



Materiały kompozytowe są stosowane w wielu dziedzinach przemysłu, takich jak branża lotnicza, samochodowa czy budowlana [2]. W tej ostatniej potencjał tych materiałów najczęściej wykorzystywany jest w mostownictwie, a liczba obiektów wykonanych w całości lub w części z roku na rok rośnie. Wynika to z potrzeby zwiększenia wytrzymałości i obniżenia masy konstrukcji [2]. Wymagania te spełniane są przez kompozyty. Niestety materiały te ze względu na dużą popularność i znajomość parametrów tradycyjnych materiałów takich jak beton lub stal, są rzadziej stosowane. Spowodowane jest to faktem, iż w chwili obecnej brak jest norm oraz wytycznych do projektowania konstrukcji z ich użyciem [2].

Projekty takie jak np. FOBRIDGE lub COM-BRIDGE są cennym źródłem wiedzy na temat analizy i zachowania się konstrukcji, zbudowanych w pełni lub w części z laminatów [3]. Wspomniane projekty przyczyniają się do rozwoju i wykorzystania materiałów kompozytowych.

W niniejszym referacie przedstawiono wyznaczanie zastępczych parametrów materiałowych pięciu próbek laminatów, różniących się liczbą warstw oraz orientacją zbrojenia. Próbkę te wykonane były z osnowy (fazy ciągłej), którą jest polimer winyloestrowy oraz ze zbrojenia (fazy rozproszonej) w postaci włókna szklanego [2]. W celu weryfikacji modeli obliczeniowych, zostały przeprowadzone badania eksperymentalne na próbkach laminatów. Badanie doświadczalne zostało przeprowadzone jako statyczna próba rozciągania. Modele numeryczne wykonano w komercyjnym programie obliczeniowym Abaqus, który wykorzystuje metodę elementów skończonych (MES) [6].

BADANIE DOŚWIADCZALNE

Materiały charakteryzują się określonymi właściwościami fizycznymi, które warunkują ich jakość, a także ich przydatność. W praktyce nie jest możliwe określenie wszystkich fizycznych właściwości materiałów. Podstawowe charakterystyki, takie jak moduł Young'a oraz współczynnik Poissona, należą do grupy jednych z najważniejszych, opisujących materiał parametrów [1].

Statyczna próba rozciągania laminatów GFRP

Utworzono: wtorek, 18, czerwiec 2019 12:59

Tą grupę obejmują te właściwości, które określane są za pomocą stosunkowo prostych metod, a jednocześnie dostarczają istotnych informacji o testowanym materiale. Z tego punktu widzenia najbardziej odpowiednim przykładem jest badanie właściwości naprężonych materiałów, a dokładniej właściwości, które można obliczyć z krzywej otrzymanej w teście jednoosiowego rozciągania. Próba rozciągania polega na jednoosiowym odkształceniu próbki o określonych wymiarach przy stałej prędkości i pomiarze lub rejestracji odkształceń w zależności od siły [1].

W tym rozdziale zostaną przedstawione wyniki z testu jednoosiowego rozciągania dla próbek wielowarstwowych kompozytów, zbrojonych dwukierunkowo. W tabeli 1 przedstawiono próbki, które zostały poddane badaniu, różnią się one ilością oraz orientacją zbrojenia. Wzmocnienie to włókno szklane, wykonane jest ono z tkaniny dwukierunkowej, szytej BAT ($[0^\circ/90^\circ]$ lub $[90^\circ/0^\circ]$) lub GBX ($[-45^\circ/+45^\circ]$ lub $[+45^\circ/-45^\circ]$). Celem tego badania było określenie parametrów materiałowych oraz wytrzymałości laminatów.

