

Utjecaj temperature i trajanja opterećenja na ponašanje greda od laminiranog stakla

Grozdanić, Gabrijele; Galić, Mirela

Source / Izvornik: Zajednički temelji 2023. - uniSTem : deseti skup mladih istraživača iz područja građevinarstva i srodnih tehničkih znanosti, Split, 14.-17. rujna, 2023. : zbornik radova, 2023, 74 - 81

Conference paper / Rad u zborniku

Publication status / Verzija rada: **Published version / Objavljena verzija rada (izdavačev PDF)**

<https://doi.org/10.31534/10.ZT.2023.19>

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:123:943858>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-04**



Repository / Repozitorij:

[FCEAG Repository - Repository of the Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy, University of Split](#)



UNIVERSITY OF SPLIT


DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI



UTJECAJ TEMPERATURE I TRAJANJA OPTEREĆENJA NA PONAŠANJE GREDA OD LAMINIRANOG STAKLA

Gabrijela Grozdanić^{1,2}, Mirela Galić¹

(1) *Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, Split, Hrvatska*

(2) *Université de Technologie de Compiègne/Sorbonne Universités, Compiègne, Francuska*
gabrijela.grozdanic@gradst.hr; mirela.galic@gradst.hr

Sažetak

U ovom radu prikazane su neke od osnovnih karakteristika laminiranog stakla te različiti pristupi proračunu nosača izrađenih od laminiranog stakla. Prvo je detaljno opisan mehanizam ponašanja laminiranih staklenih elemenata u fazama prije loma, potom za vrijeme loma te naposljetku nakon loma staklenih elemenata. Opisan je utjecaj svakog materijala na pojedinu fazu te njegove specifičnosti vezane uz vrstu opterećenja i druge vanjske utjecaje. Opisani su pristupi proračunu koji preporučuju norme, kao i njihove prednosti te nedostaci. Daljnji fokus rada je na elementima koji su opterećeni okomito na ravninu spajanja panela te je analiziran statički sustav sukladno normi EN 1288-3 [1] koja opisuje postupak testiranja staklenih elemenata na statičko opterećenje savijanjem u četiri točke (*four-point bending*). U analizi nosači su izloženi različitim trajanjima opterećenja, kao i različitim atmosferskim temperaturama. Rezultati potvrđuju značajan utjecaj temperature i trajanja opterećenja na nosivost staklenih laminiranih nosača.

Ključne riječi: laminirano staklo, savijanje u četiri točke, utjecaj temperature

THE INFLUENCE OF TEMPERATURE AND LOAD DURATION ON THE BEHAVIOR OF LAMINATED GLASS BEAMS

Abstract

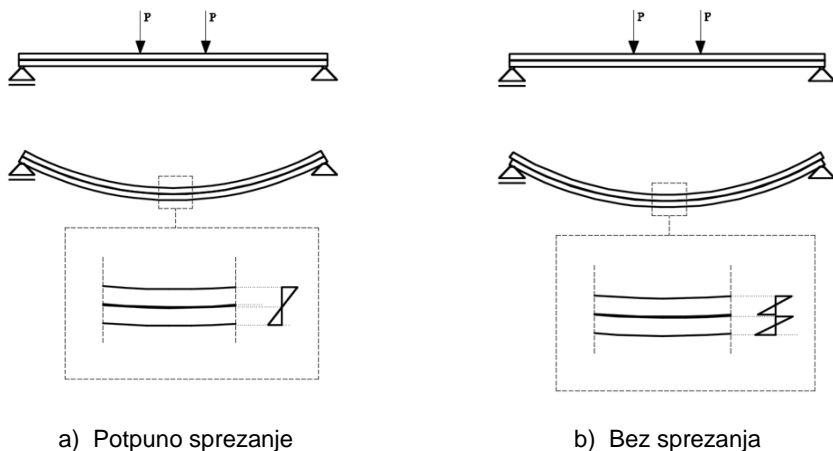
This paper presents some of the basic characteristics of laminated glass and different approaches to the design of elements made of laminated glass. First, the behavior mechanism of laminated glass elements is described in detail for the stages before breakage, during breakage, and after breakage. Also, the influence of each of the materials on a particular phase is described, as well as their peculiarities related to the type of load and other external influences. Different design approaches recommended by the regulations are described, as well as their advantages and disadvantages. Further on, the focus of the work is on the elements that are loaded perpendicular to the panel plane, and static systems are analyzed in accordance with the EN 1288-3 [1] standard, which describes the procedure for testing glass elements for static loading by four-point bending. In the analysis, the elements are exposed to different load durations as well as different atmospheric temperatures. The results of the analysis confirm the significant influence of temperature and load duration on the load capacity of glass laminated elements.

