

Szegedi Tudományegyetem, Orvosi Fizikai és Orvosi Informatikai Intézet*
2 SEMILAB, Félvezető Fizikai Laboratórium Zrt.**

Szegedi Tudományegyetem, Optikai és Kvantumelektronikai Tanszék***
Szegedi Tudományegyetem, Konzerváló és Esztétikai Fogászati Tanszék****

Fogászati kompozit tömőanyagok nanoindentációs keménységi vizsgálata

JARÁBIK MAJA LAURA****, JAKAB ANDRÁS****,
TARJÁNYI TAMÁS*, **, JURÁK RÓBERT**, GULYÁS GÁBOR**,
SÁMI MÁRTON**, ***, BALI KRISZTIÁN**, FRÁTER MÁRK****

Bevezetés: A rövid üvegszál megerősítésű kompozitok (SFRC-k) ígéretes alternatívát kínálnak a mély, magas volumen-faktorú kavitások helyreállítására. Vizsgálatunk célja a folyékony SFRC anyag felszíni keménységének meghatározása különböző tömési technikák mellett nanoindentáció segítségével.

Anyag és módszer: Négy csoportban ($n = 18$ / csoport) különböző tömési technikával készült kompozit mintákat vizsgáltunk: rétegzett hagyományos kompozit, rétegzett SFRC, bulk-fill SFRC és bulk-fill kompozit. A minták keménységét azok tetején, oldalán és alján mértük nanoindentációval, vízben tárolás előtt és után.

Eredmények: A bulk-fill kompozit csoport szignifikánsan alacsonyabb keménységi értékeket mutatott minden mérési szinten. Az SFRC minták – rétegzett és bulk technikával egyaránt – magasabb vagy hasonló keménységet produkáltak a hagyományos kompozitokhoz képest.

Következtetések: Az SFRC anyag alkalmazása klinikailag releváns alternatívát jelenthet a mély kavitások helyreállításában, mivel megfelelő keménységet biztosít különböző tömési technikák mellett is.

Kulcsszavak: bulk technika, rétegzett tömés, rövid üvegszál megerősítésű kompozit, keménység, hagyományos kompozit

Bevezetés

A kompozit tömőanyagokat széles körben használják az anterior és poszterior régiókban az elvesztett foganyag helyreállítására [1]. A kis és közepes méretű tömések esetében a hagyományos kompozit restaurátumok megbízható megoldást jelentenek, évente 1–3% közötti sikertelenséget mutatva [2]. Ugyanakkor az éves sikertelenség akár 9,43% is lehet többfelszínű direkt restaurátumok esetében [3]. Minél nagyobb a dentinvesztés kavitás alakítás során, annál magasabb a kockázata a fog eltörésének. Emiatt a modern restauratív eljárások célja az esztétikai és funkcionális helyreállítás mellett a megmaradt fogszerkezet megerősítése, illetve a lehetséges törések elleni védelem [4]. Bár a hagyományos kompozitok a leggyakrabban használt anyagok tömések készítéséhez, fizikai korlátaik a tömés sikertelenségét eredményezhetik, ez különösen megfigyelhető nagy és mély kavitások esetén.

A hagyományos kompozitok két legfontosabb limitációja a polimerizációs zsugorodás, illetve a nem ideális töréssel szembeni szívósságuk [5, 6]. Az utóbbi problémára lehetséges megoldás a rövid üvegszál-megerősí-

tésű kompozit (short fiber-reinforced composite; SFRC) anyagok használata a jelentős dentinhány pótlására.

2014-ben jelent meg a piacon egy paszta állagú SFRC (EverX Posterior, GC Europe, Leuven Belgium), majd ezt követően 2019-ben a folyékony változat (EverX flow, GC Europe). Ezen restauratív kompozitok a dentinhez hasonló töréssel szembeni szívósság értékkel rendelkeznek, ezzel potenciális megerősítési lehetőséget biztosítva a megmaradt foganyagnak [7].

Az üvegszálak anyagokat jellemzően a gyártó ajánlásainak megfelelően hagyományos kompozit réteggel borítva alkalmazzák. Azonban a legújabb kutatások kimutatták, hogy a restaurátumok mechanikai ellenálló képessége fokozható, ha az SFRC anyagot fedés nélkül alkalmazzuk [8]. Lassila és mtsai. kimutatták, hogy a folyékony változat kiemelkedő kopásállósággal rendelkezik a hagyományos kompozitokhoz képest, emellett megfelelő polírozhatóságot is biztosítva [7]. Rawda és mtsai kielégítő klinikai eredményről számoltak be 1,5 éves követéses vizsgálatuk során, amelyben fedés nélkül alkalmazták a folyékony SFRC anyagot [9].