Tab. 1. Badane próbki – ilość oraz orientacją zbrojenia

Oznaczenie	Orientacja zbrojenia	Zawartość
P2	$[0^\circ/90^\circ]$ $[90^\circ/0^\circ]$	2xBAT 2xBAT
P3	$[0^\circ/90^\circ]$ $[90^\circ/0^\circ]$	3xBAT 3xBAT
P4	$[0^\circ/90^\circ]$ $[90^\circ/0^\circ]$	4xBAT 4xBAT
P5	$[+45^\circ/-45^\circ]$ $[-45^\circ/+45^\circ]$	2xGBX 2xGBX
P6	$[+45^\circ/-45^\circ]$ $[-45^\circ/+45^\circ]$	3xGBX 3xGBX
P7	$[+45^\circ/-45^\circ]$ $[-45^\circ/+45^\circ]$	4xGBX 4xGBX

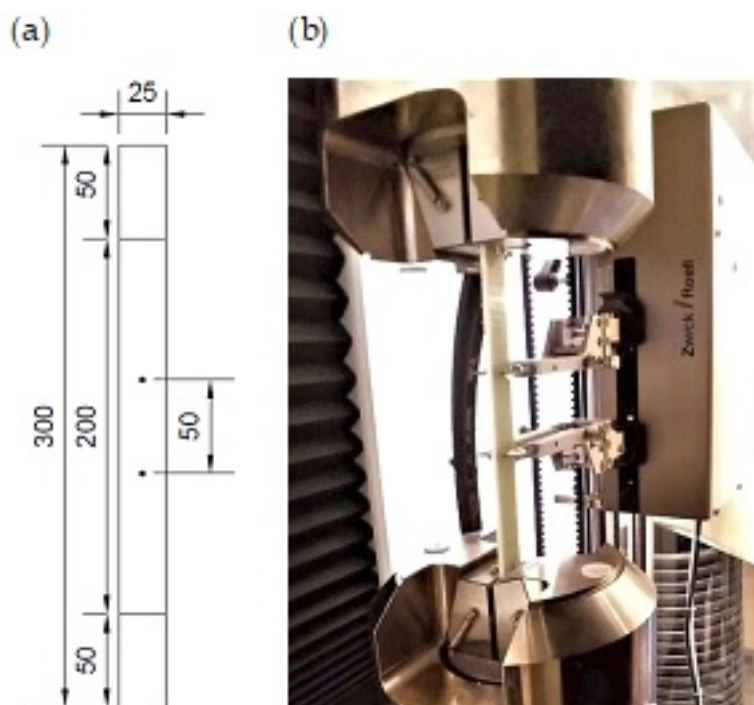
Badany materiał jest anizotropowy.

Do określenia właściwości laminatów zaadaptowano standard ISO 527-4 [8]. Norma ta określa kształt próbek i metodę wyznaczenia właściwości mechanicznych. Wymiary próbki powinny być prostokątne 25x250 mm, jednakże w tym badaniu wynosiły one 25x300 mm, jak pokazano na rysunku poniżej (Rys. 1a). Długość próbek nie była istotna, ze względu na wykorzystanie ekstensometrów osiowych. Test jednoosiowego rozciągania wykonano na maszynie testującej Zwick/Roell Z100 (Rys. 1b). Zastosowano ekstensometry osiowe, w rozstawie 50 mm. Mierzyły one odkształcenia podłużne próbek. Początkową siłę przyjęto na poziomie 200 N. Testy