Keywords: laminated glass, four-point bending, temperature effect

1. Uvod

Laminirano staklo je kompozit nastao spajanjem dvaju ili više staklenih panela s polimernim međuslojevima koji osiguravaju cjelovitost elementa i prijenos posmičnih napreznja na kontaktnim ploham. Budući da je staklo izrazito krh materijal, i samim tim nepredvidiv u pogledu gubitka nosivosti, može se reći da je laminirano staklo jedan oblik intervencije u staklenim konstrukcijama kojim se osigurava dodatni kapacitet nosivosti nakon što nastupi lom jednog ili više panela. Ako promatramo samo staklene panele, oni se ponašaju linearno sve do trenutka loma, a napreznje pri lomu ovisi o vrsti stakla koja se koristi. Modul elastičnosti stakla iznosi približno 70 GPa i ne ovisi o vrsti stakla [2]. Staklo ne pokazuje značajne promjene mehaničkih svojstava za prosječne atmosferske utjecaje dok su polimeri koji se koriste u proizvodnji laminiranog stakla izrazito osjetljivi na vanjske utjecaje i na vrstu opterećenja.

U proizvodnji laminiranog stakla najprisutniji međuslojevi su PVB (*polyvinyl butyral*), EVA (*ethylvinyl acetate*) i međuslojevi na bazi lonoplasta. Međusloj dolazi u različitim debljinama, ovisno o vrsti materijala i zahtjevima, a najčešće je to u rasponu 0,36 mm – 2,28 mm. Za razliku od stakla, međuslojevi pokazuju značajna odstupanja u mehaničkim karakteristikama pri različitim temperaturama [3][4], brzini nanošenja opterećenja [5][6][7], trajanju opterećenja [8][9][10] i vlažnosti [11][7]. U literaturi se mogu pronaći testovi na uzorcima međuslojeva koji su samostalni ili koji su ugrađeni unutar dva panela. Budući da međuslojevi prolaze različite procese pri spajanju staklenih panela (kao *autoclave* proces) koji mogu utjecati na mehaničke karakteristike istih, preporuča se testiranje uzoraka koji su prethodno izloženi svim utjecajima ili validiranje testa na uzorcima laminiranog stakla u stvarnoj veličini [12].

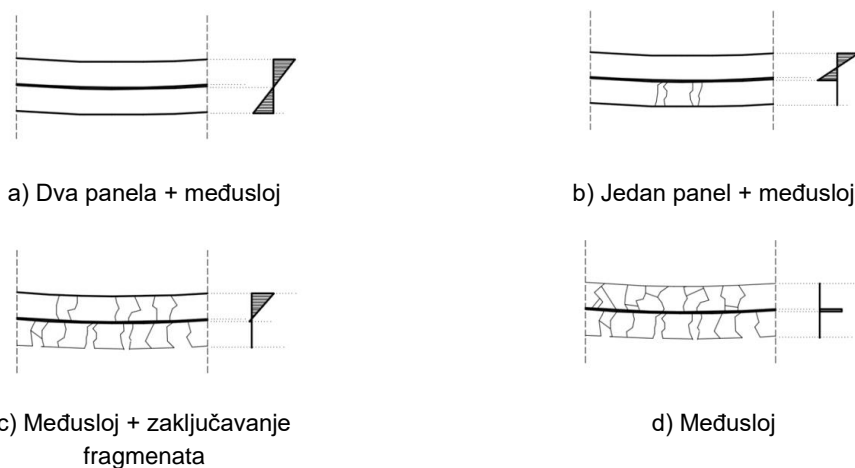


Slika 1. Prikaz raspodjele napreznja na laminiranom nosaču za dva krajnja slučaja ponašanja međusloja – potpuno spreznanje i bez spreznanja [13]

