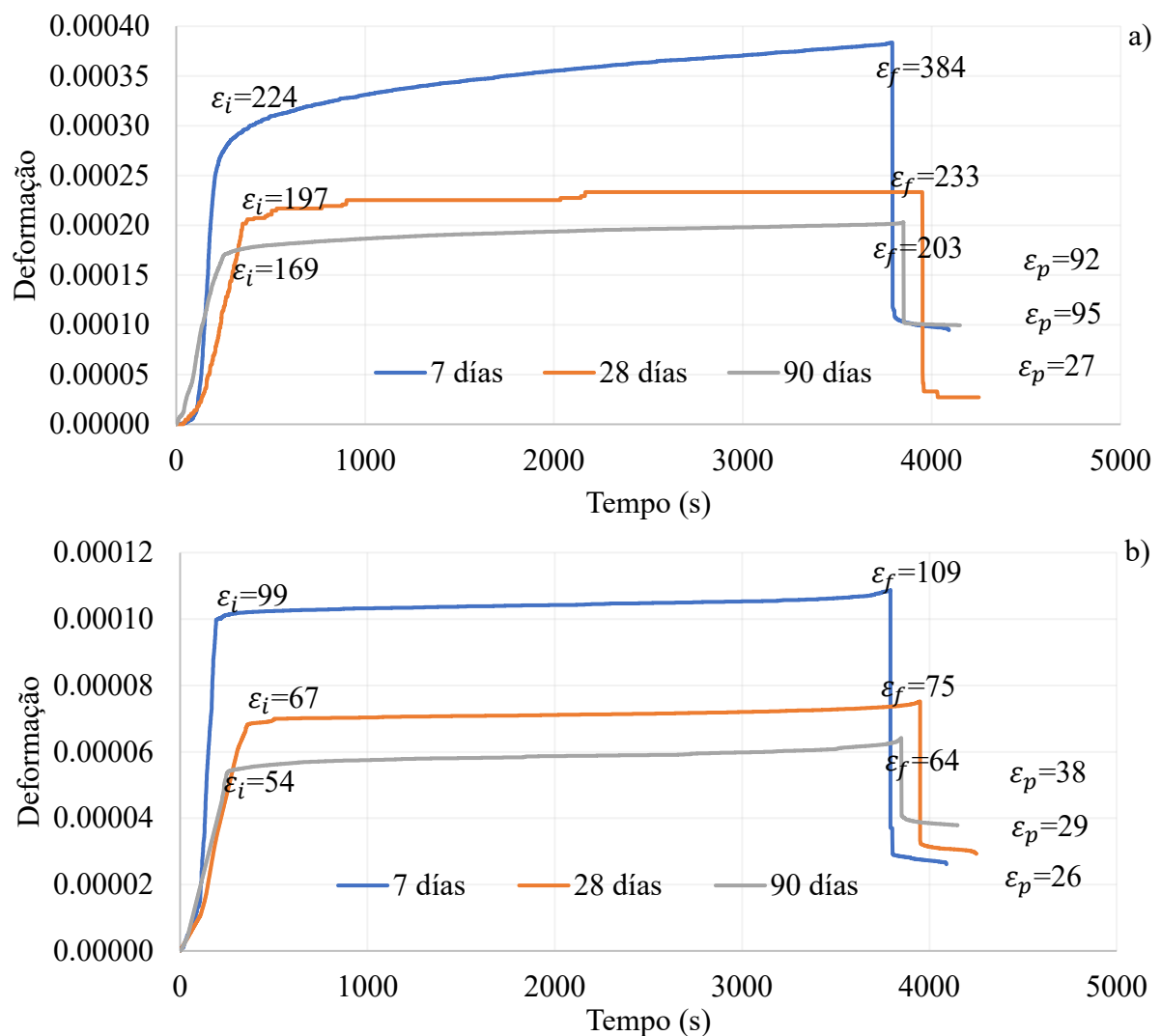


Figura 9. Comparação entre a deformação ao longo do tempo para o nível médio de tensão (50%), para as idades de 7, 28 e 90 dias, a) deformação longitudinal, b) deformação transversal.