Jelen kutatás célja, hogy a folyékony üvegszálak kompozit mechanikai tulajdonságait vizsgálja különböző res-

Érkezett: 2025. április 28.

Elfogadva: 2025. november 16.

DOI <https://doi.org/10.33891/FSZ.118.2.47-52>

taurációs technikák mellett, valamint megvizsgálja, hogy ezek az értékek kedvezőbbek-e a hagyományos kompozitok értékeihez képest. A vizsgálat nullhipotézise, hogy a vizsgált anyagok között nem lesz szignifikáns különbség a keménység tekintetében.

Vizsgálati anyag és módszer

A vizsgálat során alkalmazott anyagokat és az alkalmazott rétegtechnikát az 1. táblázat foglalja össze. Három különböző rezin kompozit anyag került összehasonlításra: folyékony SFRC (EverX flow), bulk-fill kompozit (SDR flow+) és hagyományos kompozit tömőanyag (G-aenial Posterior).

1. táblázat:

Csoportok jellemzése

Csoport	Alkalmazott anyag	Rétegtechnika
1. (kontroll)	G-aenial Posterior	Rétegzett (2–2–1 mm)
2.	EverX flow	Rétegzett (2–2–1 mm)
3.	EverX flow	Bulk-fill
4.	SDR flow+	Bulk-fill

A vizsgálatban 72 darab standardizált méretű kompozit mintát készítettünk egy 5 × 5 × 5 mm dimenziójú fém-sablon segítségével, mély I. osztályú tömést szimulálva (n = 18/csoport). Az általunk megtervezett és legyártott fém-sablon alján kis méretű perforáció tette lehetővé a kompozit blokkok sérülésmentes eltávolítását.

1. csoport (rétegzett kompozit, kontroll): Paszta állagú hagyományos kompozit tömőanyagot 3 egymást követő rétegben alkalmaztunk (2, 2 és 1 mm, ebben a sorrendben). Minden réteget külön 20 másodpercig fotopolimerizáltunk a gyártó utasításainak megfelelően egy kézi polimerizációs lámpa segítségével (D-Light Pro, GC Europe), melynek átlagos teljesítménye $940 \pm 20,8$ mW/cm² volt. A lámpa teljesítményét digitális fényerősségmérő eszközzel (Bluephase Meter II, Ivoclar Vivadent, Schaan, Liechtenstein) ellenőriztük minden 5. fotopolimerizálást követően.

2. csoport (rétegzett SFRC): Folyékony állagú SFRC anyagot alkalmaztunk az 1. csoportnál részletezett rétegtechnikának és megvilágítási protokollnak megfelelően.

3. csoport (bulk-fill SFRC): A 2. csoportnál alkalmazott folyékony SFRC anyagot egyetlen, 5 mm vastag rétegben alkalmaztuk (bulk-fill technika). A mintákat 20 másodpercig fotopolimerizáltuk.

4. csoport (bulk-fill kompozit): Folyékony bulk-fill kompozit tömőanyagot alkalmaztunk a 3. csoportnál leírt protokollnak megfelelően.

A polimerizáció után a minták felületeit felcsiszoltuk és políroztuk különböző finomságú csiszolópapírokon (P1200, P2500), vízesűtést alkalmazva. Az előkészített mintákat egy rozsdamentes acél hengerre ragasztottuk fel, így előkészítve őket a nanoindentációs vizsgálatra.

Nanoindentációs mérési protokoll

A keménység meghatározásához szükséges mechanikai mérések a Semilab IND-1500 (Semilab, Budapest, Magyarország) nanoindenter mérőberendezéssel kerültek elvégzésre. A nanoindentációs mérés során gyémánt Berkovich nyomótűfejet használtunk. A mérések előtt az új tűvel ömlesztett kvarcon végeztünk kalibrációt és vettük fel a kiértékeléshez szükséges túgeometriára vonatkozó terület korrekciós függvényét. A mérések az ISO 14577 szabványnak megfelelően történtek. Minden mintán 19 különböző pontban történt nanoindentációs mérés, összesen 1368 alkalommal. A különböző mérési pontok között pontosan 40 µm távolságot hagytunk egy számítógép által vezérelt motoros eltoló segítségével. Csoportonként a mintákat további 3 alcsoportra osztottuk az elvégzett mérések irányának megfelelően: 6 mintának csak (a polimerizációs iránynak megfelelően) a tetejét, 6-nak az oldalát és 6-nak az alját mértük. A kiértékeléshez a Poisson-tényezőt 0,27-nek vettük [10]. A mérések után a mintákat desztillált vízben tároltuk 30 napon át, 21 °C állandó hőmérsékleten, majd a méréseket újra elvégeztük a minták tetején.