1.1. Laminirani stakleni elementi izloženi opterećenju izvan ravnine

Ako promatramo staklenu laminiranu gredu opterećenu na savijanje (Slika 1.) možemo primijetiti da aksijalne deformacije međusloja nisu značajne jer se međusloj nalazi u sredini

(ili približno u sredini) panela. Sve do trenutka loma jednog staklenog panela međusloj je dominantno izložen posmičnom naprezanju, tj. posmičnoj deformaciji [9]. Ovisno o mehaničkim karakteristikama međusloja, u literaturi se koriste dva limita u ponašanju laminiranih staklenih nosača koja su definirani preko modula posmika G te prikazani na Slici 1: a) potpuno sprezanje ($G \rightarrow \infty$) te b) bez sprezanja ($G \rightarrow 0$). Budući da se pri malim deformacijama i kraćim opterećenjima međuslojevi ponašaju uglavnom linearno [14], viskoznost međusloja ne dolazi do izražaja. Slika 2. prikazuje raspodjelu naprezanja u različitim fazama oštećenja nosača koje su karakteristične za savojno opterećenje. Za dvoslojni laminirani nosač bez oštećenja i međusloj koji ostvaruje sprezanje, raspodjela normalnih naprezanja je linearna (Slika 2. a)). U trenutku loma međusloj preuzima vlačna naprezanja (b) te dolazi do većih deformacija koje aktiviraju nelinearno ponašanje međusloja (ponekad opisano s hiperelastičnim modelima [14]). Kod loma svih panela međusloj preuzima cjelokupno opterećenje, uz eventualno povećanu krutost nastalu zaključavanjem staklenih fragmenata u tlačnoj zoni što ovisi o vrsti stakla (Slika 2. c) i d)). Tek u tim posljednjim fazama pred potpuni lom elementa međusloj je izložen većim deformacijama pri kojima polimerni materijali ulaze u nelinearna viskoplastična ili viskoelastična područja. Nakon što svi stakleni slojevi izgube sposobnost prenošenja opterećenja, nosivost laminiranih staklenih elemenata ovisi o mehaničkom ponašanju međusloja te prijanjanju međusloja i fragmenata stakla. U ovoj fazi potrebna je detaljna simulacija ponašanja međusloja uz odgovarajuću simulaciju prijanjanja međusloja i fragmenata stakla. Istraživanje koje se bavi kapacitetom nosivosti laminiranog stakla nakon loma može se pronaći u [15][16] za opterećenje u ravnini, te u [17][18] opterećenje izvan ravnine (savijanje).



Slika 2. Prikaz faza loma i preraspodjele naprezanja kod laminiranog staklenog nosača opterećenog izvan ravnine [13]

Kod dimenzioniranja svakodnevnih objekata u proračunu elemenata izrađenih od laminiranog stakla ne želimo se dovesti u fazu u kojoj je nastupio lom jednog ili više panela, već dimenzioniramo elemente tako da ostanu cjeloviti pri najvećem očekivanom opterećenju. Smjernice za projektiranje i norme [19][20][21][22] predlažu nekoliko pristupa, od kojih se