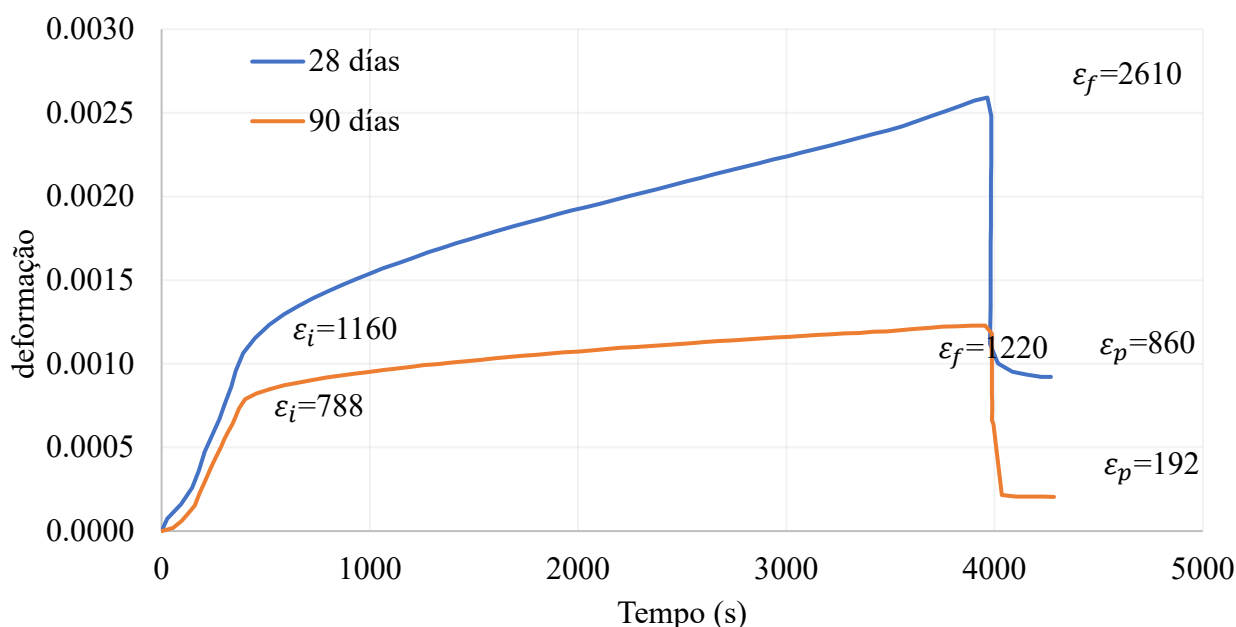


Figura 10. Comparação entre a deformação longitudinal temporal para o nível de tensão médio (80%), para as idades de 28 e 90 dias.

3.3 Variação na resistência à compressão, módulo de elasticidade e perda de rigidez devido a danos

A Figura 11 apresenta uma comparação dos gráficos tensão-deformação para as várias idades com a variação do nível de tensão mantida. Em todos os gráficos, os corpos de prova de controle são representados pela linha azul. É evidente que, para todos os corpos de prova submetidos à cargas de compressão mantidas em baixos níveis de tensão, há uma tendência de aumentar ligeiramente sua resistência à compressão, enquanto, para os corpos de prova carregados em compressão mantida a 50% e 80% de sua resistência, há uma perda de capacidade associada à fissuração interna sofrida. Embora menos perceptível, esse comportamento também se reflete no módulo de elasticidade, onde os corpos de prova carregados a 20% da capacidade exibem um leve aumento no módulo de elasticidade, enquanto nos corpos de prova sob carregamento mantido em níveis médio e alto, seu módulo de elasticidade diminui. A Tabela 1 fornece os valores de resistência e módulo de elasticidade obtidos.