Statyczna próba rozciągania laminatów GFRP

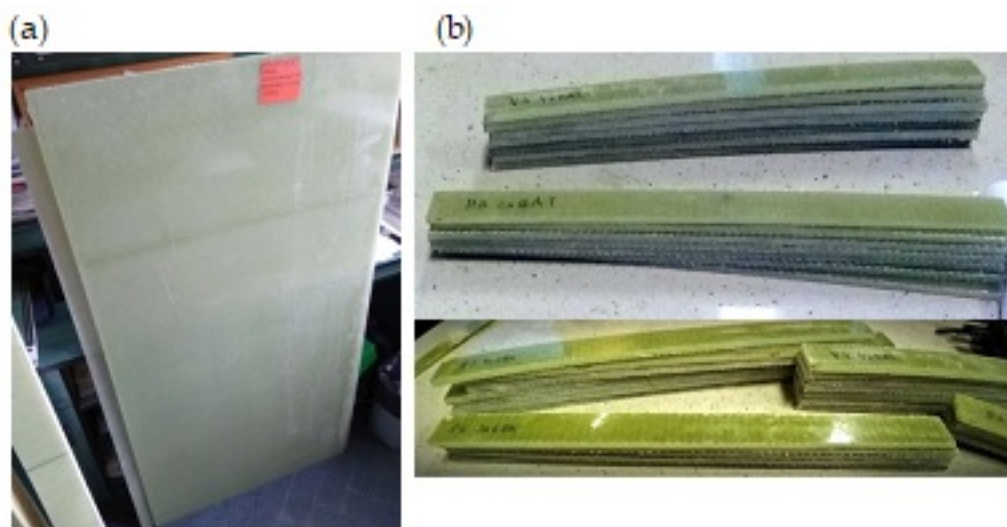
Utworzono: wtorek, 18, czerwiec 2019 12:59

przeprowadzono przy stałej prędkości maszyny 2 mm/min, aż do zniszczenia próbek. Wykonano po pięć prób dla każdej z próbek.



Rys. 1. Próbk
a) wymiary [mm] b) próbka w maszynie przed przeprowadzeniem pomiaru

Próbki (Rys. 2b) były wycinane ręcznie, za pomocą szlifierki, z większej płyty (Rys 2a). Spowodowało to nieznaczne różnice w wartości szerokości. W tabeli 2 przedstawiono pomierzone za pomocą suwmiarki szerokość oraz wysokość każdej z badanych próbek.



Statyczna próba rozciągania laminatów GFRP

Utworzono: wtorek, 18, czerwiec 2019 12:59

*Rys. 2. Zbadane próbki
a) płyta GFRP b) pocięte próbki*

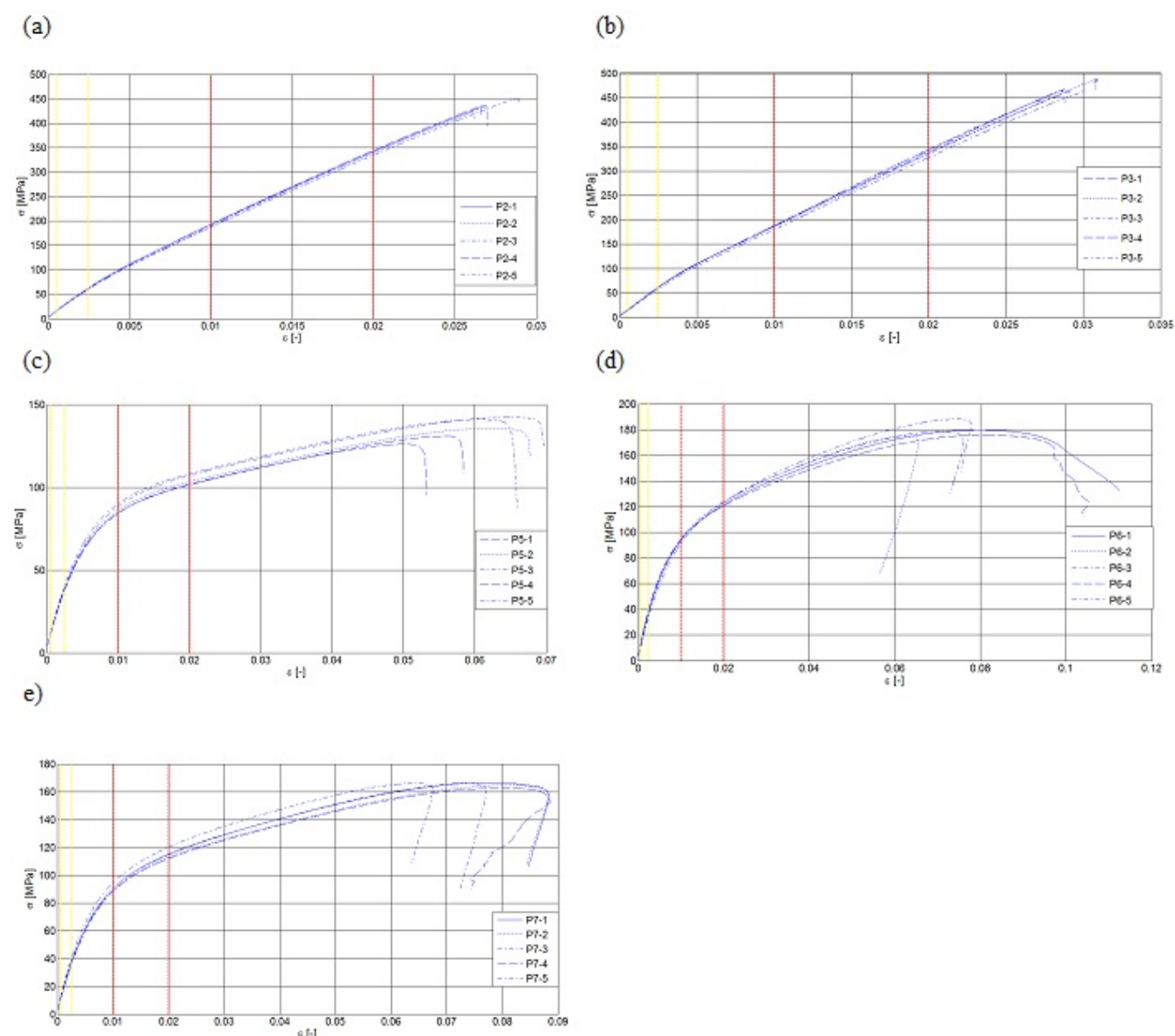
Tab. 2. Szerokość oraz wysokość każdej z próbek