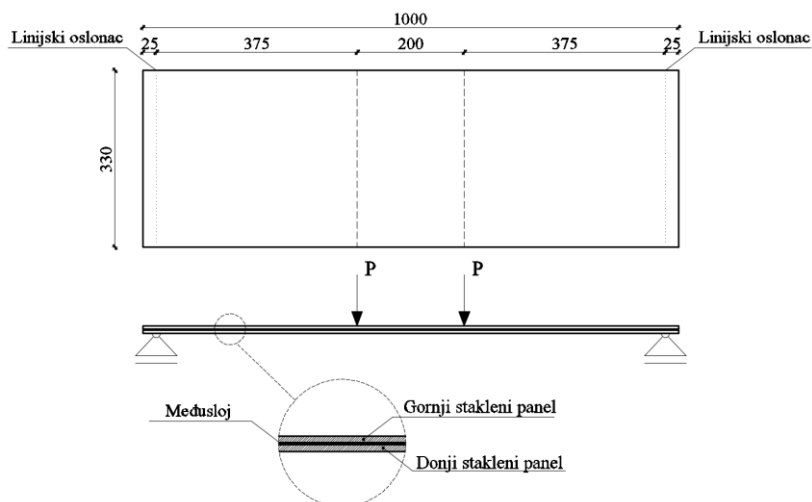
najviše ističe proračun metodom efektivne debljine [23] koji je (uz manje razlike) opisan unutar svake norme. Osim pojednostavljenog proračuna metodom efektivne debljine predlaže se i korištenje detaljnog numeričkog modela koji uzima u obzir sve efekte koji utječu na nosivost laminiranog stakla.

Koristeći upravo detaljni numerički model, analizirat ćemo ponašanje laminiranih staklenih elemenata u fazi prije loma staklenih panela i to za različite temperature i različita trajanja opterećenja.

2. Numerička analiza ponašanja laminiranih staklenih elemenata

2.1. Opis modela

Da bismo analizirali utjecaj temperature i trajanja opterećenja na nosivost laminiranih staklenih nosača, izrađen je numerički model u računalnom programu ANSYS. Dimenzije promatranog elementa su 1000 mm x 330 mm i sastavljen je od dva staklena panela debljine 8 mm s tri različite debljine međuslojeva: 0,76mm (0,89mm), 1,52mm i 2,28mm (PVB i Ionoplast). Staklo je modelirano kao linearno elastičan materijal s modulom elastičnosti $E=70\text{GPa}$, dok su za međusloj usvojene karakteristike preuzete od komercijalnih proizvođača [24][25]. Modul posmika međusloja usvojen je ovisno o trajanju opterećenja i promatranj temperaturi. Raspon promatranih temperatura je u okviru atmosferskih vrijednost 0 – 50 °C, dok je trajanje opterećenja usvojeno kao 1 min, 24 sata te 1 mjesec.