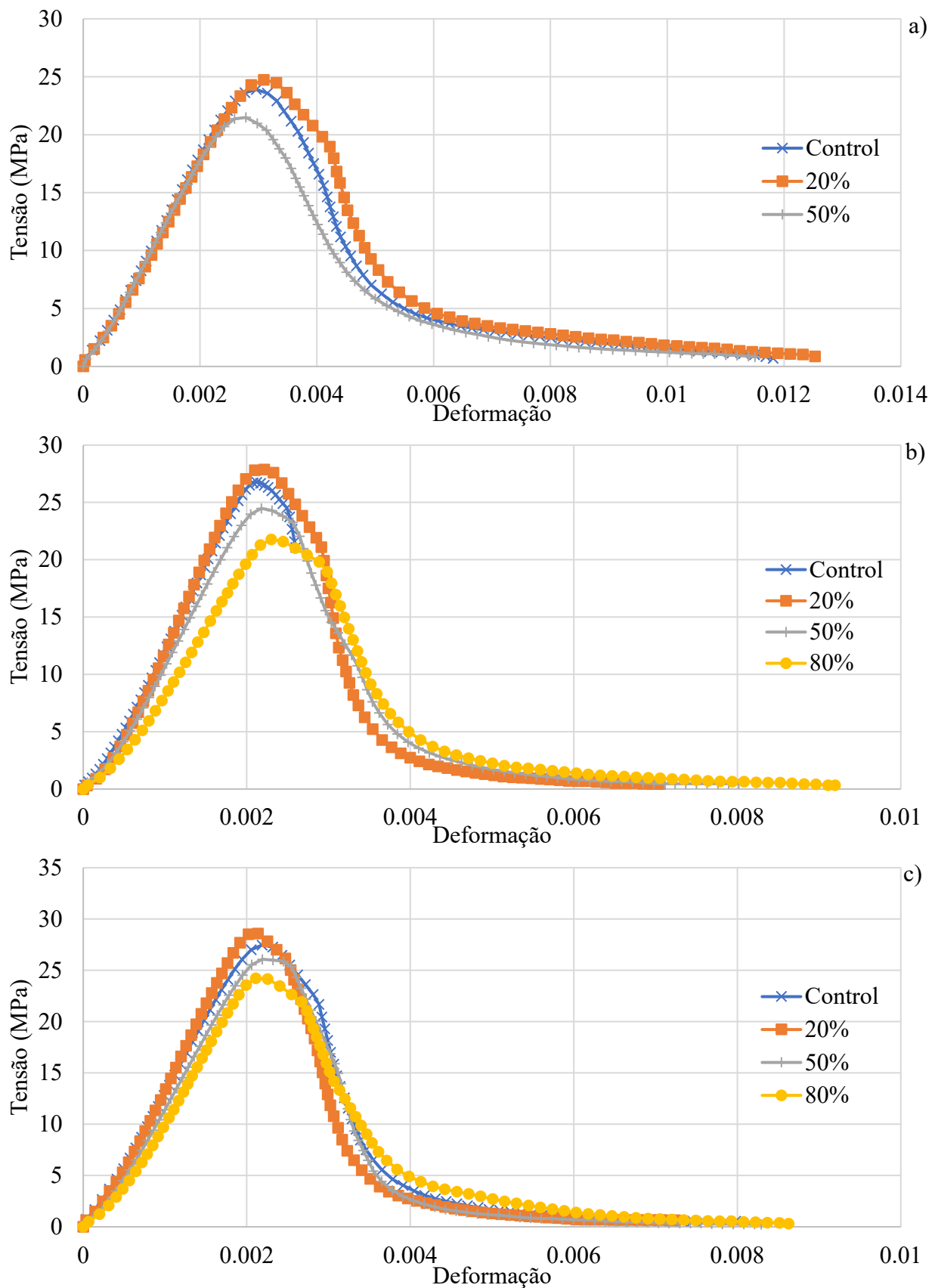


Figura 11. Comparação do gráfico de tensão-deformação controle vs. níveis de tensão, a) 7 dias, b) 28 dias, c) 90 dias.