i		1	2	3	4	5
P2	szerokość [mm]	24,57	24,60	24,63	24,57	24,57
	wysokość [mm]	2,83	2,87	2,90	2,87	2,87
P3	szerokość [mm]	23,57	25,07	24,23	25,00	25,53
	wysokość [mm]	4,07	4,03	4,13	4,10	4,13
P5	szerokość [mm]	23,73	23,57	23,63	23,67	23,53
	wysokość [mm]	2,77	2,70	2,70	2,77	2,70
P6	szerokość [mm]	23,17	22,27	23,07	23,03	25,63
	wysokość [mm]	4,00	4,03	3,97	4,03	4,07
P7	szerokość [mm]	24,13	23,43	23,60	22,97	23,10
	wysokość [mm]	5,13	5,13	5,20	5,20	5,13

Wykresy odkształceń podłużnych do naprężeń podłużnych otrzymane w eksperymencie dla wszystkich próbek przedstawiono na wykresach 3a-3e. Naniesione zostały dwa przedziały odkształceń: żółty według normy [7] $<0,0005;0,0025>$ oraz czerwony $<0,01;0,02>$. Zauważono, że gdy osiągnięta jest wartość odkształceń 0,005, laminat zmienia swoją sztywność, a przy tym samym przyroście odkształcenia, naprężenia rosną wolniej.

Statyczna próba rozciągania laminatów GFRP

Utworzono: wtorek, 18, czerwiec 2019 12:59



Rys. 3. Wykresy odkształcenie podłużne, a naprężenia podłużne
a) Próbką P2 b) Próbką P3 c) Próbką P5 d) Próbką P6 e) Próbką P7

Dla każdej próbki wyznaczono dwie wartości modułu sprężystości, dla wcześniej opisanych przedziałów odkształceń, według wzoru (1) z normy ISO 527-1 [7].

Obliczenia wykonano w programie MATLAB® [5].

$$E_{\text{so}} \equiv E_{\text{r}} = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\epsilon_2 - \epsilon_1} \quad (1)$$

gdzie, σ_2 jest wartością naprężenia podłużnego dla odpowiednio odkształcenia podłużnego $\epsilon_2 = 0.0025$ lub $\epsilon_2 = 0.02$, a σ_1 jest wartością naprężenia podłużnego

dla odpowiednio odkształcenia podłużnego $\varepsilon_1 = 0,0001$ lub $\varepsilon_1 = 0,1$.