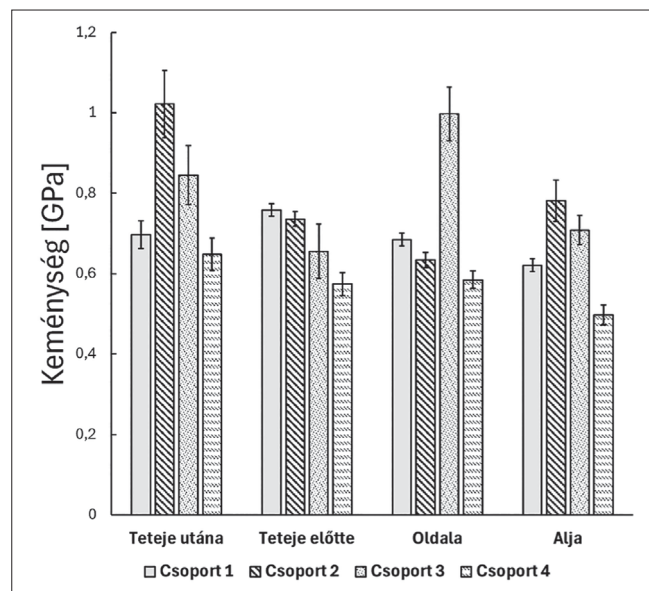
Statisztikai módszerek

A statisztikai kiértékelést az IBM SPSS 23 (IBM Corp., Armonk, NY) szoftverrel végeztük el. A mért keménységértékek normalitásának ellenőrzése után varianciaanalízist (ANOVA) és Bonferroni poszt hoc próbát alkalmaztunk, amely segítségével összehasonlítottuk a csoportok közötti átlagos keménységértékeket. A szignifikanciaszintet a szokásos 5%-nak vettük.

Eredmények

A varianciaanalízis szignifikáns eltérést mutatott a csoportoknál mért átlagos keménységi értékek között. A Bonferroni poszt hoc próba eredményeit a 2–5. táblázat foglalja össze, az átlagos értékeket (a standard hibával együtt) az 1. kép szemlélteti. Vízben tárolás előtt a 4. csoport szignifikáns eltérést mutatott a többi csoporttal összehasonlítva (2. táblázat, a minták tetején mért átlagos keménységi értékek vízben való tárolás előtt). Vízben tárolás után azonban az első csoporthoz képest az eltérés már nem mutatkozott szignifikánsnak (3. táblázat, a minták tetején mért átlagos keménységi értékek vízben való tárolás után). A minták oldalán történt mérések esetében a 3. csoport minden csoporttal szemben szignifikáns eltérést mutatott. A 2. és 4. cso-

portok között nem volt szignifikáns eltérés. A minták alján történt mérések esetében a 4. csoport méréseinél kapott eredmények szignifikánsan különböztek a többi csoporttól (5. táblázat, a minták alján mért átlagos keménységi értékek, vízben való tárolás előtt).



1. kép: A nanoindentáció során mért átlagos keménység a különböző kompozit csoportokra nézve, a minták tetején desztillált vízben tárolás után és előtt, a minták oldalán és a minták alján, a hibásáv a standard hibát jelöli.

2. táblázat:

A Bonferroni poszt hoc próba p-érték eredményei, összehasonlítva a különböző kompozit csoportok tetején mért átlagos keménységet vízben tárolás után.

	Csoport 1.	Csoport 2.	Csoport 3.	Csoport 4.
Csoport 1.	–			
Csoport 2.	0,001*	–		
Csoport 3.	0,214	0,440	–	
Csoport 4.	1,000	< 0,001*	0,05*	–

3. táblázat:

A Bonferroni poszt hoc próba p-érték eredményei, összehasonlítva a különböző kompozit csoportok tetején mért átlagos keménységet vízben tárolás előtt.