A perda (ou ganho) de rigidez pode ser definida com base no dano no material, definido como o nível de fissuração apresentado. Uma forma de quantificar este dano é através da hipótese de equivalência de deformação (Murakami, 2012), expressa na equação (1),

$$D = 1 - \frac{E(D)}{E_0} \quad (1)$$

onde $E(D)$ é o módulo de elasticidade do material avaliado, E_0 é o módulo de elasticidade do corpo de prova de controle, e D representa o dano.

Outra forma de estimar o dano é baseada na mudança na resistência previamente descrita, como mostrado na equação (2),

$$D = 1 - \frac{\sigma(D)}{\sigma_0} \quad (2)$$

onde $\sigma(D)$ é a resistência à compressão do material avaliado, σ_0 corresponde à resistência do corpo de prova de controle, e D novamente representa o dano. Esta última equação pode ser interpretada como uma variante da formulação de tensão efetiva (Liang et al., 2025; Murakami, 2012).

A Tabela 1 fornece o nível de dano causado pelos diversos níveis de tensão mantida nos corpos de prova ensaiados em várias idades, sob a perda de resistência e perda de módulo de elasticidade, e serve como um valor de tempo dado para as equações de evolução em (Terán-Torres et al., 2024). É importante mencionar que o dano mostrado na Tabela 1 é o resultante da deformação inicial e da deformação temporal. O dano resultante da deformação inicial pode ser facilmente calculado submetendo corpos de prova a carregamento monotônico até os níveis de tensão correspondentes, descarregando e, em seguida, recarregando até a falha, e subsequentemente determinando o módulo de elasticidade e a resistência a partir dos resultados do ensaio. A diferença entre a mudança no módulo e as resistências relatadas corresponde ao dano temporal, para a equação (1) e a equação (2), respectivamente.

Tabela 1. Porcentagem de dano correspondente a cada nível de tensão e idade, associada à capacidade e ao módulo de elasticidade.

Idade (dias)	Nível de tensão	Resistência à compressão (MPa)	% Dano da resistência	Módulo de elasticidade (GPa)	% Dano do módulo elástico
7*	Controle	24.00	-	24.792	-
	Baixo (20%)	24.75	-3.13	26.333	-6.2
	Médio (50%)	21.58	10.08	23.956	3.4
28	Controle	26.79	-	26.821	-
	Low (20%)	27.91	-4.18	27.158	-1.3
	Médio (50%)	24.49	8.59	23.985	10.6
	Alto (80%)	21.83	18.51	19.224	28.3
90	Controle	27.59	-	28.433	-
	Baixo (20%)	28.71	-4.06	29.211	-2.7
	Médio (50%)	26.22	4.97	24.940	12.3
	Alto (80%)	24.27	12.03	22.549	20.7

*Nota: Os valores reportados de resistência à compressão e o módulo de elasticidade aos 7 dias dos corpos de prova foram extrapolados com base no ensaio realizado e nas estimativas de 28 dias (Narayanan, 2021).

É importante mencionar que, para os corpos de prova carregados a 20% de sua capacidade em compressão, há um ganho de rigidez e, portanto, o corpo de prova exibiu uma variável de dano negativa. Esse fenômeno é conhecido na mecânica do dano contínuo como “*healing*” e foi introduzido em (Abu Al Rub e Darabi, 2012). O exposto foi observado em (Shah e Chandra, 1970), onde se considerou que a distância entre duas partículas diminui, causando um aumento na força de ligação entre elas. Enquanto, para os casos de tensão média e alta, o dano é positivo, o que está de acordo com (Iravani e MacGregor, 1998; Mazzotti e Savoia, 2002). É importante notar que o dano relacionado à resistência à compressão é inversamente proporcional à idade, ou seja, quanto maior a idade, menor o dano sob o mesmo nível de carga mantida, como mostrado na Tabela 1. Isso é consistente com o observado para a deformação. No entanto, o oposto ocorre com o dano associado ao módulo de elasticidade, onde quanto maior a idade, o dano parece aumentar.