Moduły sprężystości zostały zidentyfikowane przez przybliżenie liniowe (2) (regresję liniową) przy użyciu metody najmniejszych kwadratów.

$$S_r = \sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - ax_i - b)^2 \quad (2)$$

Zbiórce podsumowanie wyników otrzymanych w badaniu eksperymentalnym dla wszystkich próbek przedstawiono w tabeli 3:

Tab. 3. Uzyskane wartości z testu eksperymentalnego dla wszystkich próbek

Próbka	E_x	$E_{x,2}$	max P	max σ	max ε
	[GPa]	[GPa]	[kN]	[Mpa]	[-]
P2	23.3	14.9	30	432	0.0271
P3	23.3	15.2	49.32	467	0.0309
P5	13.7	1.7	9.09	142.39	0.0814
P6	13.6	2.8	19.63	188.21	0.1125
P7	13.7	2.4	20.73	166.53	0.0885

MODEL NUMERYCZNY ORAZ PORÓWNANIE WYNIKÓW

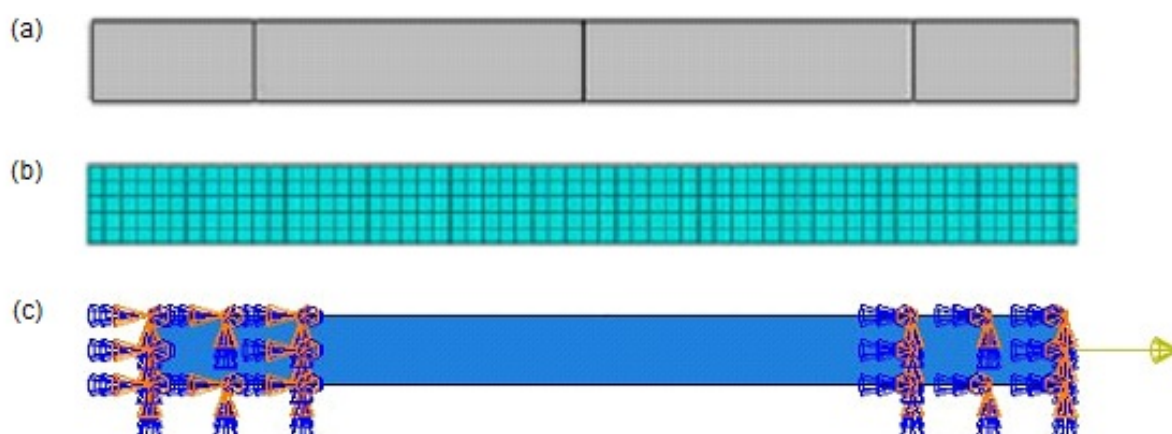
W ramach referatu wykonano obliczenia numeryczne. Symulacje elementów przeprowadzono w komercyjnym programie Abaqus. Przeprowadzono porównanie z testami doświadczalnymi.

Wartości parametrów mechanicznych dla pojedynczej warstwy $[0^\circ/90^\circ]$ zostały wyznaczone w ramach grantu FOBRIDGE (zespół kierowany przez prof. Kłasztornego) [4].

Model wykorzystuje powłoki z liniowymi funkcjami kształtu i pełną integracją. Próbki zostały wymodelowane jako kompozyt wielowarstwowy (laminat) (rys. 4a) z wykorzystaniem teorii ESL. Przyjęto element o wymiarze 5x5 mm (rys. 4b), co daje w sumie 300 elementów skończonych i 305 węzłów. Szczęki maszyny nie były modelowane. Zamiast tego przyjęto, że jeden koniec (50 mm), jako utwierdzony, a drugi (50 mm) może poruszać się w kierunku wzdłużnym, do niego przyłożono obciążenie skupione o wartości 10 kN (rys. 4c). Analizę przeprowadzono przy założeniu liniowej sprężystości materiału i przyjęciu małych przemieszczeń oraz małych odkształceń, zgodnie z teorią pierwszego rzędu.