	Csoport 1.	Csoport 2.	Csoport 3.	Csoport 4.
Csoport 1.	–			
Csoport 2.	1,000	–		
Csoport 3.	0,030*	0,829	–	
Csoport 4.	< 0,001*	< 0,001*	< 0,001*	–

4. táblázat:

A Bonferroni poszt hoc próba p-érték eredményei, összehasonlítva a különböző kompozit csoportok oldalán mért átlagos keménységet vízben tárolás előtt.

	Csoport 1.	Csoport 2.	Csoport 3.	Csoport 4.
Csoport 1.	–			
Csoport 2.	0,913	–		
Csoport 3.	< 0,001*	< 0,001*	–	
Csoport 4.	0,001*	0,214	< 0,001*	–

5. táblázat:

A Bonferroni poszt hoc próba p-érték eredményei, összehasonlítva a különböző kompozit csoportok alján mért átlagos keménységet vízben tárolás előtt.

	Csoport 1.	Csoport 2.	Csoport 3.	Csoport 4.
Csoport 1.	–			
Csoport 2.	0,088	–		
Csoport 3.	1,000	1,000	–	
Csoport 4.	< 0,001*	< 0,001*	< 0,001*	–

Diszkusszió

A magas C-faktorral rendelkező, mély kavitások helyreállítása továbbra is komoly kihívást jelent a klinikusok számára [11, 12]. Ez a nehézség részben a hagyományos kompozitok anyagtani tulajdonságaiból, beleértve a polimerizációs zsugorodást és az elégtelen töréssel szembeni szívósságot [6], valamint a kavitás sajátosságaiból, mint például a C-faktorból és a volumen faktorból fakad [13]. A C-faktor megbízható indikátora a zsugorodás okozta feszültségnek, különösen, ha a kavitás térfogata állandó [14]. Továbbá a kavitás térfogatának növekedése fokozott polimerizációs zsugorodást és nagyobb repedésképződést eredményez [15]. Jelen vizsgálatban egy mély kavitás dimenzióit szimuláltuk, hogy méréseink klinikai relevanciával bírjanak.

A fent említett kihívások a rétegzéses restauratív technikával részben kezelhetők. Ez a technika 2 mm vastagságú rétegek ferdén vagy vízszintesen történő applikálását foglalja magában, amely csökkentheti a polimerizációs zsugorodás okozta feszültséget azáltal, hogy rétegenként módosítja a kavitás konfigurációját, ezáltal befolyásolva a C-faktort [16]. Ugyanakkor ez a módszer összetett, hosszú kezelési időt igényel, és rétegek közötti rések kialakulásához vezethet. Az egyszerűsített technikák iránti igény vezetett a bulk-fill kompozitok megjelenéséhez [17]. A bulk-fill anyagok nagyobb átvilágíthatósággal rendelkeznek, amelyet vagy az átlátszóság növelésével érnek el, hogy fokozzák a fényá-

terestést [18], vagy reaktívabb fotoiniciátorok, feszültségcsökkentő monomerek és innovatív töltőanyagok, például előpolimerizált részecskék és üvegszál-szegmensek alkalmazásával [17]. Azonban továbbra is kérdéses, hogy a bulk-fill kompozitokat egyetlen rétegben vagy inkább rétegezve érdemes-e alkalmazni, valamint szükséges-e hagyományos fedőréteg alkalmazása [19–21].

Vizsgálatunkban az SFRC anyagot különböző direkt restaurációs technikákkal alkalmaztuk. A direkt restaurátumokban a fogászati tömőanyagok teherbíró szerkezeti elemekként vannak jelen, amely megköveteli, hogy az anyag megfelelő mechanikai tulajdonságokkal rendelkezzen. Ezért szükség van a használandó anyagok általános mechanikai jellemzésére. Egy hasznos kiindulópont a feszültség-deformáció (vagy terhelés–alakváltozás) tulajdonságok mérése [22]. A nanoindentáció lehetővé teszi a kiválasztott anyagtulajdonságok vizsgálatát kis mennyiségű anyagon, a benyomódások terhelés–elmozdulás adatai alapján. A nanoindentáció előnyös a hagyományos módszerekkel szemben a nagy erőfelbontás és a pontos benyomódási hely meghatározása miatt [23–25].