3.4 Coeficiente de Poisson temporal

Por fim, o coeficiente de Poisson para fluência será analisado. Alguns autores concluíram que o coeficiente de Poisson depende do nível de tensão: para tensões baixas e médias, o valor é constante, enquanto para níveis de tensão altos há um aumento, fenômeno estritamente relacionado ao crescimento de microfissuras e que precede a falha do concreto devido à fluência terciária (Mazzotti e Savoia, 2002). Na Figura 12, pode-se observar que o coeficiente de Poisson de fato depende do nível de tensões aplicadas. Por exemplo, para o nível de tensão baixo, o coeficiente de Poisson tende a um valor de aproximadamente 0,25. Enquanto, para níveis médios, tende a 0,30. No entanto, é importante notar que há uma ligeira variação temporal, principalmente nos corpos de prova mais jovens. Por fim, para níveis altos, a variação temporal é muito mais notável, mostrando valores entre 0,65 e 0,50, que são consistentes com as observações de Mazzotti e Savoia (2002). Essas razões excedem o limite teórico para o coeficiente de Poisson em materiais isotrópicos, indicando uma relação aparente devido à fissuração.

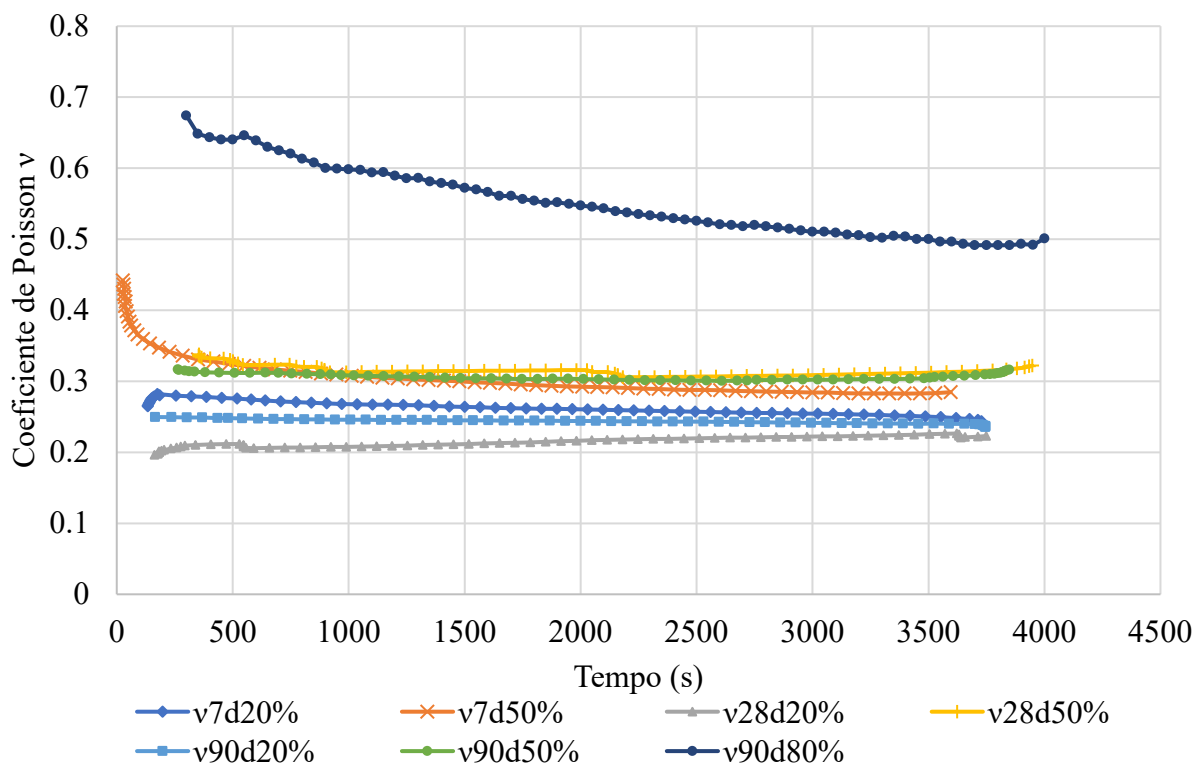


Figura 12. Comparação do coeficiente de Poisson para várias idades e níveis de tensão em carga mantida.

3. CONCLUSÃO

No presente estudo, foram realizados ensaios de fluência de curta duração (aprox. 1 h) em corpos de prova de concreto simples de diferentes idades, a saber, 7, 28 e 90 dias, que foram submetidos a carregamento de compressão mantida sob diferentes níveis de tensão, ou seja, 20%, 50% e 80% de sua resistência à compressão. As seguintes conclusões foram obtidas a partir dos ensaios:

1. Foram obtidas deformações longitudinais e transversais em função do tempo para os diversos estados de tensão e idades. Verificou-se que, à medida que a idade aumenta, as deformações diminuem. Da mesma forma, a taxa de deformação aumenta à medida que o estado de tensão mantida aumenta. Isso é consistente com o que outros autores relataram.
2. Após o ensaio de fluência, os corpos de prova foram ensaiados até a ruptura. Verificou-se que, nos corpos de prova submetidos a níveis de tensão baixos, sua resistência à compressão e módulo de elasticidade aumentaram. Por outro lado, para os corpos de prova sob tensões mantidas médias e altas, a resistência à compressão e o módulo de elasticidade decaíram.