Statyczna próba rozciągania laminatów GFRP

Utworzono: wtorek, 18, czerwiec 2019 12:59



Rys. 4. Model numeryczny badanych próbek

a) wizualizacja modelu b) siatka modelu c) warunki brzegowe oraz przyłożona siła

Porównanie wyników z modelu numerycznego oraz badania eksperymentalnego przedstawiono w tabeli 4. Dla założenia liniowo-sprężystego materiału nie widać istotnej różnicy. Porównywano tylko pierwszy etap pracy laminatów, zanim osiągnięta została granica, przy której zmienia się sztywność.

Tab. 4. Uzyskane wartości z testu eksperymentalnego oraz modelu numerycznego dla wszystkich próbek

Próbka	P2	P3	P5	P6	P7
Eksperyment E [GPa]	23,26	23,28	13,72	13,62	13,68
Model E [GPa]	23,40	23,40	13,60	13,60	13,60
Błąd względny [%]	0,60%	0,50%	0,88%	0,14%	0,56%

PODSUMOWANIE

W referacie przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych jednoosiowej próby rozciągania laminatów wraz z walidacją modeli obliczeniowych. Porównując wyniki stwierdzono, że w zakresie liniowo-sprężystym materiału wyniki są zgodne i nie ma znacznej różnicy w wynikach. Na podstawie analizy otrzymanych wyników z części eksperymentalnej oraz numerycznej można wywnioskować, iż projektowanie konstrukcji za pomocą laminatów zbrojonych włóknem szklanym jest uzasadnione dla pewnej granicy odkształceń (0,005), jest to tzw. zakres projektowy, dla którego można wykonać obliczenia w zakresie liniowo-sprężystym.

Szerokie zastosowanie kompozytów polimerowych jako alternatywy dla materiałów tradycyjnie stosowanych w konstrukcjach inżynierskich wymaga ujednoliconego podejścia do określania parametrów mechanicznych, a także opracowania procedur

obliczeniowych. Jak dotąd nie opracowano krajowych wytycznych dotyczących stosowania zbrojenia niemetalicznego w konstrukcjach.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Bielewicz E.: Wytrzymałość Materiałów, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, 1968.
- [2] Boczkowska A., Kapuściński J., Lindemann Z., Witemberg-Perzyk D., Wojciechowski S.: Kompozyty, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2003.
- [3] Chróścielewski J., Kłasztorny M., Miśkiewicz M., Pyrzowski Ł., Rucka M., Wilde K.: Kompozyt przekładkowy GFRP z rdzeniem PET w powłokowej konstrukcji kładki dla pieszych, Budownictwo i Architektura 13(2), 2014, 183-190.
- [4] Kłasztorny M., Gotowicki P., Nycz D.: Badania identyfikacyjne kompozytu BG/F nowego wygrzewanego (NS) w temperaturze 20°C, Raport 6-2013v2 z projektu Fobridge.
- [5] Rucka M., Wilde K., Dynamika Budowli z przykładami w środowisku MATLAB®, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk, 2014.
- [6] Ziemkiewicz O.: Metoda elementów skończonych, Arkady, 1972.
- [7] ISO 527-1:1993. Determination of tensile properties of plastics. Part 1: General principles.
- [8] ISO 527-4:1997. Determination of tensile properties of plastics. Part 4: Test conditions for isotropic and orthotropic fibre-reinforced plastic composites.

Tomasz Wiczenbach

Civil Engineering, II stopień, III semestr, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Politechnika Gdańska

Opiekun Naukowy: dr inż. Tomasz Ferenc

Referat został wygłoszony podczas KOMBOferencji'19 - IV Ogólnopolskiej Studenckiej Konferencji Budowlanej.



Statyczna próba rozciągania laminatów GFRP

Utworzono: wtorek, 18, czerwiec 2019 12:59

Portal edroga.pl był patronem medialnym tego wydarzenia.