Vizsgálatunkban statikus nanoindentációval értékeltük a különböző direkt restaurációk keménységét három szinten: a restaurátum tetején, az oldalán és az alján. Érdekes módon a bulk-fill kompozit tömőanyag (SDR, 4. csoport) szignifikánsan alacsonyabb keménységi értékeket mutatott mindhárom szinten a többi csoporthoz képest. Eredményeink összhangban állnak a korábbi irodalmi adatokkal, amelyek szerint a bulk-fill kompozit az egyik legalacsonyabb felületi keménységgel rendelkező kompozit volt a vizsgált anyagok között [26]. Ez a különbség az SDR alacsonyabb töltőanyag-tartalmának (68 tömeg%) és esetleg a monomer konverzió alacsonyabb fokának tulajdonítható [7, 12]. Az oldalsó keménységi értékeket vizsgálva a bulk-fill kompozit (SDR, 4. csoport) jelentősen alacsonyabb keménységet mutatott a kontrollcsoporthoz (rétegzett kompozit tömés) képest. Ezzel szemben a 70 tömeg% töltőanyagot tartalmazó SFRC oldalsó és alsó keménységi értékei összehasonlíthatók vagy magasabbak voltak, mint a 77 tömeg% töltőanyagot tartalmazó rétegzett, hagyományos kompozit csoporté (kontrollcsoporthoz). Ez a folyékony SFRC egyedi szerkezetének tulajdonítható, amely nagy mennyiségű üvegszál (25 tömeg%) tartalmaz a báriumüveg-részecskék (45 tömeg%) mellett. Az üvegszálak, amelyek keményebbek, mint a báriumüveg-részecskék, feltehetően hozzájárulnak a megfigyelt keménységnövekedéshez. Továbbá a folyékony SFRC (bulk árnyalat) átlátszó, és üvegszála szórják a fényt, ami javíthatja a konverzió mértékét, és lehetővé teszi akár 5,5 mm vastagságú rétegek alkalmazását [7].

A minták alsó részén a bulk és a hagyományos kompozit csoportok (4. és 1. csoport) szignifikánsan alacsonyabb keménységi értékeket mutattak, mint az SFRC csoportok. Ez összhangban van Karacolak és mtsai eredményeivel, akik arról számoltak be, hogy az SDR

a legalacsonyabb mikrokeménységi értéket mutatta a vizsgált bulk-fill anyagok között [27]. Számos tanulmány kimutatta, hogy mind a hagyományos, mind a bulk-fill kompozit anyagok esetében a mikrokeménység fokozatosan csökken a „felső” rétegtől az „alsó” réteg felé, és ennek mértéke jelentősen függ az adott kompozit típusától [27, 28]. Érdekes módon a minták alsó részén nem volt szignifikáns különbség a keménységben a különböző csoportok között. Ez azt jelzi, hogy a folyékony SFRC rétegezett és bulk technikával alkalmazva is hasonló keménységi értékeket eredményezett. Eredményeink összhangban vannak Fráter és mtsai megállapításaival, akik nanoindentációval mérve nem találtak különbséget a bulk és rétegezett SFRC restaurációk mikrokeménységi értékei között mesterséges gyökércsatornában [29]. Hasonlóképpen, Néma és mtsai nem találtak különbséget a rétegzett és bulk-fill SFRC restaurációk között sem a különböző mélységekben (felső, középső, alsó) mért konverzió mértéke tekintetében [14]. Ez feltehetően az anyag átlátszó jellegének és az üvegszálak által elősegített fényáteresztésnek köszönhető. Továbbá Néma és mtsai azt is kimutatták, hogy nincs különbség a polimerizáció által kiváltott repedésképződés tekintetében sem a rétegzett, sem a bulk módon alkalmazott SFRC restaurációk esetében [30]. Ugyanakkor Néma és kollégái megfigyelték, hogy a bulk alkalmazás kevesebb polimerizációs zsugorodási rés kialakulásához vezetett, mint a rétegzett SFRC alkalmazása [14].

Érdekes módon a vízben tárolást követően nem mutatkozott különbség a kontrollcsoporthoz (rétegzett kompozit tömés) és a bulk-fill kompozit (4. csoport) keménységi értékei között. A víz lágyító anyagként hat a kompozit mátrixra, csökkentve a polimer gyanta keménységét [31, 32]. Ez az eredmény összhangban áll az irodalmi adatokkal, amelyek szerint a fogászati kompozitok mikrokeménysége vízben tárolás előtt magasabb, mint utána [33]. Ugyanakkor a víz hatása az anyagok keménységére anyagfüggő, és nem minden kompozit esetében jelentkezik jelentős csökkenés [34]. A bulk-fill kompozit (SDR, 4. csoport) keménységi értékei alacsonyabbak voltak a vízben tárolás után, mint a bulk (3. csoport) és a rétegzett SFRC (2. csoport) csoportoké. Ez valószínűleg az anyagok közötti jelentős összetételbeli különbségeknek köszönhető.