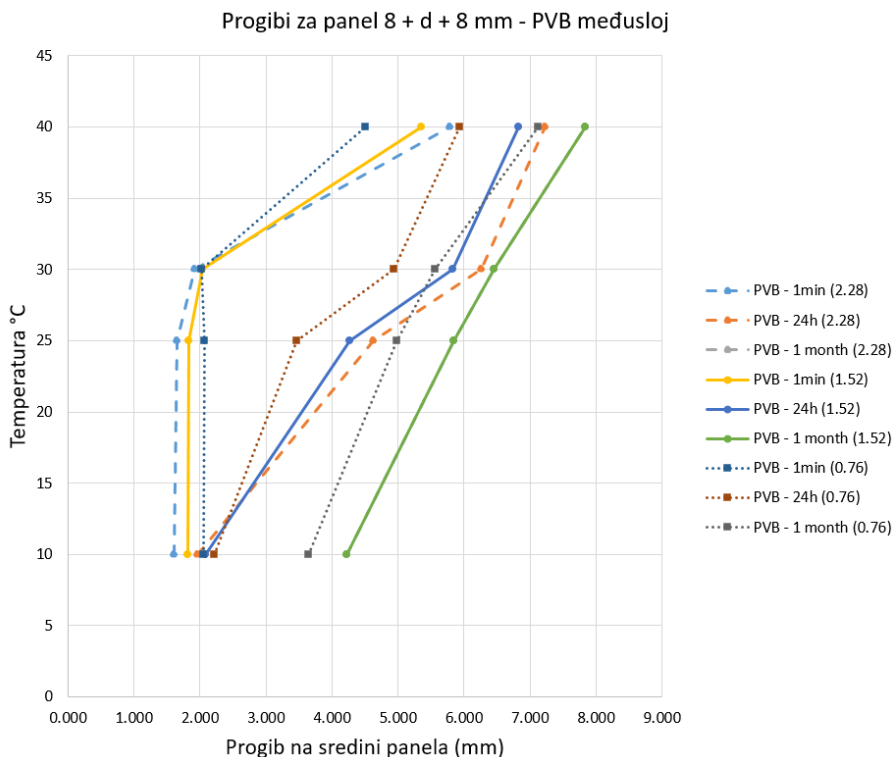


Slika 3. Prikaz statičkog sustava, opterećenja i oblika poprečnog presjeka korištenog u numeričkoj analizi [26]

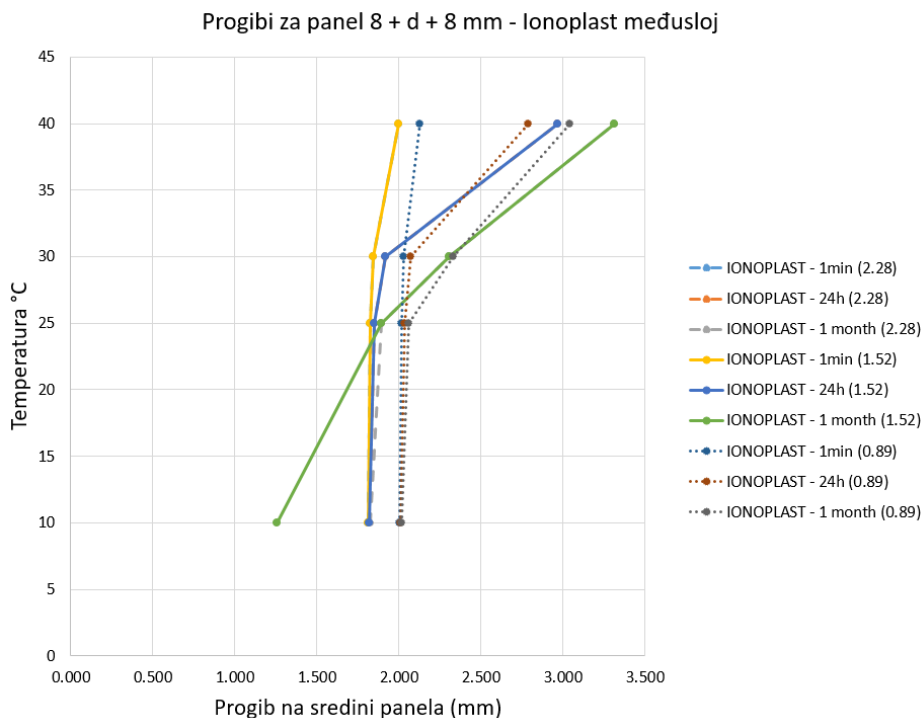
Promatrani su maksimalni progibi koji se razvijaju uslijed opterećenja savijanjem (simulacija testa savijanja u četiri točke). Veličina ukupne sile na elementu usvojena je kao konstantna i iznosi 1000 N te je zadana kao dva linearno raspodijeljena opterećenja na razmaku od 200 mm. Prikaz modela nalazi se na Slici 3.

2.2. Rezultati

Proračun je proveden za konstantnu vrijednost sile uz varijaciju geometrije (d - debljine međusloja), temperature i trajanja opterećenja. Rezultati za dva različita međusloja prikazani su na grafovima (Slika 4. i Slika 5.) Iz rezultata je vidljivo da temperatura i trajanje opterećenja imaju značajan utjecaj na progibe elemenata koji imaju PVB međusloj. Povećanjem debljine međusloja dolazi do efekta omekšavanja elementa pri većim temperaturama i duljim trajanjima opterećenja. Za razliku od PVB međusloja, Ionoplast međusloj pokazuje značajno kruće ponašanje pri povišenim temperaturama i duljim trajanjima opterećenja. Iz grafova je vidljivo da povećanje debljine međusloja kod Ionoplasta doprinosi smanjenju progiba za temperature do 35°C, što nije slučaj kod PVB međusloja.