3. O dano (nível de fissuração) associado à resistência à compressão é inversamente proporcional à idade do corpo de prova, ou seja, o dano para o mesmo nível de tensão é menor à medida que a idade aumenta. No entanto, o oposto foi observado para o dano associado ao módulo de elasticidade, que aumenta à medida que a idade aumenta.
4. Por fim, o coeficiente de Poisson, determinado com as deformações transversal e longitudinal, mostrou que, para níveis de tensão baixos e médios, ela tende a um valor fixo. Para tensões mantidas baixas, a razão tende a 0,25. Enquanto, para tensões médias, a razão tende a 0,30. Isso não ocorre para tensões mantidas altas, onde a pesquisa mostrou uma variação temporal, que está na faixa de 0,50 a 0,65.

5. AGRADECIMENTOS

Agradecimentos são dados à Universidad Autónoma de Nuevo León, pelo apoio financeiro fornecido para adquirir os suprimentos utilizados nesta pesquisa através do PAICYT 2018, sob o projeto IT634-18. Além disso, agradecimentos são expressos às autoridades da Facultad de Ingeniería Civil, especialmente ao Dr. Pedro Valdez, por conceder a bolsa de estudos para o estudante de pós-graduação que realizou os experimentos. Finalmente, agradecimentos às autoridades do Instituto de Ingeniería Civil "Dr. Raymundo Rivera Villarreal" da UANL, pelo apoio no uso da infraestrutura necessária para a realização dos ensaios experimentais.

4. REFERÊNCIAS

- Abu Al-Rub, R. K., Darabi, M. K. (2012). *A thermodynamic framework for constitutive modeling of time- and rate-dependent materials. Part I: Theory*. International Journal of Plasticity. 34:61–92. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2012.01.002>
- ACI Committee 211. (2022). *Selecting Proportions for Normal-Density and High-Density Concrete – Guide (ACI PRC-211.1-22)*. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.
- Acker, P., Bazant, Z. P., Chern, J. C., Huet, C., Wittmann, F. H. (1998). *Measurement of time-dependent strains of concrete*. Materials and Structures. 31(212):507–512. <https://doi.org/10.1007/BF02481530>
- ASTM International. (2018). *Standard Specification for Concrete Aggregates (ASTM C33)*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM International. (2020). *Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete (ASTM C143)*. ASTM International, West Conshohocken, PA.