Konklúzió

Eredményeink alapján megállapítható, hogy az SFRC anyag rétegezett és bulk technikával egyaránt alkalmazható anélkül, hogy jelentős különbség lenne a mechanikai tulajdonságokban. Az SFRC alkalmazása különösen előnyös lehet a mély, magas C-faktorú kavitások helyreállításánál, mivel megfelelő keménységi értékeket biztosít mind a felső, mind az alsó rétegekben. Vizsgálatunknak ugyanakkor vannak korlátai: az *in vitro* környezet nem tükrözi teljes mértékben a klini-

kai viszonyokat, valamint a mechanikai tulajdonságok közül jelen tanulmány kizárólag a keménységet értékelte. A jövőbeni kutatások során indokolt lehet további mechanikai paraméterek vizsgálata. Továbbá a nanoindentációs teszt rendkívül érzékeny módszer, amelynek mérési tartománya szűk, így az eredmények változékonyságot mutathatnak attól függően, hogy a benyomódás az üvegszál felszínén vagy a mátrixon történik-e. A jövőben érdemes a jelen vizsgálatban szereplő mély töméseket fárasztásos terhelésnek is kitenni, illetve a későbbiekben *in vivo* körülmények között is tesztelni.

Irodalom

1. HAAK R, NÁKE T, PARK K-J, ZIEBOLZ D, KRAUSE F, SCHNEIDER H: Internal and marginal adaptation of high-viscosity bulk-fill composites in class II cavities placed with different adhesive strategies. *Odontology* 2019; 107: 374–382. <https://doi.org/10.1007/s10266-018-0402-1>
2. DEMARCO FF, CORRÊA MB, CENCI MS, MORAES RR, OPDAM NJM: Longevity of posterior composite restorations: Not only a matter of materials. *Dental Materials* 2012; 28: 87–101. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2011.09.003>
3. DA ROSA RODOLPHO PA, DONASSOLLO TA, CENCI MS, LOGUÉRCIO AD, MORAES RR, BRONKHORST EM, et al: 22-Year clinical evaluation of the performance of two posterior composites with different filler characteristics. *Dental Materials* 2011; 27: 955–963. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2011.06.001>
4. TAHA NA, PALAMARA JE, MESSER HH: Fracture strength and fracture patterns of root filled teeth restored with direct resin restorations. *Journal of Dentistry* 2011; 39: 527–535. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2011.05.003>
5. SADR A, BAKHTIARI B, HAYASHI J, LUONG MN, CHEN Y-W, CHYZ G, et al: Effects of fiber reinforcement on adaptation and bond strength of a bulk-fill composite in deep preparations. *Dental Materials* 2020; 36: 527–534. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2020.01.007>
6. LASSILA L, SÄILYNÖJA E, PRINSSI R, VALLITTU PK, GAROUSHI S: Fracture behavior of Bi-structure fiber-reinforced composite restorations. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials* 2020; 101: 103444. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2019.103444>
7. LASSILA L, SÄILYNÖJA E, PRINSSI R, VALLITTU P, GAROUSHI S: Characterization of a new fiber-reinforced flowable composite. *Odontology* 2019; 107: 342–352. <https://doi.org/10.1007/s10266-018-0405-y>
8. JAKAB A, PALKOVICS D, T. SZABÓ V, SZABÓ B, VINCZE-BANDI E, BRAUNITZER G, et al: Mechanical Performance of Extensive Restorations Made with Short Fiber-Reinforced Composites without Coverage: A Systematic Review of In Vitro Studies. *Polymers* 2024; 16: 590. <https://doi.org/10.3390/polym16050590>
9. ELAZIZ RHA, ELAZIZ SAA, ELAZIZ PMA, FRATER M, VALLITTU PK, LASSILA L, et al: Clinical evaluation of posterior flowable short fiber-reinforced composite restorations without proximal surface coverage. *Odontology* 2024; 112: 1274–1283. <https://doi.org/10.1007/s10266-024-00905-5>
10. LOURENÇO AL, JAGER ND, PROCHNOW C, MILBRANDT DUTRA DA, KLEVERLAAN CJ: Young's modulus and Poisson ratio of composite materials: Influence of wet and dry storage. *Dent Mater J* 2020; 39: 657–663. <https://doi.org/10.4012/dmj.2019-165>