Slika 4. Prikaz progiba na sredini panela pri različitim temperaturama, trajanju opterećenja i debljini međusloja za element od laminiranog stakla s PVB međuslojem



Slika 5. Prikaz progiba na sredini panela pri različitim temperaturama, trajanju opterećenja i debljini međusloja za element od laminiranog stakla s Ionoplast međuslojem

3. Zaključak

U radu su analizirani dvoslojni laminirani stakleni nosači izloženi savojnom opterećenju sukladno normi EN 1288-3 [1] za koje ne dolazi do loma staklenih panela. Analiza je usmjerena primarno na ponašanje međuslojeva pa samim time i cijele konstrukcije, pri različitim temperaturama i trajanjima opterećenja. Međusloj je ključan element u laminiranim staklenim konstrukcijama jer se preko njega ostvaruje prijenos posmičnih sila među panelima. Taj prijenos se smanjuje s porastom temperature i trajanjem opterećenja što rezultira većim progibima i naprezanjima. U radu je prikazano ponašanje elemenata s dva različita tipa međusloja – PVB i Ionoplast te je iz rezultata vidljivo da temperatura i trajanje opterećenja imaju utjecaj na njihovo ponašanje.

Literatura

- [1] CEN European Committee for Standardization, *EN 1288-3 - Glass in building — Determination of the bending strength of glass — Part 3: Test with specimen supported at two points (four point bending)*. 2016.
- [2] CEN European Committee for Standardization, *EN 16612 - Glass in building — Determination of the lateral load resistance of glass panes by calculation*. 2019.
- [3] T. Hána, M. Eliášová, K. Machalická, and M. Vokáč, "Determination of PVB interlayer's shear modulus and its effect on normal stress distribution in laminated glass panels," 2017, doi: 10.1088/1757-899X/251/1/012076.
- [4] C. Louter, J. Belis, F. Veer, and J. P. Lebet, "Durability of SG-laminated reinforced glass beams: Effects of temperature, thermal cycling, humidity and load-duration," *Construction and Building Materials*, vol. 27, no. 1, pp. 280 – 292, 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.07.046.
- [5] T. Hána, M. Vokáč, M. Eliášová, and K. V. Machalická, "Experimental investigation of temperature and loading rate effects on the initial shear stiffness of polymeric interlayers," *Engineering Structures*, vol. 223, 2020, doi: 10.1016/j.engstruct.2020.110728.
- [6] L. Andreozzi, S. Briccoli Bati, M. Fagone, G. Ranocchiali, and F. Zulli, "Dynamic torsion tests to characterize the thermo-viscoelastic properties of polymeric interlayers for laminated glass," *Construction and Building Materials*, vol. 65, pp. 1 – 13, 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.04.003.
- [7] L. Biolzi, E. Cagnacci, M. Orlando, L. Piscitelli, and G. Rosati, "Long term response of glass-PVB double-lap joints," *Composites Part B: Engineering*, vol. 63, pp. 41 – 49, 2014, doi: 10.1016/j.compositesb.2014.03.016.
- [8] R. Iwasaki, C. Sato, J. L. Latailladeand, and P. Viot, "Experimental study on the interface fracture toughness of PVB (polyvinyl butyral)/ glass at high strain rates," *International Journal of Crashworthiness*, vol. 12, pp. 293 – 298, 2013, doi: 10.1080/13588260701442249.
- [9] P. A. Hooper, B. R. K. Blackman, and J. P. Dear, "The mechanical behaviour of poly (vinyl butyral) at different strain magnitudes and strain rates," *Journal of Materials Science*, vol. 47, pp. 3564 – 3576, 2012.
- [10] X. Zhang, H. Hao, Y. Shi, and J. Cui, "The Mechanical Properties of Polyvinyl Butyral (PVB) at High Strain Rates," *Construction and Building Materials*, vol. 93, pp. 404 – 415, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.04.057>.
- [11] X. Centelles, M. Martín, A. Solé, J. R. Castro, and L. F. Cabeza, "Tensile test on interlayer materials for laminated glass under diverse ageing conditions and strain rates," *Construction and Building Materials*, vol. 243, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118230.
- [12] M. L. Aenlle, A. Noriega, and F. Pelayo, "Mechanical characterization of polyvinil butyral from static and modal tests on laminated glass beams," *Composites Part B*, 2019, doi: 10.1016/j.compositesb.2019.03.077.
- [13] G. Grozdanić, A. Ibrahimbegović, and M. Galić, "Different Approaches in Analyses and Modelling Laminated Glass Elements Exposed to Static Load," in *PROCEEDINGS 6 th International Conference on Computational Methods for Solids and Fluids*, 2023, pp. 90 – 92.
- [14] M. Schuster, M. Kraus, J. Schneider, and G. Siebert, "Investigations on the thermorheologically complex material behaviour of the laminated safety glass