- ASTM International. (2021). *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens (ASTM C39)*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM International. (2024). *Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory (ASTM C192)*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM International. (2009). *Standard Practice for Capping Cylindrical Concrete Specimens (ASTM C617-09)*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM International. (2002). *Standard Test Method for Creep of Concrete in Compression (ASTM C512-02)*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM International. (2014). *Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression (ASTM C469-14)*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Bazant, Z. P., Prasannan, S. (1989). *Solidification Theory for Concrete Creep. II: Verification and Application*. Journal of Engineering Mechanics, 115(8):1704–1725. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1989\)115:8\(1704\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1989)115:8(1704))
- Bazant, Z. P., Huet, C. (1999). *Thermodynamic Functions for Ageing Viscoelasticity: Integral Form Without Internal Variables*. International Journal of Solids and Structures, 36(24):3993–4016. [https://doi.org/10.1016/S0020-7683\(98\)00184-X](https://doi.org/10.1016/S0020-7683(98)00184-X)
- Bazant, Z. P., Yu, Q., Li, G. H., Klein, G. J., Kristek, V. (2010). *Excessive deflections of record-span prestressed box girder*. ACI: Concrete International. 32(6):44-52.
- Bazant, Z. P., Hubler, M. H., Yu, Q. (2011). *Pervasiveness of Excessive Segmental Bridge Deflections: Wake-Up Call for Creep*. ACI: Structural Journal. 108(6):766-774. <https://doi.org/10.14359/51683375>
- Bazant, Z. P., Hubler, M. (2014). *Theory of cyclic creep of concrete based on Paris law for fatigue growth of subcritical microcracks*. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 63:187-200. <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2013.09.010>
- Chen, P., Zheng, W., Wang, Y., Du, K., Chang, W. (2019). *Strain recovery model for concrete after compressive creep*. Construction and Building Materials, 199:746–755. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.021>
- Collins, T., (1989). *Proportioning High-Strength Concrete to Control Creep and Shrinkage*. ACI Materials Journal. 86(6):576-580. <https://doi.org/10.14359/2211>
- Iravani, S., MacGregor, J. G. (1998). *Sustained Load Strength and Short-Term Strain Behavior of High-Strength Concrete*. ACI Materials Journal. 95(5):636–647. <https://doi.org/10.14359/406>
- Liang, W., Wang, S., Lv, X., Li, Y. (2025). *Dynamic mechanical properties and damage constitutive model of frozen–thawed basalt fiber-reinforced concrete under wide strain rate range*. Materials, 18(14),3337. <https://doi.org/10.3390/ma18143337>
- Linz, P. (1985). *Analytical and Numerical Methods for Volterra Equations*. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics (SIAM). ISBN: 978-0898711981.
- Loo, Y. H. (1992). *A new method for microcrack evaluation in concrete under compression*. Materials and Structures. 25(10):573-578. <https://doi.org/10.1007/BF02472225>
- Mazzotti C., Savoia, M. (2001). *An isotropic damage model for nonlinear creep behavior of concrete in compression*. Fracture Mechanics of Concrete Structures. pp. 255-262.
- Mazzotti, C., Savoia, M. (2002). *Nonlinear creep, Poisson's ratio, and creep-damage interaction of concrete in compression*. ACI Materials Journal. 99(5): 450–457. <https://doi.org/10.14359/12323>
- Mei, S.-q., Zhang, J.-c., Wang, Y.-f., Zou, R.-f. (2017). *Creep-recovery of normal strength and high strength concrete*. Construction and Building Materials, 156:175–183. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.163>
- Murakami, S. (2012). *Continuum Damage Mechanics: A Continuum Mechanics Approach to the*

Analysis of Damage and Fracture. Solid Mechanics and Its Applications, Vol. 185. Dordrecht: Springer.