11. BATTANCS E, SÁRY T, MOLNÁR J, BRAUNITZER G, SKOLNIKOVICS M, SCHINDLER Á, et al: Fracture Resistance and Microleakage around Direct Restorations in High C-Factor Cavities. *Polymers (Basel)* 2022; 14: 3463. <https://doi.org/10.3390/polym14173463>
12. HARP YS, MONTASER MA, ZAGHLOUL NM: Flowable fiber-reinforced versus flowable bulk-fill resin composites: Degree of conversion and microtensile bond strength to dentin in high C-factor cavities. *J Esthet Restor Dent* 2022; 34: 699–706. <https://doi.org/10.1111/jerd.12901>
13. MAGNE P, CARVALHO MA, MILANI T: Shrinkage-induced cuspal deformation and strength of three different short fiber-reinforced composite resins. *J Esthet Restor Dent* 2023; 35: 56–63. <https://doi.org/10.1111/jerd.12998>
14. NÉMA V, KUNSÁGI-MÁTÉ S, ŐRI Z, KISS T, SZABÓ P, SZALMA J, et al: Relation between internal adaptation and degree of conversion of short-fiber reinforced resin composites applied in bulk or layered technique in deep MOD cavities. *Dental Materials* 2024; 40: 581–592. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2024.02.013>
15. BRAGA R, BOARO L, KUROSU T, AZEVEDO C, SINGER J: Influence of cavity dimensions and their derivatives (volume and 'C' factor) on shrinkage stress development and microleakage of composite restorations. *Dental Materials* 2006; 22: 818–823. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2005.11.010>
16. PARK J, CHANG J, FERRACANE J, LEE IB: How should composite be layered to reduce shrinkage stress: Incremental or bulk filling? *Dental Materials* 2008; 24: 1501–1505. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2008.03.013>
17. FRONZA BM, RUEGGEBERG FA, BRAGA RR, MOGILEVYCH B, SOARES LES, MARTIN AA, et al: Monomer conversion, microhardness, internal marginal adaptation, and shrinkage stress of bulk-fill resin composites. *Dental Materials* 2015; 31: 1542–1551. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2015.10.001>
18. BUCUTA S, ILIE N: Light transmittance and micro-mechanical properties of bulk fill vs. conventional resin based composites. *Clin Oral Invest* 2014; 18: 1991–2000. <https://doi.org/10.1007/s00784-013-1177-y>
19. AL-ZAIN AO, BAEESA L, JASSOMA E, ALGHILAN MA, HARIIRI M, ISMAIL EH, et al: Assessment of internal porosities for different placement techniques of bulk-fill resin-based composites: a micro-computed tomography study. *Clin Oral Invest* 2023; 27: 7489–7499. <https://doi.org/10.1007/s00784-023-05337-z>
20. AL-NAHEDH H, ALAWAMI Z: Fracture Resistance and Marginal Adaptation of Capped and Uncapped Bulk-fill Resin-based Materials. *Operative Dentistry* 2020; 45: e43–56. <https://doi.org/10.2341/17-367-L>
21. TSUJIMOTO A, JURADO C, BARKMEIER W, SAYED M, TAKAMIZAWA T, LATTI M, et al: Effect of Layering Techniques on Polymerization Shrinkage Stress of High- and Low-viscosity Bulk-fill Resins. *Operative Dentistry* 2020; 45: 655–663. <https://doi.org/10.2341/19-217-L>
22. HE LH, SWAIN MV: Nanoindentation derived stress-strain properties of dental materials. *Dental Materials* 2007; 23: 814–821. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2006.06.017>
23. TAKAHASHI A, SATO Y, UNO S, PEREIRA PNR, SANO H: Effects of mechanical properties of adhesive resins on bond strength to dentin. *Dental Materials* 2002; 18: 263–268. [https://doi.org/10.1016/S0109-5641\(01\)00046-X](https://doi.org/10.1016/S0109-5641(01)00046-X)
24. VAN MEERBEEK B, WILLEMS G, CELIS JP, ROOS JR, BRAEM M, LAMBRECHTS P, et al: Assessment by Nano-indentation of the Hardness and Elasticity of the Resin-Dentin Bonding Area. *J Dent Res* 1993; 72: 1434–1442. <https://doi.org/10.1177/00220345930720101401>
25. SADR A, SHIMADA Y, LU H, TAGAMI J: The viscoelastic behavior of dental adhesives: A nanoindentation study. *Dental Materials* 2009; 25: 13–19. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2008.05.001>
26. ATTIK N, COLON P, GAUTHIER R, CHEVALIER C, GROSGOGÉAT B, ABOUELLEIL H: Comparison of physical and biological properties of