- interlayer ethylene-vinyl-acetate,” *Glass Structures and Engineering*, vol. 3, no. 2, pp. 373–388, 2018, doi: 10.1007/s40940-018-0074-9.
- [15] S. Muralidhar, A. Jagota, S. J. Bennison, and S. Saigal, “Mechanical behaviour in tension of cracked glass bridged by an elastomeric ligament,” *Acta Materialia*, vol. 48, no. 18 – 19, pp. 4577–4588, 2000, doi: 10.1016/S1359-6454(00)00244-5.
- [16] L. Galuppi and G. Royer-Carfagni, “A homogenized model for the post-breakage tensile behavior of laminated glass,” *Composite Structures*, vol. 154, pp. 600 – 615, 2016, doi: 10.1016/j.compstruct.2016.07.052.
- [17] D. Baraldi, A. Cecchi, and P. Foraboschi, “Broken tempered laminated glass: Non-linear discrete element modeling,” *Composite Structures*, vol. 140, pp. 278 – 295, 2016, doi: 10.1016/j.compstruct.2015.12.050.
- [18] L. Biolzi and M. Simoncelli, “Overall response of 2-ply laminated glass plates under out-of-plane loading,” *Engineering Structures*, vol. 256, no. October 2021, p. 113967, 2022, doi: 10.1016/j.engstruct.2022.113967.
- [19] CEN European Committee for Standardization, *prEN 13474-3 - Glass in building - Determination of the strength of glass panes - Part 3: General method of calculation and determination of strength of glass by testing*. 2009.
- [20] CEN European Committee for Standardization, *Guidance for European Structural Design of Glass Components*. 2014.
- [21] Buildings Department, “Code of Practice for Structural Use of Glass,” no. 1, 2018, [Online]. Available: <http://www.hfea.gov.uk/docs/CodeOfPracticeold.pdf%0Awww.tsoshop.co.uk>.
- [22] CEN European Committee for Standardization, *Design of glass structures - Part 2: Design of out-of-plane loaded glass components*. 2021.
- [23] L. Galuppi and G. F. Royer-Carfagni, “Effective thickness of laminated glass beams : New expression via a variational approach,” *Engineering Structures*, vol. 38, pp. 53 – 67, 2012, doi: 10.1016/j.engstruct.2011.12.039.
- [24] AGC Glass Europe, “MATERIAL PROPERTIES OF PVB INTERLAYERS USED IN STRATOBEL AND STRATOBEL STRONG LAMINATED GLASS,” 2018.
- [25] Kuraray, “SentryGlas ® Ionoplast Interlayer-Elastic Properties (SG5000),” *Available online*: https://www.trosifol.com/fileadmin/user_upload/technical_information/downloads/sentryglas/150129_Kuraray_TM_Datenblatt_SG.pdf (accessed on 29 January 2022).
- [26] M. Galić, G. Grozdanić, V. Divić, and P. Marović, “Parametric Analyses of the Influence of Temperature, Load Duration, and Interlayer Thickness on a Laminated Glass Structure Exposed to Out-of-Plane Loading,” *Crystals*, 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/cryst12060838>.