- Murakami, S., Kamiya, K. (1997). *Constitutive and damage evolution equations of elastic-brittle materials based on irreversible thermodynamics*. International Journal of Mechanical Sciences, 39(4): 473–486. [https://doi.org/10.1016/S0020-7403\(96\)00044-5](https://doi.org/10.1016/S0020-7403(96)00044-5)
- Narayanan, S. (2021). Elastic Modulus of Concrete. CE & CR. July:1-7.
- Neville, A. M. (2011). “*Properties of Concrete*”. Pearson Education Limited, Cap 9.
- Ouzandja, D. J., Talhaoui, A., Belmekki, M., Bachari, H. (2023). *3D numerical simulation of seismic failure of a concrete gravity dam considering base sliding*. Modelling in Civil and Environmental Engineering, 17(2), 43–53. <https://doi.org/10.2478/mmce-2022-0010>
- Pan, Z., Cao, D., Zeng, B., Wang, Y. (2022). *Nonlinear Creep Amplification Factor Considering Damage Evolution of Concrete under Compression*. Materials, 15(19). <https://doi.org/10.3390/ma15196742>
- Rossi, P., Tailhan, J.-L., Le Maou, F., Gaillet, L., Martin, E. (2012). *Basic creep behavior of concretes: Investigation of the physical mechanisms by using acoustic emission*. Cement and Concrete Research. 42(1):61–73. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.07.011>
- Shah, S. P., Chandra, S. (1970). *Fracture of Concrete Subjected to Cyclic and Sustained Loading*. Journal Proceedings of the American Concrete Institute. 67(10):816–827. <https://doi.org/10.14359/7312>
- Su, L., Wang, Y.-f., Mei, S.-q., Li, P.-f. (2017). *Experimental investigation on the fundamental behavior of concrete creep*. Construction and Building Materials, 152:250–258. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.162>
- Tamtsia, B. T., Beaudoin, J. J. (2000). *Basic creep of hardened cement paste: A re-examination of the role of water*. Cement and Concrete Research. 30(9): 1465–1475. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00279-9](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00279-9)
- Tang, C., Zheng, W., Wang, Y. (2020). *Creep Failure of Concrete under High Stress*. Journal of Testing and Evaluation, 48(5): 3410–3416. <https://doi.org/10.1520/JTE20170554>
- Terán-Torres, B. T., Mohammadi, J., Nair, S. E., Mendoza-Rangel, J. M., Flores-Vivian, I., Juárez-Alvarado, C. A. (2024). *Non-Linear Creep-Relaxation Constitutive Damage Model for Aging Concrete*. Applied Science. 14(10):1-28. <https://doi.org/10.3390/app14104270>
- Vandewalle, L. (2000). *Concrete creep and shrinkage at cyclic ambient conditions*. Cement & Concrete Composites. 22(3): 201-208. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(00\)00004-4](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(00)00004-4)
- Zhaoxia, L. (1994). *Effective Creep Poisson's Ratio for Damaged Concrete*. International Journal of Fracture, 66(2):189–196. <https://doi.org/10.1007/BF00020083>
- Zhong, K., Deierlein, G. G. (2019). *Low-cycle fatigue effects on the seismic performance of concrete frame and wall systems with high strength reinforcing steel*. CRC, Pankow Foundation / ACI Foundation. <https://doi.org/10.1016/51734214>
- Zhou, M., Chen, Y. (2024). *Fatigue assessment of reinforced concrete bridge decks under realistic traffic loading using a hybrid model*. Advances in Bridge Engineering, 5(1), 12. <https://doi.org/10.1186/s43251-023-00112-2>