- a flowable fiber reinforced and bulk filling composites. *Dental Materials* 2022; 38: e19–30. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2021.12.029>
27. KARACOLAK G, TURKUN LS, BOYACIOGLU H, FERRACANE JL: Influence of increment thickness on radiant energy and microhardness of bulk-fill resin composites. *Dental Materials Journal* 2018; 37: 206–213. <https://doi.org/10.4012/dmj.2017-032>
 28. FLURY S, HAYOZ S, PEUTZFELDT A, HÜSLER J, LUSSI A: Depth of cure of resin composites: Is the ISO 4049 method suitable for bulk fill materials? *Dental Materials* 2012; 28: 521–528. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2012.02.002>
 29. FRÁTER M, GROSZ J, JAKAB A, BRAUNITZER G, TARJÁNYI T, GULYÁS G, et al: Evaluation of microhardness of short fiber-reinforced composites inside the root canal after different light curing methods – An in vitro study. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials* 2024; 150: 106324. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2023.106324>
 30. NÉMA V, SÁRY T, SZÁNTÓ FL, SZABÓ B, BRAUNITZER G, LASSILA L, et al: Crack propensity of different direct restorative procedures in deep MOD cavities. *Clin Oral Invest* 2023; 27: 2003–2011. <https://doi.org/10.1007/s00784-023-04927-1>
 31. ALSHABIB A, SILIKAS N, WATTS DC: Hardness and fracture toughness of resin-composite materials with and without fibers. *Dental Materials* 2019; 35: 1194–1203. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2019.05.017>
 32. DRUMMOND JL: Degradation, Fatigue, and Failure of Resin Dental Composite Materials. *J Dent Res* 2008; 87: 710–719. <https://doi.org/10.1177/154405910808700802>
 33. KHAIRY NM, ELKHOLANY NR, ELEMBAEY AE: Evaluation of surface microhardness and gingival marginal adaptation of three different bulk-fill flowable resin composites: A comparative study. *J Esthet Restor Dent* 2024; 36: 920–929. <https://doi.org/10.1111/jerd.13211>
 34. CAVALCANTE LM, SCHNEIDER LFJ, SILIKAS N, WATTS DC: Surface integrity of solvent-challenged ormocer-matrix composite. *Dental Materials* 2011; 27: 173–179. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2010.10.002>

Original article

JARÁBIK ML, JAKAB A, TARJÁNYI T, JURÁK R, GULYÁS G, SÁMI M, BALI K, FRÁTER M

Nanoindentation hardness study of dental composite filling materials

Background: Short fiber-reinforced composites (SFRCs) offer a promising alternative for restoring deep cavities with high volume factor. The aim of this study was to evaluate the surface hardness of flowable SFRC using nanoindentation, applying different restorative techniques.

Materials and Methods: Composite specimens were prepared in four groups (n = 18 / group), each representing a different restorative technique: layered conventional composite, layered SFRC, bulk-fill SFRC, and bulk-fill composite. The hardness of the specimens was measured on their top, side, and bottom surfaces using a nano indenter, both before and after water storage. All specimens were prepared in standardized moulds simulating deep Class I cavities. Nanoindentation was performed in 19 locations per sample using a Berkovich diamond tip, following the ISO 14577 standards.

Results: The bulk-fill composite group showed significantly lower hardness values across all measurement levels. In contrast, both the layered and bulk-fill SFRC groups demonstrated higher or comparable surface hardness values to the layered conventional composite group. Water storage reduced surface hardness in all groups, but the effect was more pronounced in the bulk-fill composite group.

Conclusions: Based on our results, flowable SFRC can be applied using either a layered or bulk-fill technique without significant differences in mechanical properties. This material may be particularly advantageous for restoring deep cavities with high volume factor, as it provides adequate surface hardness at both coronal and apical levels.

Keywords: bulk-fill, layered filling, short fiber-reinforced composite, microhardness, conventional composite